



República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia Electromecánica
Departamento de Mecánica

**DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA
SUPERFICIE DE LOS RODILLOS RADIALES DEL
TRANSPORTADOR JACOBI.**

**Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero
Mecánico**

Autor: Yaciel Poll Mayor

Tutor: Prof. Asist., Ing. Benigno Leyva De la Cruz, Ms.C.

Moa /2014

“Año 56 de la Revolución”



Declaración de Autoría:

Yo: Yaciel Poll Mayor

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

.....

Autor. Yaciel Poll Mayor.

.....

Tutor. MsC. Benigno Leyva De la Cruz.



PENSAMIENTO

"Si tuviera que definir mi vida, diría algo muy simple: Ha sido un campo de batalla, nunca he dejado de luchar y nunca, ni en las circunstancias más adversas he perdido la fe en el futuro".

Blas Roca Calderío

AGRADECIMIENTOS

La gratitud es uno de los sentimientos más hermosos, por eso quiero corresponder de una forma u otra a aquellas personas que me ayudaron para que fuera posible la culminación de este trabajo.

Dentro de ellas:

- *Primeramente a dios por darme la sabiduría y Fortaleza en todo el periodo de mi vida.*
- *De forma especial a mis padres, familiares y amigos por su amor, confianza, y apoyo en todos estos años de estudiante.*
- *A mi tutor Ms.C. Benigno Leyva De la Cruz por su experiencia puesta en función de este trabajo y por estar siempre dispuesto a lo que necesitaba.*
- *A la Revolución Cubana por haberme dado el privilegio de estudiar para graduarme satisfactoriamente, algo que no hubiera sido posible sin la formación profesional con que cuento hoy y así poderle servir mejor.*
- *A todos aquellos que de una forma u otra aportaron su granito de arena. A todos los profesores del departamento de mecánica por haberme formado en estos cinco años como profesional y a los compañeros de aula presentes y ausentes.*

A todos

"Muchas Gracias"



DEDICATORIA

Dedico este trabajo en especial a mis padres, a mi hermana, mi abuela, mi tío y familiares que me alientan y ayudan en los momentos difíciles para que siga adelante.

A mi tutor y compañeros por su apoyo y dedicación durante mis estudios, y a todas aquellas personas que de una forma u otra cooperaron con mi desempeño como profesional.

A la Revolución y Fidel Castro Ruz, que ha facilitado la realización de convertir en realidad el sueño de formarme como profesional.

SÍNTESIS

El trabajo realizado tuvo como objetivo el análisis de comportamiento de la dureza superficial de los rodillos radiales en transportadores Jacobi. Para darle cumplimiento al propósito planteado se efectuó una caracterización de los rodillos y del régimen de explotación de estos, así como de los durómetros utilizados, del Spectro-Lab, y del microscopio óptico; además se realizó muestreo aleatorio simple, los análisis de límites de tolerancia, de variación de la dureza superficial, de causa raíz, de variancia, de test Duncan, de la estructura metalográfica y económico. Los resultados obtenidos indican que la dureza superficial de los rodillos muestra que el promedio antes de la explotación es de 47,5 HRC, mientras que después de la explotación es de 42,5 HRC respectivamente, se infiere que la dureza disminuye significativamente en un 10,5 %; las variaciones observadas se deben a posibles influencias de los recursos humanos, los recursos materiales, el régimen de explotación y las características de los rodillos; el análisis de la estructura metalográfica permitió determinar relación entre la variación de la dureza y el comportamiento de la estructura metalográfica. La valoración de la incidencia económica y ambiental del trabajo realizado permite revelar que el costo total en el que se incurre por retirar 9 rodillos al mes es de 2 716 500,08 CUC anual y que los efectos ambientales se expresan en contaminación sónica, derrame de desechos sólidos, emisión de gases y polvos a la atmósfera y mayor consumo de material.



SYNTHESIS

The carried out work had as objective the analysis of behavior of the superficial hardness of the radial rollers in transporters Jacobi. To give him I execute to the outlined purpose you makes a characterization of the rollers and of the régime of exploitation of these, as well as of the used durómetros, of the Spectro-Lab, and of the optic microscope; was also carried out simple random sampling, the analyses of limits of tolerance, of variation of the superficial hardness, of cause root, of variancia, of test Duncan, of the structure metallographic and economic. The obtained results indicate that the superficial hardness of the rollers sample that the average before the exploitation is of 47,5 HRC, while after the exploitation it is respectively of 42,5 HRC, it is inferred that the hardness diminishes significantly in 10,5 %; the observed variations are due to possible influences of the human resources, the material resources, the régime of exploitation and the characteristics of the rollers; the analysis of the structure metallographic allowed to determine relationship between the variation of the hardness and the behavior of the structure metallographic. The valuation of the economic and environmental incidence of the carried out work allows to reveal that the total cost in which is incurred to move away 9 rollers a month is of 2 716 500, 08 annual CUC and that the environmental effects are expressed in sonic contamination, spill of solid waste, emission of gases and powders to the atmosphere and bigger material consumption.



TABLA DE CONTENIDOS	Pág.
INTRODUCCIÓN.	1
1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.	5
1.1. Introducción.	5
1.2. Trabajos precedentes.	9
1.3. Fundamentos de la calidad.	
1.4. Métodos estadísticos en el control de la calidad.	10
1.5. Selección de los medios de medición de acuerdo con su calidad.	10
1.6. Endurecimiento superficial del acero.	11
1.7. Endurecimiento en frío de las capas. Acritud.	12
1.8. Tratamientos térmicos en los aceros.	14
1.8.1 Tratamientos termoquímicos.	16
1.9. Fundamentos teóricos sobre el desgaste.	18
1.9.1. Etapas del desgaste.	19
1.9.2. Tipos de desgaste.	19
1.9.3. Control del desgaste.	20
1.10. Conclusiones del capítulo.	21
2. MATERIALES Y MÉTODOS.	22
2.1. Introducción.	22
2.2. Características de los rodillos del transportador Jacobi.	23
2.2.1. Características del régimen de explotación de los rodillos radiales.	25
2.3. Caracterización de algunos equipos y medios de medición a emplear en la investigación.	25
2.3.1. Características de los durómetros utilizados.	26
2.3.2. Características del Spectro-Lab.	28
2.3.2.1. Composición químico de las muestras	28
2.3.3. Características del microscopio óptico NOVEL modelo NIM-100.	30



2.4. Muestreo aleatorio simple.	30
2.5. Procedimiento de obtención de las probetas de ensayo a partir del material base.	31
2.6. Límites de tolerancia.	32
2.7. Variación de la dureza superficial.	33
2.8. Causa raíz.	34
2.9. Análisis de variancia.	35
2.9.1. Prueba de intervalos múltiples de Duncan.	36
2.10. Procedimiento para el análisis de la estructura metalográfica.	37
2.11. Análisis económico.	40
2.11.1. Costo anual de materiales.	40
2.11.2. Costo de la mano de obra.	40
2.11.3. Costo de afectación a la producción por parada de equipos.	41
2.12. Conclusiones del capítulo.	42
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	43
3.1. Introducción.	43
3.2. Análisis de la representatividad de la muestra.	43
3.3. Análisis del comportamiento de la dureza superficial.	44
3.3.1. Análisis del comportamiento de la dureza de los rodillos antes y después de la puesta en explotación.	44
3.3.2. Análisis del comportamiento de la dureza de las probetas antes y después del tratamiento térmico.	47
3.4. Análisis de la variación de la dureza superficial.	49
3.5. Análisis de las causas raíz.	51
3.6. Análisis de la variancia.	54
3.6.1. Análisis de la prueba de Duncan.	51
3.7. Análisis de la estructura metalográfica.	57
3.8. Valoración económica.	59
3.9. Impacto ambiental.	61
3.10. Conclusiones del capítulo.	62



CONCLUSIONES GENERALES.	63
RECOMENDACIONES.	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	65
ANEXOS.	69

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la ciencia y la tecnología avanzan a pasos agigantados en el estudio y perfeccionamiento de las diferentes industrias a nivel mundial, empezando por las grandes potencias de la industria, así como también los países subdesarrollados como es el caso de Cuba en el cual a pesar de las grandes limitaciones de toda índole se busca mejorar eficazmente los procesos productivos y los medios de producción para lograr un óptimo resultado en beneficio del país, y de sus habitantes en general.

Los procesos productivos, de servicios auxiliares y de apoyo a la producción niquelífera, tales como las reparaciones y mantenimientos, requieren de piezas de repuesto y materiales, en los que en su mayoría se consumen considerables recursos materiales y energéticos, los cuales generan costos adicionales.

La empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" se encuentra ubicada al norte del yacimiento de mineral en Punta Gorda, provincia de Holguín entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km de la Ciudad de Moa y a 2 km del pueblo de Punta Gorda. En esta región se ubica una de las mayores reservas minerales de Níquel del mundo, aspecto que ha funcionado como inductor de un gran desarrollo socioeconómico local y regional.

Según Velázquez (2002), los Hornos de Reducción para la obtención de Ferro Níquel de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", 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.

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 amoniacal. 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 planta de 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).

La fabricación correcta de estos rodillos es muy vital ya que contribuye a garantizar el buen funcionamiento del transportador y el trabajo continuo de los mismos, por lo que el diseño de la tecnología de fabricación y el control de la calidad relativa a su realización reviste gran importancia.

A pesar de la gran variedad de factores que conllevan como consecuencia al desgaste, como por ejemplo las condiciones de trabajo y explotación a que están sometidos los elementos de máquinas, tienen particular significación en la durabilidad de estos las propiedades mecánicas del material y el acabado superficial que puedan tener dichos elementos (Leyva, 2013). En tal sentido se han realizado varios trabajos entre los que se destacan los realizados por Leyva (2013) y Prieto (2013).

Sobre la base de los aspectos anteriormente abordados se define la siguiente **situación problemática:**

- La insuficiente valoración que se hace de las propiedades que deben poseer los rodillos del transportador Jacobi de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, puesto que no se realizan mediciones precisas del acabado superficial en sus diferentes etapas y esto influye en la durabilidad de los rodillos radiales.
- El déficit de medios de medición para la determinación de los parámetros fundamentales de los rodillos radiales durante el proceso de fabricación en sus distintas etapas, como por ejemplo rugosímetros para medir las irregularidades geométricas.

➤ Las limitaciones de disponibilidad de recursos financieros para realizar inversiones en lo que respecta a la modernización, rehabilitación y explotación eficiente del parque tecnológico de la empresa.

En lo referente a las limitaciones del trabajo realizado por Prieto (2013) debe indicarse que el instrumento para medir la dureza utilizado posee una baja precisión, pues es del tipo óptico y además que no se realizó un seguimiento de la dureza y la estructura metalográfica de los rodillos en las distintas etapas; antes y después del maquinado, antes y después de su puesta en explotación, con el propósito de determinar y explicar el comportamiento de la dureza.

Por lo antes expuesto para este trabajo el **problema a investigar** lo constituye:

El insuficiente conocimiento del comportamiento de la variabilidad de la dureza superficial en las distintas etapas del proceso por el que transitan los rodillos radiales pertenecientes al transportador Jacobi de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara.

Considerando el problema a investigar se define la siguiente **Hipótesis de investigación**:

Si se efectúa una caracterización del comportamiento de la dureza superficial de los rodillos radiales en las distintas etapas del proceso por el que transita, será posible pronosticar los valores para la dureza bajo condiciones similares.

El **objeto** de estudio para este trabajo lo constituye:

Los rodillos radiales del transportador Jacobi, en la UEB de maquinado de la empresa mecánica del níquel.

El **campo de acción** de este trabajo es:

El control de la calidad en la producción de los rodillos radiales del transportador Jacobi.

A partir del problema planteado, se define como **Objetivo general**:

Realizar el análisis de comportamiento de la dureza superficial de los rodillos radiales del transportador Jacobi de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Y se definen los siguientes **Objetivos específicos**:

1. Fundamentar la investigación a llevar acabo, mediante un diagnóstico del estado actual del proceso y una revisión bibliográfica sobre el tema.
2. Caracterizar los materiales y procedimientos a utilizar en el desarrollo de la investigación.
3. Efectuar un análisis y valoración de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los procedimientos.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las **tareas** de trabajo siguientes:

1. Revisión bibliográfica y sistematización de los conocimientos y teorías existentes sobre el tema.
2. Diseño del experimento para la caracterización de la dureza superficial de los rodillos radiales durante las distintas etapas del proceso.
3. Análisis de la variancia y la prueba de Duncan para la comparación de la dureza que poseen los rodillos radiales muestreado.
4. Selección y análisis de las muestras seleccionadas para la identificación del material de los rodillos radiales y caracterización de la estructura metalográfica.
5. Valoración económica, social y ambiental del proceso asociado a los rodillos radiales del transportador Jacobi de la empresa Ernesto Che Guevara.

1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción

En este capítulo abordará inicialmente una serie de aspectos relacionados con la temática que se tratará en este trabajo de diploma, los mismos son resultado de una búsqueda bibliográfica basada en la obtención de información acerca del régimen de trabajo de los rodillos radiales de los transportadores Jacobi de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

En el presente capítulo se plantea como **objetivo:** Establecer el estado del arte relacionado con los rodillos radiales del transportador Jacobi fabricados en la empresa Mecánica del Níquel "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche."

1.2. Trabajos precedentes

Es importante conocer hasta donde han llegado otros autores sobre el tema del estudio, para así lograr abordar conocimientos que nos permitirán desarrollar nuestra temática sin cometer conclusiones erróneas y cuestiones ya analizadas por otros autores.

Leyva (2013) efectuó la verificación de la rugosidad superficial obtenida en la fabricación de los rodillos del transportador Jacobi de la Empresa Ernesto Che Guevara. La aplicación del procedimiento ofreció como resultados fundamentales que los rodillos del transportador Jacobi muestreado en la etapa final del proceso de fabricación, pueden ser aceptados, sobre la base del diámetro exterior con un riesgo del proveedor del 65 %.

Prieto (2013) determinó que el comportamiento del diámetro y la dureza de los rodillos permiten inferir que el diámetro disminuye en un 1,5 % mientras que la dureza lo hace en un 11,4 %. En relación con lo anterior, se obtuvo que la composición química y la estructura metalográfica de las muestras de los rodillos se refieran al acero AISI 1045.

Jaramillo y Suárez (2007) realiza un análisis metalográfico, para comprobar la estructura del material empleado en la fabricación del eje (AISI 1045), posteriormente se realizó un análisis químico con lo que se descubrió una alta concentración de silicio, la cual en un porcentaje mayor al 0,06% lo que afecta considerablemente las

propiedades de los aceros. Lo anterior se analizó a partir de ensayos de tensión realizados a las probetas del mismo material. Finalmente se pudo comprobar que con las condiciones de trabajo encontradas para el eje era inevitable la falla del mismo.

Barboza (2012) estudió el incremento de la resistencia a la torsión del acero AISI 1045 mediante tratamiento térmico de temple y revenido a diferentes temperaturas. Los resultados de los respectivos ensayos muestran una resistencia máxima de esfuerzo cortante de 85 kg.f/mm²; un ángulo de torsión de 50 grados con la aplicación de un torque de 16,7 kgfm. Después del recocido de la probeta para el maquinado y luego aplicarle un temple a 900 °C con enfriamiento en aceite sintético y el respectivo revenido a la temperatura de 180 °C, se logró una resistencia de 44,21 kgf/mm² y una dureza de 208 HB; de acuerdo a la evaluación la dureza del acero disminuye a medida que se incrementa la temperatura de revenido; de acuerdo a las relaciones matemáticas logradas. La temperatura adecuada para obtener la máxima dureza del acero AISI 1045 es de 180 °C.

Fernández et al (2010), analiza el comportamiento microestructural del acero AISI 1045, endurecido mediante deformación plástica superficial por rodillo, empleando como variables en el proceso de endurecimiento el número de revoluciones, avance y fuerza del torno 16D20. Se empleó el análisis espectral para determinar la composición química del acero y el Nital como reactivo químico para resaltar la estructura metalográfica después de pulida. Se establecen los parámetros de los regímenes de la deformación plástica superficial por rodillo para evaluar la dureza de los pasadores utilizados en las esteras de los equipos de laboreo minero y se expone una metodología para determinar el tiempo de ejecución del corte de las muestras.

Rodríguez (2008), en su trabajo de maestría, realiza un análisis del proceso de solidificación de la llanta y el rodillo del transportador rotatorio (Jacobi) fabricadas de acero 55 Γ según la norma GOST, en las cuales después del proceso de fundición se observan defectos por cavidades de contracción (rechupes) que afectan la calidad de producción. Realizó el análisis de los principales parámetros de la tecnología de fabricación por fundición teniendo en cuenta los factores relacionados con la

contracción. A partir del análisis de los resultados del nuevo diseño propuesto, esta realiza la simulación por el Método de Elementos Finitos utilizando el software ANSYS versión 10.0, para visualizar el proceso de solidificación de las piezas seleccionadas obteniéndose los gráficos y curvas característicos del proceso. La autora finalmente muestra anexos, tablas, dibujos, esquemas y otros aspectos que posibilitan un mejor entendimiento de la temática tratada, así como una valoración económica y ambiental.

Oliveros (2011), en su investigación efectúa un análisis de las causas que provocan el desgaste prematuro de los rodillos radiales de apoyo en el transportador sinfín para minerales reducidos en la Unidad Básica Productiva Hornos de Reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", debido al insuficiente conocimiento de las causas que lo producen. Estableció los aspectos teóricos sobre las máquinas de transporte continuo y sus elementos, así como los aspectos teóricos fundamentales sobre los procesos de fricción, desgaste y lubricación en elementos móviles. Fundamenta las propiedades a investigar y se sistematiza los métodos, procedimientos y condiciones en las que se realizaron los experimentos. Los resultados obtenidos indican que son las variaciones de la composición química, una de las causas del desgaste prematuro de los rodillos, por cuantas estas no se corresponden con las del acero 55Г (GOST), pues según proyecto es el material del que deben estar contruidos los rodillos. No se comprobó presencia de martensita, como resultado del tratamiento térmico en el acero, lo que se relaciona con la baja dureza obtenida, tanto en las zonas no trabajadas como en las desgastadas, obteniéndose valores inferiores a los establecidos por proyecto, lo que denota poca resistencia al desgaste superficial de los rodillos radiales de apoyo. Se evidenció que las roturas por obstrucción interna de los rodillos se deben al incumplimiento de las exigencias técnicas del proyecto en la construcción de los ejes, pues ninguna de las muestras analizadas presentaba sistema de lubricación para los rodamientos.

Álvarez (2006), realiza una indagación sobre la caracterización del desgaste refiriéndose al desgaste por fatiga donde esboza que el desgaste por fatiga o desgaste mecánico está casi siempre presente y caracteriza a las transmisiones

dentadas cerradas (reductores) donde recibe el nombre específico de "desgaste por picadura", el cual también es propio de los cojinetes de rodamientos, levas, etc.

Fernández (2011), sintetiza en una investigación la influencia generada por un rodillo durante la deformación plástica superficial del acero AISI 1045 para determinar las regularidades de su comportamiento mecánico y microestructural, obtenido a través del ensayo tensión – deformación, en muestras deformadas por rodadura y luego fraccionadas, se define un nuevo coeficiente de endurecimiento para el proceso, así como los parámetros de deformación a partir del movimiento por cicloide. Con el empleo del método de Willianson – Hall y difractométrico se determinó las macro y micro deformaciones; deformación reticular del parámetro de red D; el tamaño de las cristalitas; los esfuerzos en la red cristalina y la reducción del tamaño promedio de los granos, lo que permitió establecer los mecanismos de endurecimiento del acero AISI 1045, deformado por rodadura. Se obtienen modelos lineales, estadísticamente significativos, que muestran una tendencia creciente de las propiedades mecánicas y metalúrgicas en la misma medida en que se incrementan las variables independientes del proceso de experimentación (nr, P, S), que están relacionadas con los parámetros de número de revoluciones por minuto, fuerza y avance de la herramienta, para lograr la dureza deseada en la aleación. Finalmente se describe el procedimiento tecnológico que permite obtener un importante efecto económico, social y ambiental.

Alcántara (2012), complementa la investigación desarrollada por Fernández (2011), considerando la influencia que genera el desgaste abrasivo y la fricción de un par tribológico metal – metal sobre los pasadores que componen las esteras de los equipos de laboreo minero, los cuales son fabricados de acero AISI 1045 tratado térmicamente. A partir del análisis de muestras cortadas se determinan las capas que se forman por la deformación plástica en frío (acritud); la primera en la superficie del pasador con dureza de 590 HV; la segunda por efecto del borde del casquillo sobre el pasador con dureza de 560 HV y la tercera por el tratamiento térmico inducido a la pieza con dureza de 480 HV. Se establece una metodología de cálculo considerando diferentes cargas que se generan en la superficie del pasador, así

como el análisis microestructural a través de técnicas de microscópica óptica que permiten establecer el tamaño del grano con estructura martensítica y sometido a compresión dinámica, al mismo tiempo se realizó ensayos de dureza. Por último se establece un diseño de experimento obteniéndose modelos lineales de mínimos cuadrados, estadísticamente significativos, que muestran una tendencia creciente de sus propiedades mecánicas y funcionales, en la misma medida que se incrementan las variables independientes del proceso de experimentación (F y D), las cuales están relacionadas con la fuerza y el desgaste.

1.3. Fundamentos de la calidad

Jurán (1993), y Ruíz (2007), quienes desempeñaron un papel crucial a la hora de promocionar la idea de vigilar la calidad y crear métodos de control. Entre los pasos que establecieron para controlar la calidad destacan: la importancia de fomentar la idea de la necesidad de un control férreo de la calidad; la búsqueda de métodos de mejora; el establecimiento de objetivos de calidad y la aplicación de todo tipo de medidas y cambios para poder alcanzar estas metas, así como la revisión de los sistemas y procesos productivos para poder mantener el nivel de calidad alcanzado. La calidad, dentro de esta es famosa la "Triología Jurán", que consiste en los siguientes procesos para alcanzar la misma: la planificación de la calidad, el control de la calidad y el mejoramiento de la calidad.

Calidad: Es el conjunto de características de un producto que satisfacen las necesidades de los clientes y en consecuencia, hacen satisfactorio el producto.

Planificación de la calidad: Esta actividad ha de desarrollar los productos y los procesos requeridos para satisfacer las necesidades de los clientes.

Control de la calidad: Este proceso es utilizado por el personal operativo como ayuda para alcanzar los objetivos del producto y del proceso. Se basa en el bucle de retroinformación formado por las siguientes etapas: Evaluar los resultados operativos reales, comparar los resultados reales con los objetivos y actuar en función de la diferencia.

Mejoramiento de la calidad: Tiene como objetivo alcanzar unos resultados que estén a un nivel significativamente más alto que los obtenidos en el pasado.

1.4. Métodos estadísticos en el control de la calidad

El control de la calidad, en su sentido más amplio, se refiere al control sistemático de aquellas variables de los procesos de producción que inciden en las características del producto (Hernández; 1986). Estos valores se deben a la aplicación de materiales, hombres, máquinas y a las condiciones de la producción. Los métodos estadísticos en el control de la calidad permiten reducir los costos de inspección, y controlar mejor la calidad de la producción, ya que liberan al control de la calidad de las ataduras del empirismo. Los mismos tienen como objetivos principales los siguientes:

- Observar y evaluar la calidad del producto terminado y descubrir la amplitud de los fallos en concordancia con las especificaciones.
- Seguir el rastro de los fallos desde el producto terminado, a la materia prima o proceso mediante el cual se elabora el producto.
- Proveer los medios de mantener los procesos de producción bajo control, poner al descubierto los cambios y ayudar a identificar las causas de tales cambios.
- Evaluar los procesos o medios disponibles para reducir las variaciones de la calidad.
- Comparar los métodos disponibles para medir las características de la calidad, emplear los más exactos y que estos sean económicamente posibles.

1.5. Selección de los medios de medición de acuerdo con su calidad

En la investigación se hace necesario el uso de algunos medios de medición para la toma de algunos parámetros como resultado de la misma. Para esto es necesario aclarar que la efectividad del control de la calidad no puede ser mayor que la de los instrumentos utilizados en la inspección. Se debe tomar como criterio general el que la precisión de la medición siempre sea solamente una fracción de la tolerancia de fabricación de la pieza a construir, así se recomienda que esta fracción, en lo posible, no exceda la décima parte de la tolerancia de fabricación de la pieza, (Hernández; 1986). Esto hará que la exactitud de la medición no se vea afectada por los errores sistemáticos instrumentales, los que no sobrepasan la apreciación del instrumento utilizado, aún en el caso de los de peor clase de precisión.

Para las mediciones o selección de estos medios de acuerdo con su calidad es necesario tener presente las características metrológicas que se mide, y la disponibilidad de los equipos o instrumentos que se emplearán en ciertas comprobaciones. De acuerdo con las particularidades que estos poseen se pueden encontrar distintos medios como: los micrómetros, pie de rey, durómetros, cintas métricas, rugosímetros, microscopios ópticos, máquinas de ensayo, entre otros equipos y máquinas que de una forma u otra desempeñan un interesante papel de funcionamiento en diferentes investigaciones, relacionadas con los fundamentos de las mediciones y la metrología dimensional.

1.6. Endurecimiento superficial del acero

Según Castillo (2007) las actuales exigencias tecnológicas ponen de manifiesto la necesidad de disponer de materiales metálicos con elevadas prestaciones bajo condiciones de servicio críticas, así por ejemplo, las matrices metálicas empleadas en los procesos metalúrgicos del trabajado en frío y en caliente de los metales, necesitan de una alta tenacidad y elevada dureza superficial, especialmente a alta temperatura.

Generalmente los tratamientos térmicos superficiales tienen por objeto el endurecimiento de la superficie de los metales y, por consiguiente, el aumento de la resistencia al desgaste, conservando la ductilidad y tenacidad del núcleo. El endurecimiento superficial del acero se puede conseguir, fundamentalmente, mediante dos procedimientos: modificando la composición química de la superficie mediante la difusión de algún elemento químico (carbono, nitrógeno, azufre, etc.) en cuyo caso se le conoce como tratamiento termoquímico modificando sólo la microestructura de la superficie por tratamiento térmico, conociéndose entonces como tratamiento superficial.

Los tratamientos termoquímicos aplicados al acero son aquellos en los cuales la composición de la superficie de la pieza se altera por la adición de carbono, nitrógeno u otros elementos. Los tratamientos más comunes son: carburización, nitruración, carbonitruración y boración. Estos procesos se aplican comúnmente a piezas de acero de bajo carbono para lograr una capa exterior dura, resistente al

desgaste reteniendo un núcleo tenaz y dúctil. El término endurecimiento de capa superficial (case hardening) se usa frecuentemente para este tratamiento.

1.7. 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 templan 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 Smelianky 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.

1.8. Tratamientos térmicos en los aceros

Barboza (2012) plantea que el tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales está creado. Este tipo de procesos consisten en el calentamiento y enfriamiento de un metal en su estado sólido para cambiar sus propiedades físicas. Con el tratamiento térmico adecuado se pueden reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férricas, y

ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecido.

Para conocer a que temperatura debe elevarse el metal para que se reciba un tratamiento térmico es recomendable contar con los diagramas de cambio de fases como el de hierro–hierro–carbono. En este tipo de diagramas se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase (cambios de estructura cristalina), dependiendo de los materiales diluidos.

Los tratamientos térmicos han adquirido gran importancia en la industria en general, ya que con las constantes innovaciones se van requiriendo metales con mayores resistencias tanto al desgaste como a la tensión. Los principales tratamientos térmicos son:

Temple: Su finalidad es aumentar la dureza y la resistencia del acero. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior A_c (entre 900-950°C) y se enfría luego más o menos rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, etc.

Revenido: Sólo se aplica a aceros previamente templados, para disminuir ligeramente los efectos del temple, conservando parte de la dureza y aumentar la tenacidad. El revenido consigue disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada. Se distingue básicamente del temple en cuanto a temperatura máxima y velocidad de enfriamiento.

Recocido: Consiste básicamente en un calentamiento hasta temperatura de austenitización (800-925°C) seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza. También facilita el mecanizado de las piezas al homogeneizar la estructura, afinar el grano y ablandar el material, eliminando la acritud que produce el trabajo en frío y las tensiones internas.

Normalizado: Tiene por objeto dejar un material en estado normal, es decir, ausencia de tensiones internas y con una distribución uniforme del carbono. Se suele emplear como tratamiento previo al temple y al revenido.

1.8.1 Tratamientos termoquímicos

Castillo (2007) comenta que estos tratamientos implican una alteración de la composición química de la capa superficial del metal tratado, debido a la difusión de átomos de un medio circundante hacia el interior del metal, y depende de varios factores como son:

Temperatura, tiempo, concentración del medio circundante, concentración inicial de la pieza, etc. como el control de las variables anteriores es relativamente sencillo, los tratamientos termoquímicos se utilizan cuando se requiere asegurar una determinada profundidad y zonificación de la capa endurecida. El carbono, el nitrógeno y el boro son los elementos más utilizados para endurecer un acero por lo que se utilizan ampliamente en este tipo de tratamientos. A diferencia de los tratamientos superficiales, se utilizan aceros de bajo carbono (máximo 0,25 %).

Cementación (C). Aumenta la dureza superficial de una pieza de acero dulce, aumentando la concentración de carbono en la superficie. Se consigue teniendo en cuenta el medio o atmósfera que envuelve el metal durante el calentamiento y enfriamiento. El tratamiento logra aumentar el contenido de carbono de la zona periférica, obteniéndose después, por medio de temple y revenidos, una gran dureza superficial, resistencia al desgaste y buena tenacidad en el núcleo.

Consiste en recubrir las partes a cementar de una materia rica en carbono, llamada cementante, y someterla durante varias horas a altas temperatura de 900 °C. En estas condiciones es cuando tiene mayor capacidad de disolución el carbono, que irá penetrando en la superficie que recubre a razón de 0,1 a 0,2 milímetros por hora de tratamiento. Una vez absorbido por la capa periférica del acero, comienza el proceso de difusión del carbono hacia el interior de la pieza (el espesor de la capa cementada depende de la temperatura y del tiempo que dure la operación). La pieza así obtenida se le da el tratamiento térmico correspondiente, de temple y revenido, y cada una de las dos zonas de la pieza, adquirirá las cualidades que corresponden a su porcentaje de carbono. En ocasiones se dan dos temple, uno homogéneo a toda la pieza y un segundo temple que endurece la parte exterior.

Nitruración (N). Al igual que la cementación, aumenta la dureza superficial, aunque lo hace en mayor medida, incorporando nitrógeno en la composición de la superficie de la pieza. Se logra calentando el acero a temperaturas comprendidas entre 400 °C y 525 °C aproximadamente, dentro de una corriente de gas amoníaco, más nitrógeno.

La penetración de este tratamiento es muy lenta, del orden de un milímetro de espesor por cada 100 horas de duración, aunque después de esto, la pieza no precisará de temple. Este tratamiento se realiza normalmente en hornos eléctricos a temperaturas aproximadas de 500 °C, por cuya cámara circula el gas de amoníaco. Tanto la temperatura como la concentración del gas en amoníaco, deben mantenerse constante durante todo el proceso. Además, en caso de existir alguna parte de la pieza que no se desee nitrurar, se introducen dichas partes en una solución de estaño y plomo al 50 %, que evitará que la atmósfera de nitrógeno les afecte.

Cianuración (C+N). Endurecimiento superficial de pequeñas piezas de acero. Se utilizan baños con cianuro, carbonato y cianato sódico. Se aplican entre 750 °C y 950 °C aproximadamente. Los baños de cianuro se usan generalmente en los procesos de temple de acero para impedir la descarburación de la superficie. Sus principales ventajas son: la buena eliminación de oxidación, la profundidad de la superficie es duradera, el contenido de carbono se reparte homogéneamente y de gran rapidez de penetración. También posee ciertas desventajas como son: el lavado de las piezas posterior al tratamiento para prevenir la herrumbre, la revisión de la composición del baño ha de ser de forma periódica y la alta peligrosidad de las sales de cianuro, dado que éstas son venenosas.

Carbonitruración (C+N). Al igual que la cianuración, introduce carbono y nitrógeno en una capa superficial, pero con hidrocarburos como metano, etano o propano, amoníaco (NH₃) y monóxido de carbono (CO). En el proceso se requieren temperaturas de 650 a 850 °C aproximadamente, y es necesario realizar un temple y un revenido posterior.

Dicho tratamiento se realiza en las mismas condiciones que la cementación ya sea en baño de sales de una composición determinada o en atmósfera gaseosa con adición de nitrógeno por medio de la disociación de amoníaco. Por esta razón la temperatura de la carbonitruración se sitúa entre las temperaturas de estos dos procesos. La oferta de nitrógeno, que se difundirá en el acero, dependerá de la composición del baño y también de su temperatura. Por lo contrario, el aumento de nitrógeno se reduce a medida que aumenta la temperatura. Diremos que el tratamiento de carbonitruración está subdividido en: Carbonitruración por encima de A1 (750°C a 850°C) y carbonitruración por debajo de A1 (700°C a 750°C).

Sulfinización (S+N+C). Aumenta la resistencia al desgaste por acción del azufre. El azufre se incorpora al metal por calentamiento, a la temperatura de 565 °C aproximadamente, en un baño de sales. Se utiliza en aceros de bajo carbono donde la viruta no se corta sino que se deforma y es arrastrada acumulándose frente al ataque. La incorporación superficial del azufre genera sulfuro de hierro (S_2Fe) como inclusión no metálica (impurezas), y se aloja en los bordes de grano lo que fragiliza al metal, lo cual hace que disminuya el punto de fusión. Después de la sulfinitación las dimensiones de las piezas aumentan ligeramente, aumentando su resistencia al desgaste, favoreciendo la lubricación y evitando el agarrotamiento.

1.9. Fundamentos teóricos sobre el desgaste

El desgaste es uno de los efectos más destructivos a que están sometidos los metales; el cual se puede definir como el deterioro ocurrido a consecuencia del uso o del medio ambiente, y puede considerarse de forma general un fenómeno superficial. Al investigar el desgaste de los metales en una corriente de granos abrasivos, se confirma que existe una estrecha relación entre la resistencia al desgaste y las fuerzas de los enlaces en la red cristalina de los metales (Verdeja, 1996).

Los análisis de los sistemas han demostrado que el 75% de las fallas mecánicas se deben al desgaste de las superficies en rozamiento. Se deduce fácilmente que si queremos aumentar la vida útil de los equipos, se debe disminuir el desgaste al mínimo posible; para esto existe una materia que se encarga del estudio del

desgaste, la fricción y la lubricación en superficies en contacto, esta materia recibe el nombre de Tribología.

1.9.1. Etapas del desgaste

Cuando se ponen en marcha piezas mecánicas que experimentan rozamiento, se presentan esquemáticamente tres etapas (Clauser, 1985): En una primera etapa denominada rodaje, la razón de desgaste es alta, pero disminuye en un breve lapso de tiempo; este desgaste no compromete el funcionamiento de la pieza; sin embargo, obliga a tomar ciertas precauciones, un segundo período llamado marcha normal, representa la vida útil de la máquina; durante este período el desgaste es débil o al menos constante y una tercera etapa llamada de envejecimiento, se caracteriza por una razón de desgaste creciente, debido a desgastes cada vez más frecuentes y más graves, hasta deteriorar parcial o totalmente la pieza.

1.9.2. Tipos de desgaste

El desgaste puede clasificarse de diferentes formas atendiendo siempre a sus principales características. De esta manera se deducen los distintos tipos de desgaste existentes (Escaverino, 1986):

Desgaste por fatiga: Surge por concentración de tensiones mayores a las que puede soportar el material. Incluye las dislocaciones, formación de cavidades y grietas.

Desgaste abrasivo: Es el daño por la acción de partículas sólidas presentes en la zona del rozamiento.

Desgaste por erosión: Es producido por una corriente de partículas abrasivas, muy común en turbinas de gas, tubos de escape y de motores.

Desgaste por corrosión: Originado por la influencia del ambiente, principalmente la humedad, seguido de la eliminación por abrasión, fatiga o erosión de la capa del compuesto formado. A este grupo pertenece el desgaste por oxidación: ocasionado principalmente por la acción del oxígeno atmosférico o disuelto en el lubricante, sobre las superficies en movimiento.

Desgaste por Frotación: Aquí se conjugan las cuatro formas de desgaste, en este caso los cuerpos en movimiento tienen movimientos de oscilación de una amplitud menos de 100 μm . Generalmente está presente en sistemas ensamblados.

Desgaste por deslizamiento o adhesión: Es el proceso por el cual se transfiere material de una a otra superficie durante su movimiento relativo como resultado de soldadura en frío debido a las grandes presiones existentes entre las asperezas, en algunos casos parte del material desprendido regresa a su superficie original o se libera en forma de virutas o rebaba. Existen pruebas de este tipo en las que se emplea una máquina de perno o esfera en disco.

Desgaste Fretting: Es el desgaste producido por las vibraciones inducidas por un fluido, a su paso por una conducción.

Desgaste de Impacto: Son las deformaciones producidas por golpes y que producen una erosión en el material.

En la tabla 1.1 se muestran algunos aspectos de los tipos de desgaste que más se pueden encontrar en la práctica industrial.

Tabla 1.1. Aspectos del desgaste (Verdeja, 1996).

Tipo de desgaste	Aspecto de la superficie
Por fatiga superficial	Grietas, caries
Abrasivo	Excoriación, arañazos, ralladura.
Adhesivo	Protuberancias, escamas, caries
Corrosivo mecánico	Producto de la reacción (película- partícula)

Como se observa en la tabla 1.1, el desgaste puede manifestarse de diferentes formas, según el tipo de movimiento o de contacto entre las superficies, ocasionando daños que provocan el retiro de la pieza de servicio e incluso en ocasiones de forma prematura.

1.9.3. Control del desgaste

La resistencia al desgaste se incrementa con el aumento del contenido de carbono y de la dureza, la inclusión de pequeñas cantidades de elementos aleantes (níquel, cromo, silicio, magnesio). La resistencia al desgaste aumenta con el contenido de carbono hasta un límite en dependencia del material, siendo los aceros más

resistentes al desgaste aquellos cuyo contenido de carbono se encuentran entre 0,6 y 0,8 %. Se establece que el contenido de carbono hasta un valor de 0,8% influye en la resistencia al desgaste; para mayores contenidos esta comienza a disminuir (Rodríguez, 1998).

Para el diagnóstico o identificación del desgaste se utilizan los siguientes criterios, y factores que hacen disminuir el mismo:

- Aumento de la dureza de las capas superficiales de los elementos de máquinas.
- Incremento del contenido de carbono y de carburos duros hasta un por ciento determinado en dependencia del material.
- Control de la relación de dureza metal-abrasivo (Hm/Ha).
- Disminución del tamaño de las partículas abrasivas.
- Evitar la entrada de partículas abrasivas provenientes del medio.
- Facilitar la salida de las partículas abrasivas producto del desgaste.
- Selección adecuada del ángulo de ataque de las partículas en dependencia de los materiales utilizados.
- Disminución de las cargas y velocidades.
- La lubricación de las superficies en contacto.
- Excelente acabado de superficies.

1.10. Conclusiones del capítulo

- Las bibliografías consultadas, ofrecen información en cuanto a la calidad que se debe lograr en la producción de los rodillos radiales de apoyo del transportador de tornillo sinfín (Jacobi); referente a los materiales empleados en la fabricación de los rodillos, la deficiencia en la tecnología de maquinado, y carencia de tratamiento adecuado del material.
- No se muestra en los trabajos consultados un tratamiento sistémico de las propiedades de los rodillos del transportador Jacobi, puesto que no se realizan mediciones de las mismas antes del maquinado, igual que antes de la puesta en explotación de estos y después que se han retirado, considerando el comportamiento de la estructura metalográfica para explicar la variación que experimentan dichas propiedades.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La microestructura, dureza, composición química y otros análisis de un material son partes del estudio de las características estructurales o de constitución de un metal o una aleación, para relacionar esta con las propiedades físicas y mecánicas. Sin duda estos procedimientos mecánicos son importantes para el análisis de una probeta adecuadamente preparada. Tales estudios proporcionan una abundante información sobre la constitución del metal o aleación investigada. En la proyección, diseño y explotación de los rodillos radiales es necesaria la realización de experimentos metalográficos, de dureza y composición del material, además del comportamiento de la fiabilidad. Estas técnicas han sido siempre unas potentes herramientas para el tratamiento de hipótesis y la solución a los problemas de averías en elementos y equipamientos industriales.

En este capítulo se plantea como **objetivo**: Efectuar la caracterización de los materiales utilizados en la investigación, así como descripción de los procedimientos empleados en la obtención y análisis de los resultados.

2.2. Características de los rodillos del transportador Jacobi

Los rodillos radiales en su conjunto, son estructuras sólidas de 200,7 kg de peso; compuestas por un cuerpo llamado propiamente rodillo (Figura 2.1). Estos son fabricados de acero 55Г GOST y de 40–46 HRC de dureza en la superficie según proyecto, acero con propiedades para el mejoramiento térmico con el objetivo de darle ciertas propiedades de resistencia a la fricción, desgaste y vibraciones para que pueda tener más vida útil y ser más eficiente en su período de trabajo. 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 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. Tiene unas dimensiones generales de 480 mm entre los apoyos y el diámetro del cuerpo giratorio es de 305 mm.



Figura 2.1. Rodillos radiales del transportador Jacobi en explotación junta la llanta.

Estos rodillos radiales han evidenciado las deficiencias que se refieren a continuación: porosidades en la superficie de trabajo, las cuales muchas veces se revelan al poco tiempo de verse puesto en explotación, atribuible a defectos de fundición (Batista, 2007 y Rodríguez, 2008), se evidencia carencia de una adecuada lubricación de los cojinetes puesto que no se dispone de orificio para la aplicación de esta. Hay falta de cumplimiento de la especificación técnica establecida para el material de la pieza debido a que no se emplea el material Acero 55 Γ no se logra la dureza de 40 a 45 HRC y la estructura metalográfica obtenida no es la típica del tratamiento térmico a aplicar (Oliveros, 2011) y no se le realizan mediciones para verificar la rugosidad superficial que se obtienen durante su fabricación; puesto que no se disponen de rugosímetros habilitados para tales efectos.

Las soluciones alternativas a estas limitaciones pasan por considerar la implementación de nuevas soluciones tecnológicas en la fabricación de dichas piezas, hasta el hecho de la sustitución del transportador de jacobi por uno de paleta. Se piensa que debe tenerse en cuenta el hecho de que las demandas de rodillos constituyen uno de los principales contenido de trabajo de la UEB de maquinado de la Empresa Comandante Gustavo Machín Hoed De Beche.

Estos rodillos radiales sirven de apoyo a las yantas las cuales poseen las siguientes características: tienen una masa de 288,8 Kg, se construyen de acero 55 Γ (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.

2.2.1. Características del régimen de explotación de los rodillos radiales

Las características del régimen de explotación de los rodillos radiales que fueron objeto de estudio en el presente trabajo, se muestran a continuación en la tabla 2.1

Tabla 2.1. Régimen de explotación de los rodillos (Prieto, 2013).

Material de los rodillos	Acero AISI 1045
Número de revoluciones	23,3 rev/min
Temperatura	250 ⁰ C
Fuerza	37 258,82 N
Flujo de agua	10 m3/h
% de sólido presente en el agua	1 %
Tiempo diario de trabajo	24 h
Diámetro exterior	305 mm
Diámetro interior	150 mm
Largo	260 mm

2.3. Caracterización de algunos equipos y medios de medición a emplear en la investigación

Para dicha investigación se tuvieron en cuenta las características de los diferentes equipos, materiales y medios de medición a emplear en la caracterización de las fallas de los rodillos radiales del transportador rotatorio Jacobi. Para dar

cumplimiento al objetivo propuesto en el trabajo se emplearán diferentes máquinas, donde para darle uso a las mismas se trató en lo posible que estas tuvieran las mejores condiciones para así evitar errores causales por problemas de desajustes.

2.3.1. Características de los durómetros utilizados

➤ Durómetro óptico modelo 316

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 2.2 se muestra el instrumento de medición portátil que se empleará para la determinación de la dureza de las muestras indicadas. 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 2.2. Durómetro óptico 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 profundidad de 6.4 cm y un peso de 0.9 kg.

➤ Durómetro portátil modelo DP 300

Este durómetro (figura 2.3) mide por procesamiento dinámico en todas las direcciones, para todos los metales con alta precisión y gran amplitud en el rango de medida. Tiene como características principales ensayo rápido y documentación de

los resultados; mediciones en áreas de difícil acceso o espacios reducidos; variación de dureza en piezas grandes y pesadas. Las mediciones deben realizarse de acuerdo con la norma ASTM A-956-96.

1- Características del dispositivo de impacto D:

- Largo: 147 mm
- Diámetro: 20 mm
- Peso: 75 g
- Max dureza de ensayo: 940 HV

2- Características del cuerpo de impacto D:

- Energía de impacto: 11 N.mm
- Masa del impacto: 5,5 g
- Punta de ensayo: esférica
- Diámetro: 3 mm dureza: 1600 HV
- Material: carburo de tungsteno

3- Características de la unidad electrónica:

- Completamente programable a través del teclado
- Conexión a unidades de impacto: D, DC, DH5, C, G, DL, E
- Unidades de dureza: HB, HV, HRC, HRB, HS, HL
- Precisión: $\pm 0,5\%$ (referido a $I=800$) ± 4 unidades HL
- Dirección de impacto: seleccionable en todas las direcciones
- Material de ensayo: acero, fundición de hierro, aleaciones de fundición de aluminio, latón y cobre.



Figura 2.3. Durómetro portátil modelo DP 300.

2.3.2. Características del Spectro-Lab

El Spectro-Lab es un equipo que se caracteriza por la determinación de composición química mediante el método de emisión óptica para aceros de baja aleación, aceros aleados, hierro fundido y aleaciones de base níquel; determinando la presencia de más de 20 elementos químicos. Dentro de las principales características del Spectro-Lab encontramos: calidad del argón de 99,998 % de pureza, voltaje de 220 a 230 v de corriente alterna ± 10 %, frecuencia de 50 a 60 Hz, temperatura de trabajo de 6 a 40 °C, humedad del aire del 20 al 80 % y un peso de 400 kg.



Figura 2.4. Spectro-Lab.

En la figura 2.3 se observa el equipo donde se realizará el análisis de la composición química de las muestras seleccionadas, donde, a través de este medio de medición, se podrá obtener la composición química de las muestras a analizar, como promedio de los resultados de los tres chispazos.

2.3.2.1 Composición químico de las muestras

Para la determinación del material de los rodillos se realizó una comparación entre la composición química de la aleación y la del acero que se le correspondía, el acero AISI 1045. A continuación se muestra la composición química estándar del acero AISI 1045 en la tabla 2.2, donde mediante esta se pudo identificar el material de los rodillos.

Tabla 2.2. Composición química estándar del acero AISI 1045 (%).

C	Mn	P	S	Si
0,42-0,50 %	0,40-0,90 %	$\leq 0,060$ %	$\leq 0,040$ %	0,20-0,52 %

Fuente: Key to steel (2002)

El estudio de estos dos ensayos se realizó para las muestras seleccionadas de las probetas antes y después del tratamiento térmico; y de los rodillos antes y después de la puesta en explotación. Este análisis de la composición química del materiales antes expuesto se determinó empleando el método propuesto en el epígrafe 2.3.2 del capítulo 2 donde mediante este se obtuvo la composición química de la aleación de las muestras según las condiciones establecidas (ver tablas 2.2; 2.3 y 2.4).

Tabla 2.3. Composición química del material de suministro para probetas (%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Fe
0,474	0,21	0,61	0,014	0,009	0,012	0,003	0,002	0,0262	98,6

Tabla 2.4. Composición química de los rodillos después de la puesta en explotación (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Fe
0,475	0,25	0,60	0,010	0,006	0,134	0,016	0,05	0,0379	98,3

Dentro de los elementos que constituyen el acero se encuentra el carbono, según Skalki y Ronda (1988), ejerce una gran influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero. Eleva su resistencia, dureza y templabilidad. Por otra parte, el manganeso le aporta elevada resistencia en el proceso de fricción, incremento de la resistencia mecánica, resistencia a la tracción y resistencia a la elongación relativa y a la capacidad de endurecimiento en frío según criterios de Caraballo (2004).

Según Luffe (1994), el molibdeno, disuelto en la ferrita intensifica la dureza y la tenacidad. Exceptuando al carbono, tiene el mayor efecto endurecedor y un alto grado de tenacidad, así como influye en el tamaño del grano durante la deformación en frío.

Belozerov *et al.* (2006), han demostrado la influencia de las propiedades del material en el proceso de deformación, la dureza, el endurecimiento por deformación, la ductilidad y la inestabilidad metalúrgica, al considerar que la resistencia a la deformación plástica determina el nivel de tensión del material deformado plásticamente.

De acuerdo con los resultados obtenidos y la composición estándar del acero AISI 1045, se define que los materiales analizados son de acero AISI 1045, se pudo

determinar el material del que actualmente se están fabricando estos elementos.

2.3.3. Características del microscopio óptico NOVEL modelo NIM-100

El microscopio es un instrumento óptico compuesto al menos por dos lentes que tienen como función la obtención de imágenes mayores por refracción de un objeto pequeño.

Para la observación de la microestructura de las muestras, que se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se utilizará un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, este está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las muestras en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas. En la figura 2.5, se observa la imagen del microscopio a emplear en la observación de las muestras.



Figura 2.5. Microscopio óptico NOVEL modelo NIM-100.

2.4. Muestreo aleatorio simple

La tarea principal de este apartado es definir una muestra lo más pequeña posible con la mayor representatividad. En este caso se procedió de la siguiente forma: Se fija el tamaño de la muestra y se determina la posición espacio-temporal que maximice la representatividad. Aquí se utilizó el muestreo aleatorio simple, utilizando las expresiones de cálculos recomendada (Miller et al, 2005).

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:

$$n = \left(Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right)^2 \quad (2.1)$$

Donde:

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

α – Es el nivel de significancia.

σ – Es la desviación típica poblacional.

E- Es el error máximo de estimación.

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.

2.5. Procedimiento de obtención de las probetas de ensayo a partir del material base

Para la obtención de las probetas de ensayo a partir del material de ensayo se requiere los siguientes procedimientos:

Inicialmente el análisis químico fue realizado a través del laboratorio de la UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel con una muestra del material de suministro de las probetas. Los resultados del análisis químico se presentan en la tabla 2.3 antes expuesta, observamos que el acero analizado corresponde al acero AISI 1045.

Luego se escogió una barra laminada de acero AISI 1045, de la misma se saco la muestra del análisis químico, después de ser escogidas se cortan las probetas en la máquina CNC KBS-400, se pasa por la rectificadora plana para una mayor rectitud llegando a las dimensiones finales de 35 mm de diámetro y 10 mm de espesor.

Después de llegar a las dimensiones deseadas de las probetas esta es sometida inicialmente a un precalentamiento a 450 °C durante 10 minutos. Luego, se llevó a la temperatura de temple volumétrico requerida: 830 °C o 840 °C (según sea el caso)

por 10 minutos, dándole un enfriamiento en el medio agua con el objetivo de elevar la dureza de las probetas en el rango de 45....55 HRC.

Luego se efectúa el último proceso de esta área: el revenido, dándole un calentamiento de 300 °C a 350 °C con una exposición de 1 hora y 10 minutos con el objetivo de estabilizar la dureza obtenida en el temple entre 40....45 HRC.

Ambos procesos han sido comprobado y chequeado por el tecnólogo de tratamiento térmico y el jefe de brigada de esa área de la UEB de Maquinado.

2.6. 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)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (2.2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (2.3)$$

$$LT_{m\acute{a}x} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.4)$$

$$LT_{m\acute{i}n} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.5)$$

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 (α).

S - Desviación típica.

n - Total de observaciones.

α - Nivel de significancia.

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

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).

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.

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).

2.7. Variación de la dureza superficial

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 pueden determinar a través de las siguientes expresiones. De forma análoga se procede para la determinación de la variación de la dureza en las probetas.

$$\Delta H_{abs} = \bar{H}_{desp} - \bar{H}_{antes} \quad (2.6)$$

Donde:

ΔH_{abs} - Variación absoluta de la dureza, HRC.

$\bar{H}_{desp}$ - Dureza después del proceso, HRC.

$\bar{H}_{antes}$ - Dureza antes del proceso, HRC.

$$\Delta H_{rel} = \left| \frac{\bar{H}_{desp} - \bar{H}_{antes}}{\bar{H}_{antes}} \right| \cdot 100\% \quad (2.7)$$

Donde:

ΔH_{rel} - Variación relativa de la dureza, %.

2.8. Causa raíz

En el análisis de las causas que provocan las variaciones de una variable que es objeto de valoración, deben someterse a consideración la mayor cantidad posible de criterios para poder obtener una descripción más completa de la situación analizada. Debe adoptarse una actitud positivista ante tal concepción pues los criterios y sugerencias, bien orientados, pueden servir de base para la proyección futura, con vista al mejoramiento de la calidad. La confección de un diagrama de causa - efecto puede orientar el trabajo ulterior.

El diagrama causa - efecto, que se parece al esqueleto de un pez, comienza con una línea horizontal al centro que representa un problema. Los factores principales que afectan al parámetro se listan en líneas diagonales conectadas con la línea central horizontal. Los factores que afectan a los factores principales se incluyen como líneas horizontales conectadas a las líneas diagonales.

La construcción del diagrama causa - efecto, para el caso de las mediciones de la dureza superficial, implica el desarrollo de los siguientes pasos lógicos:

1. Se construye el diagrama base (diagrama de control para mediciones, diagrama de caja o gráfico de bigote, diagrama de dispersión, etc.).
2. Se reúne a los ingenieros, supervisores y operadores que representan la atención del proceso de explotación de los rodillos para una sección de lluvia de ideas, dándole respuesta a la siguiente interrogante:
¿A qué se debe las variaciones que muestran en el tiempo la variable dureza superficial?, o ¿de qué depende la variabilidad de la variable dureza superficial?.
3. Se confecciona una lista de causas posibles de la variación de la dureza superficial. (Defecto principal).
4. Se construye el diagrama causa – efecto.

Se debe considerar para la aplicación de esta técnica el volumen de artículos a valorar pues esto determina la representatividad y objetividad el análisis.

2.9. Análisis de variancia

➤ Para asegurar los supuestos de normalidad y homogeneidad de variancia requerida para la prueba de Fischer se procede a eliminar el valor tomado del rodillo 1 ante de explotación y el valor del rodillo 4 después de explotación. Este se realiza por los pasos siguientes:

1. Análisis de Hipótesis:

Hipótesis nula, $H_0: \mu_1 = \mu_2$

Hipótesis alterna, $H_0: \mu_1 \neq \mu_2$

2. Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

3. Criterio de rechazos de la Hipótesis nula (H_0):

Se rechaza la H_0 si $F > F_C$; es el valor de $F_{0,05}$ para (k-1) y k (n-1) grados de libertad donde F se determina para la tabla de análisis de variancia.

4. Calculo:

Tabla 2.5. Fórmulas para el análisis de varianza.

Fuente de variable	Grdos de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Fischer
Tratamientos	(k-1)	SS(Tr)	SS(Tr)/k-1	SS(Tr)/k-1
Error	k (n-1)	SSE	SSE/k(n-1)	SSE/k(n-1)
Total	(k*n-1)	SST		

$$C = \frac{T_i^2}{k * n} \quad (2.8)$$

Donde:

C: termino de corrosión

T_i^2 : número total de n observaciones en la i – ésima muestra

K: cantidad de tratamientos

n: tamaño de muestra por tratamientos

$$SST = \sum_{i=1}^K * \sum_{j=1}^N * Y_{ij}^2 \quad (2.9)$$

Donde:

SST: suma de cuadrado total

Y_{ij}^2 : variable que adquiere el valor de cada observaciones

$$SS(Tr) = \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n} - C \quad (2.10)$$

Donde:

SS (Tr): suma de cuadrados para tratamientos

$$SSE = SST - SS(Tr) \quad (2.11)$$

Donde:

SSE: suma de cuadrado del error.

5. La decisión se plantea sobre la base del criterio del rechazo de la hipótesis nula definida en el paso 3 y el nivel de significancia precisado en el paso 2.

2.9.1. Prueba de intervalos múltiples de Duncan

El test, desarrollado por Duncan es largamente utilizado para comparar pares de medias. Para el test de Duncan, las medias de los tratamientos (con el mismo tamaño de muestras) son colocadas en orden creciente y el error estándar de cada media es determinado por:

$$S_{yit} = \sqrt{\frac{MQ_E}{n}} \quad (2.12)$$

En el caso de muestras con tamaños diferentes, n debe ser cambiado por la media armónica, n_h , de las n_i , quedando con:

$$n_h = \frac{a}{\sum_{i=1}^a \left(\frac{1}{n_i}\right)} \quad (2.13)$$

En las tablas estadísticas, se presentan los valores de las amplitudes $r(p, f)$ para $p=2,3,\dots, a$. En el que a es el nivel de significancia y f es el número de grados de libertad asociado a la media cuadrática del error (MQ_E).

Un conjunto de $a-1$ amplitudes de mínima significancia deber ser obtenido, a través de:

$$R_p = r_\alpha(p, f) S_{\bar{y}_{it}} \quad (2.14)$$

Las diferencias observadas entre las medias son probadas, comenzando con la mayor versus la menor y luego entonces comparadas con R_a .

A seguir, una nueva diferencia entre las medias es calculada, comenzando con la próxima mayor versus la próxima menor, y entonces comparada con R_{a-1} . El proceso continua hasta el final. Si una diferencia observada fuera mayor que la correspondiente amplitud de mínima significancia, R_p , se concluye que el par de medias en cuestión es estadísticamente diferente.

Para evitar contradicción, ninguna diferencia entre un par de medias será considerada significativa, si esas dos medias involucradas estuvieran entre dos medias que no difieran significativamente.

El test de Duncan es muy efectivo en detectar diferencias entre medias, cuando diferencias reales existen. Esa es la razón por la cual el test referido es bastante popular.

2.10. Procedimiento para el análisis de la estructura metalográfica

Para este análisis las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma NC 10-56:86 y ASTM E3-95:

1. Selección de la muestra
2. Toma o corte de la muestra
3. Montaje y preparación de la muestra
4. Ataque de la muestra
5. Análisis microscópico
6. Obtención de las microfotografías

➤ Selección de las muestras

La selección de las muestras para realizar el análisis microestructural es de gran importancia, se debe garantizar una muestra representativa del material a examinar en el microscopio. Las muestras seleccionadas deben ser características del metal estudiado y servir para el fin a que se dirige tal estudio; por ejemplo, si se ha roto durante el servicio una pieza y el objeto del estudio metalográfico es determinar las

causas de la rotura, la muestra debe seleccionarse y obtenerse de aquella región particular de la fractura que pueda dar el máximo de información. Teniendo en cuenta lo anterior, las muestras serán seleccionadas de los rodillos, antes de la puesta en explotación.

➤ **Corte de las muestras**

Esta se debe realizar con sierra mecánica, cortadora de cinta con refrigeración para evitar el calentamiento que puede ocasionar alteraciones estructurales.

➤ **Montaje de las muestras**

El montaje de las muestras se hace en materiales plásticos sintéticos como bakelita, lucite, o acrílico isotérmico que después del moldeo son relativamente duros y resistentes a la corrosión y no causan embotamiento de los papeles abrasivos durante el desbaste y pulido.

El montaje consiste en comprimir un plástico fundido sobre la muestra metálica y dejar enfriar el sistema bajo presión hasta la solidificación del plástico, resina sintética o plastilina.

➤ **Desbaste de las muestras**

El desbaste de las muestras se efectúa sobre papeles abrasivos de diferentes granos, colocados sobre discos giratorios. Al pasar de un abrasivo a otro, debe girarse la muestra 90 grados y desbastar hasta que se borren por completo las huellas del abrasivo anterior, teniendo siempre el cuidado de lavar la muestra con agua abundante. Se aconseja pasar la muestra por toda la serie de abrasivos, es decir, papel de lijas con las siguientes granulometrías: 80, 100, 120, 150, 180, 220, 280, hasta 800, pues lo que la eliminación de algún abrasivo, retarda la operación en vez de acelerarla.

Conviene emplear un papel nuevo para cada probeta, los papeles usados se emplean para finalidades específicas porque sus partículas abrasivas desgastadas, tienden a producir distorsión del metal superficial. También debe tenerse en cuenta que la superficie opuesta de la probeta debe ser paralela para facilitar el soporte en el microscopio.

Al final del desbaste, deben lavarse con agua abundante tanto las probetas como las manos del operador para evitar que las partículas del abrasivo o del metal en la etapa del desbaste pasen a las pulidoras, lo cual los haría inservibles.

➤ **Pulido de las muestras**

El pulido de una muestra para su análisis metalográfico tiene por objetivo eliminar de su superficie las rayas finas producidas en la última operación de desbaste y conseguir una superficie sin rayas y con alto pulimento, Kehl y George (1985). Para este pulido se hace necesario el uso de una pulidora metalográfica, como fue caracterizada la misma anteriormente, en ella se utilizará un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo (Pasta GOI) para dejar la muestra con brillo tipo espejo.

➤ **Limpieza, lavado y secado de las muestras**

Las muestras para su posterior ataque químico se lavan con acetona para eliminar restos de grasa, polvo y pasta de pulir cuidando no frotar la superficie pulida. Posteriormente se limpian con etanol absoluto para eliminar cualquier vestigio de humedad, Kehl y George (1985).

➤ **Ataque químico de las muestras seleccionadas**

Inmediatamente después de la limpieza, se procede a realizar el ataque de las superficies a investigar. Las técnicas de ataque químico fueron empleadas en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMMM.

Las muestras se atacarán con ácido nítrico (HNO_3) y alcohol, 10 ml de ácido diluido en 100 ml de alcohol. (Según normas cubanas de ensayo de materiales. 04 – 61 / 1984). Después de atacadas, las superficies de las muestras se lavan con agua destilada y posteriormente en alcohol para, finalmente, secarlas en aire caliente.

➤ **Análisis microestructural por el método de examen microscópico**

Para este análisis se empleará un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100 ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa. Para colocar las muestras en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada. Las fotos se toman empleando distintas combinaciones del objeto y ocular para obtener las imágenes más precisas.

La observación de la superficie a analizar es necesario fotografiarla para procesar la información. La observación microscópica permite reconocer la presencia de inclusiones no metálicas como sulfuros, silicatos, aluminatos, óxidos, microporosidades, microgrietas, y grafito.

2.11. Análisis económico

Como plantea Omarov (1976), el análisis económico consiste en la forma más fundamental del control de la empresa y sus uniones, de la utilización de recursos materiales, laborales y financieros de las mismas.

Es por eso que se tendrán en cuenta los principales procedimientos que caracterizan el análisis económico en el trabajo de caracterización de las fallas de los rodillos para cumplir con el control de los recursos y los diferentes costos que puedan presentarse en este proceso. A través de esto, se pueden definir las diferentes expresiones que caracterizan este análisis económico:

2.11.1. Costo anual de materiales

Este costo se determinará de acuerdo con algunos parámetros relacionados con el mismo, en este caso se tendrán en cuenta la sustitución de rodillos que de una forma u otra se relacionan con este costo por materiales, teniendo en cuenta asimismo la frecuencia de rotura y el costo de cada rodillo, promediando una muestra de los últimos tres años y cinco meses.

$$Cam = Far \cdot Cur; CUC \quad (2.15)$$

Donde:

Far - Frecuencia anual de rotura de los rodillos.

Cur - Costo unitario de los rodillos, *CUC*.

2.11.2. Costo de la mano de obra

Para determinar el costo de la mano de obra se tendrá en cuenta el cambio o sustitución de los rodillos, además del salario unitario de cada trabajador que interviene en el proceso y el tiempo promedio para el desarrollo del mismo:

$$Cmo = Sut \cdot t_{empleado}; CUP \quad (2.16)$$

Donde:

Sut - Salario unitario total del obrero, CUP/h .

$t_{empleado}$ - Tiempo empleado en la mano de obra, h .

2.11.3. Costo de afectación a la producción por parada de equipos

Para determinar la cantidad de producción afectada, se utilizará la ecuación 2.17 y se tendrán en cuenta los siguientes fundamentos:

La capacidad del transportador y las horas que se deja de transportar el mineral debido a esta parada que se produce de acuerdo con la sustitución de rodillos fuera de servicio.

La cantidad de mineral laterítico que se necesita para la obtención de cierta cantidad de sínter níquel + cobalto.

El precio actual en el mercado mundial de una tonelada de níquel.

$$Cap = t_{parada} \cdot Cpa \cdot Pum; CUC \quad (2.17)$$

Donde:

t_{parada} - Tiempo de parada, h .

Cpa - Cantidad de producción afectada, tn/h .

Pum - Precio unitario del material, CUC .

2.12. Conclusiones del capítulo

- Se han fundamentado las propiedades a investigar a partir de la necesidad de determinar la dureza de los rodillos radiales del transportador Jacobi sometidos a cargas, para definir sus principales regularidades a través del empleo de métodos científicos de investigación.
- La realización de los ensayos planteados en este capítulo permitirá obtener información de la composición química y dureza, además posibilitarán el establecimiento del comportamiento microestructural del material una vez que este haya sido determinado.
- Se exponen criterios para el estimado de la implicación económica de la realización del trabajo de investigación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos a partir de los ensayos descritos en el capítulo anterior, así como los métodos empleados para la solución del problema planteado, del mismo modo se establece un conjunto de criterios que sustentan las teorías que garantizan la veracidad de la hipótesis planteada como resultado del análisis y el procesamiento de la información obtenida a través de la realización y observación de los ensayos. Se realiza además un análisis del comportamiento de la variación de la dureza superficial en las distintas etapas que transita el rodillo radial para lograr una mayor durabilidad de los rodillos, y una valoración económica de la caracterización de las fallas de los rodillos, así como el impacto medioambiental que se relaciona con el trabajo.

En este capítulo se plantea como **objetivo:**

Realizar una valoración crítica de los resultados y a través de ella, exponer los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.2 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 (σ) y un nivel de confianza del 95 %, se determina que:

$$n = \left(Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right)^2 = 3,84 \cong 4$$

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: Mayor representatividad, menor costo, mayor productividad para que el muestreo sea eficiente (Calero, 1976).

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 38 rodillos.

3.3. Análisis del comportamiento de la dureza superficial

Este análisis se realizó para 4 rodillos como muestra, donde se ejecutaron las mediciones de la dureza superficial antes y después de la explotación para determinar el comportamiento de estas variable, además del material con que se fabrican y de las probetas después del tratamiento térmico para comprobar si existe algún tipo de variación en las mismas.

3.3.1. Análisis del comportamiento de la dureza de los rodillos antes y después de la puesta en explotación

Como se planteó anteriormente, el análisis se realizó teniendo presente estas condiciones; donde se arribó a los siguientes resultados en las mediciones de esta variable antes de la explotación de los rodillos.

A continuación se muestran en las tablas 3.1 y 3.2 las mediciones realizadas para las 4 muestras tomadas de acuerdo con la dureza de los rodillos antes y después de la puesta en explotación; tomados como muestra para el comportamiento de la misma. Esta medición se efectuó a través del durómetro portátil modelo 316 caracterizado anteriormente en el capítulo 2, donde se determinó la misma, para los 4 rodillos nuevos listos para su montaje y a los 4 rodillos retirados.

Tabla 3.1. Dureza superficial de los rodillos antes de explotación.

Rodillos	Dureza Rockwell (HRC)
1	50
2	45
3	50
4	45

Tabla 3.2. Dureza superficial de los rodillos después de explotación.

Rodillos	Dureza Rockwell (HRC)
1	45
2	40
3	45
4	40

Como se muestra en las tablas anteriores los valores correspondientes pertenecen a la dureza de los rodillos antes y después de su explotación. Para este análisis se aplicarán las expresiones 2.2 hasta 2.5 expuestas en el capítulo anterior, las mismas establecen los límites de control de la variable con que se trabaja.

A continuación se muestra en la figuras 3.1 y 3.2 el diagrama de control para las mediciones de la dureza de los rodillos antes de su explotación.

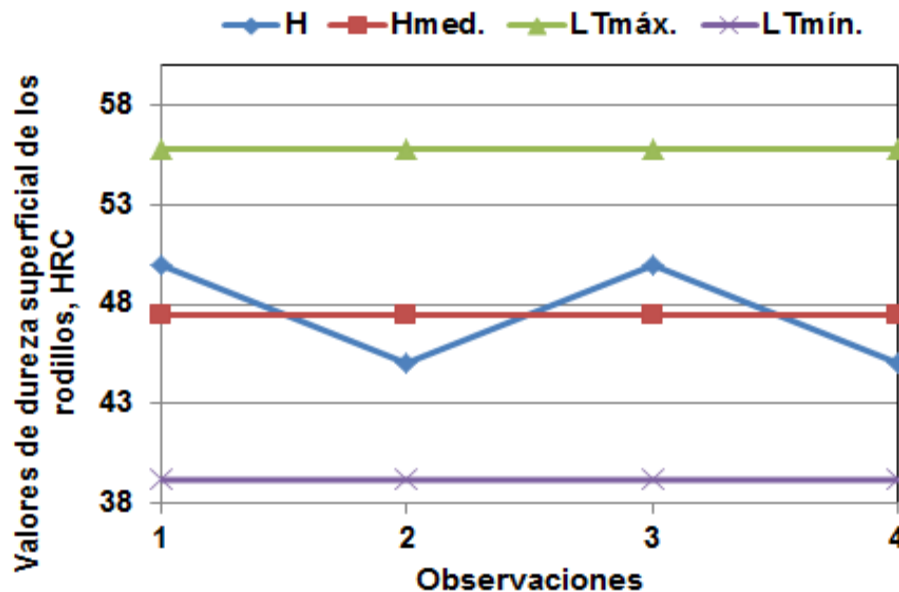


Figura 3.1. Diagrama de control de la dureza superficial de los rodillos antes de explotación.

La observación de la figura 3.1 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 39,19 HRC y el límite máximo de 55,81 HRC, para un nivel de confianza del 95 % ($t_{0,025} = 3,182$ con $\nu = n - 1 = 4 - 1 = 3$ 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 la pieza, 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.

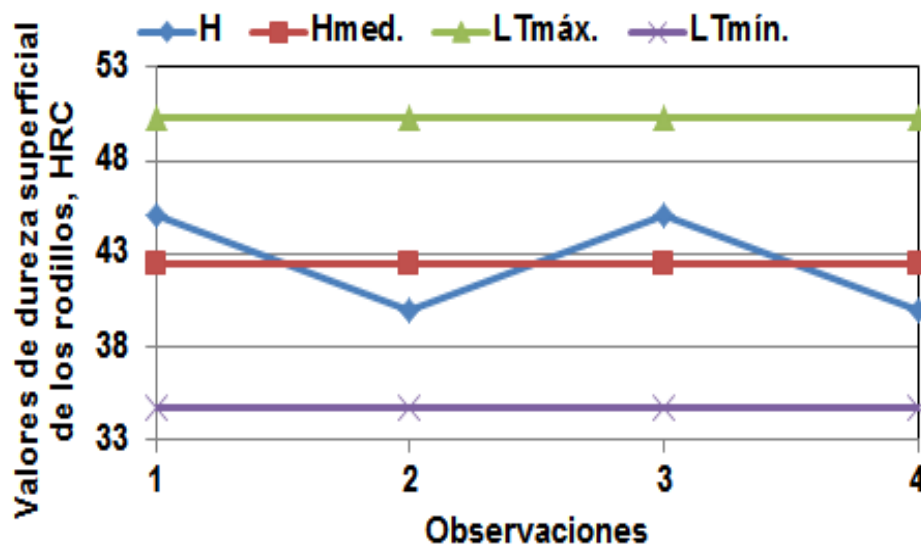


Figura 3.2. Diagrama de control de la dureza de los rodillos después de explotación.

La figura anterior 3.2 indica que las mediciones están bajo control estadístico; la variable muestra un comportamiento normal. Estos valores están limitados por el nivel de confianza utilizado, el cual fue de un 95%. Los límites de tolerancia para la dureza de los rodillos son: límite mínimo de 34,67 HRC y el límite máximo de 50,33 HRC; para un nivel de confianza del 95% ($t_{0,025} = 3,182$ con $\nu = n - 1 = 4 - 1 = 3$ grados de libertad) y un valor promedio para la dureza de 42,5 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 42,5 HRC, pues este valor está comprendido dentro del rango de tolerancia.

3.3.2. Análisis del comportamiento de la dureza de las probetas antes y después del tratamiento térmico

A continuación se ilustran en las tablas 3.3 y 3.4 las mediciones obtenidas en la determinación de la dureza de las probetas antes y después del tratamiento térmico tomadas como muestra para el comportamiento de la misma. Esta medición se efectuó a través del durómetro modelo Digimess DP 300 caracterizado anteriormente en el capítulo 2, donde se determinó la misma para las muestras seleccionadas

Tabla 3.3. Dureza superficial del material de suministro para las probetas.

Material de suministro	Dureza Brinell (HB)	Dureza Rockwell (HRC)
1	125	1
2	125	1
3	125	1
4	125	1

Tabla 3.4. Dureza superficial de las probetas después del tratamiento térmico.

Probetas con tratamiento térmico	Dureza Rockwell (HRC)
1	47
2	43
3	46
4	41

Como se muestra en las tablas anteriores, los valores correspondientes pertenecen a la dureza de las probetas antes y después del tratamiento térmico. Para este análisis se aplicarán las expresiones 2.2 hasta 2.5 expuestas en el capítulo anterior, las mismas establecen los límites de control de la variable con que se trabaja.

A continuación se muestra en la figuras 3.3 y 3.4 el diagrama de control para las mediciones de la dureza de las probetas antes y después del tratamiento térmico.

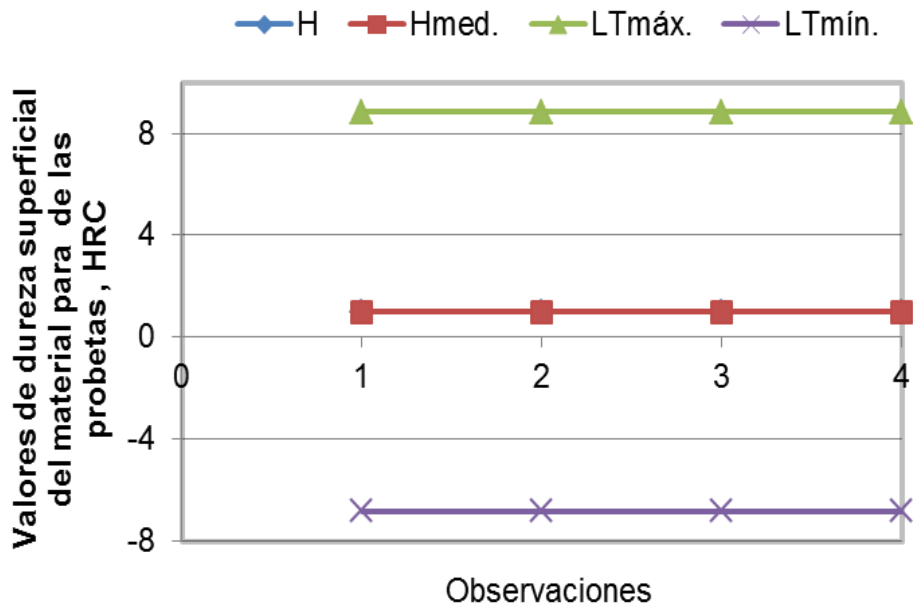


Figura 3.3. Diagrama de control de la dureza del material de suministro para las probetas.

La figura anterior 3.3 indica que las mediciones están bajo control estadístico; la variable muestra un comportamiento normal. Estos valores están limitados por el nivel de confianza utilizado, el cual fue de un 95%. Los límites de tolerancia para la dureza del material de suministro para las probetas son: límite mínimo de - 6,83 HRC y el límite máximo de 8,83 HRC; para un nivel de confianza del 95% ($t_{0,025} = 3,182$ con $\nu = n - 1 = 4 - 1 = 3$ grados de libertad) y un valor promedio para la dureza de 1 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 del material de suministro para las probetas es de 1 HRC, pues este valor está comprendido dentro del rango de toleran

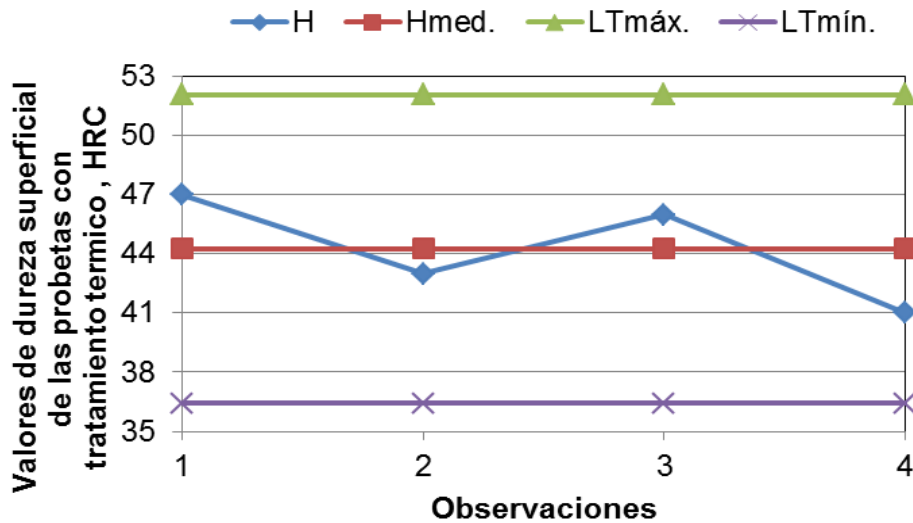


Figura 3.4. Diagrama de control de la dureza de las probetas con tratamiento térmico.

La observación de la figura 3.4 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 las probetas con tratamiento térmico son: límite mínimo de 36,42 HRC y el límite máximo de 52,08 HRC, para un nivel de confianza del 95 % ($t_{0,025} = 3,182$ con $\nu = n - 1 = 4 - 1 = 3$ grados de libertad) y un valor promedio para la dureza de 44,25 HRC. Esto significa que cada observación que se realice respecto a la dureza de la pieza, 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 42.25 HRC, pues este valor está comprendido dentro del rango determinado.

3.4. Análisis de la variación de la dureza superficial

Este análisis se realizó según las ecuaciones 2.6 y 2.7 expuestas más arriba para caracterizar las variaciones en la variable estudiada, se infiere el valor de la dureza de los rodillos; y de las probetas obteniéndose los resultados que se muestran en las tablas 3.5 y 3.6.

Tabla 3.5 Variación de la dureza superficial de los rodillos.

Ecuación	Parámetros	Valores	U/M
2.6	Variación absoluta de la dureza	-5,0	HRC
2.7	Variación relativa de la dureza	10,5	%

La tabla 3.5 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 10,5 %. 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 llantas y los rodillos, que provoca un efecto contrario al de la presión que genera la aparición de la acritud en el material.

Tabla 3.6. Variación de la dureza superficial de las probetas.

Ecuación	Parámetros	Valores	U/M
2.6	Variación absoluta de la dureza	43,25	HRC
2.7	Variación relativa de la dureza	97,7	%

La tabla 3.6 refiere los valores de las variaciones absolutas y relativas de la dureza superficial de las probetas. Por lo que se plantea que existe una variación respecto a la dureza de un 97,7 %. El aumento de la dureza de las probetas puede atribuirse a la influencia de la temperatura de calentamiento y el régimen de enfriamiento del tratamiento térmico temple – revenido aplicado a las probetas, que provoca un efecto de endurecimiento del material significativo en comparación con el material de suministro.

3.5. Análisis de las causas raíz

En la figura 3.5 se muestra el gráfico que indica el comportamiento de las variaciones de la dureza superficial de los rodillos radiales y de las probetas observadas durante las mediciones realizadas; es decir, se revela el comportamiento de la variable en función del orden en que se realizó las mediciones.

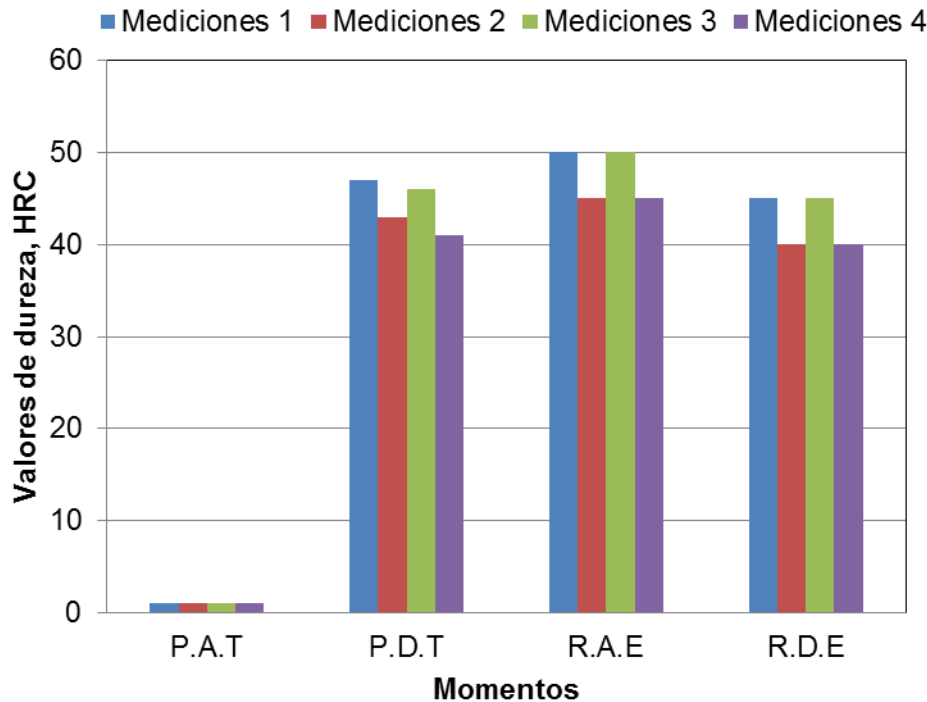


Figura 3.5. Comportamiento de las variaciones de la dureza superficial.

Donde:

P.A.T- Probetas antes del tratamieto térmico.

P.D.T- Probetas despues del tratameito térmico.

R.A.E- Rodillos antes de la puesta en explotación.

R.D.E- Rodillos despues de la puesta en explotación.

Figura 3.5. Gráfico del comportamiento de la dureza superficial.

En la figura 3.5 se muestra que la dureza superficial de los rodillos obtenidas por medición mostró fluctuaciones durante el proceso, con tendencia a disminuir su valor, la dureza superficial minima obtenido fue de 40 HRC y el máximo fue de 50 HRC; sin

embargo se observa que las probetas aumentan después del tratamiento térmico y se determina una dureza mínima de 1 HRC y el máximo de 47 HRC.

La tabla 3.7 que se muestra a continuación, refiere un conjunto de cantidades que fueron determinadas para caracterizar al comportamiento de la dureza superficial de los rodillos.

Tabla 3.7. Resultados de los rangos de variación.

Parámetros	Valores, HRC
Rango para la dureza, por diseño	40 a 46
Límites de tolerancias, por mediciones de los rodillos antes de explotación	39,19 a 55,81
Límites de tolerancias, por mediciones de los rodillos después de explotación	34,67 a 50,33
Límites de tolerancias, por mediciones de las probetas antes del tratamiento térmico	-6,83 a 8,83
Límites de tolerancias, por mediciones de las probetas después del tratamiento térmico	36,42 a 52,08

Para caracterizar la variabilidad de la dureza superficial, se lleva a cabo un intercambio de ideas con diferentes funcionarios que laboran en las UEBs: técnico de mantenimiento, mecánicos, operarios, jefe de mantenimiento entre otros. Los mismos presentaron como principales causas que provocan dicha variabilidad las siguientes: para el caso de los rodillos la alineación de los equipos de laboreo (transportadores), la carga a la que están sometidos los rodillos, las altas condiciones ambientales corrosivas, las fallas de los rodamientos en casos particulares, y esencialmente, el desgaste que se produce actualmente en estos elementos; y para el caso de las probetas al aplicarles el temple a temperatura de calentamiento de 830 °C a 840 °C por un tiempo determinado para formar la austenita y después de enfriarse en agua la dureza aumenta debido a la formación de martensita creando grandes tensiones internas en el metal que se eliminan con el revenido recalentando este acero hasta una temperatura menor.

Resumiendo, las posibles causas potenciales que provocan la variación de la dureza son:

1. Régimen de trabajo al que están expuestos los rodillos,
2. Recursos humanos vinculados al proceso de explotación y fabricación de los rodillos,
3. Recursos materiales que entran en contacto con los rodillos y
4. Características de los rodillos y las probetas.

Dentro de las causas potenciales mencionadas anteriormente se pueden encontrar los siguientes factores, como se refieren a continuación: el régimen de trabajo al que están expuestos los rodillos caracterizado por la fuerza que soportan, la velocidad de rotación, el tiempo de explotación, la temperatura de trabajo, y los niveles de vibración; los recursos humanos vinculados al proceso dado por el técnico de mantenimiento, supervisores y mecánicos; los recursos materiales definidos por las llantas que entran en contacto con los rodillos y el líquido refrigerante que se le aplica a los rodillos. Por otra parte, las características de los rodillos la determina el acabado superficial, la dureza de esto, los rodamientos que poseen interiormente y las empaquetaduras o sellaje.

Sobre la base de la identificación de los factores potenciales se procede a la elaboración del diagrama causas - efecto que establece la relación entre los factores mencionados, como se muestra a continuación en la figura 3.6

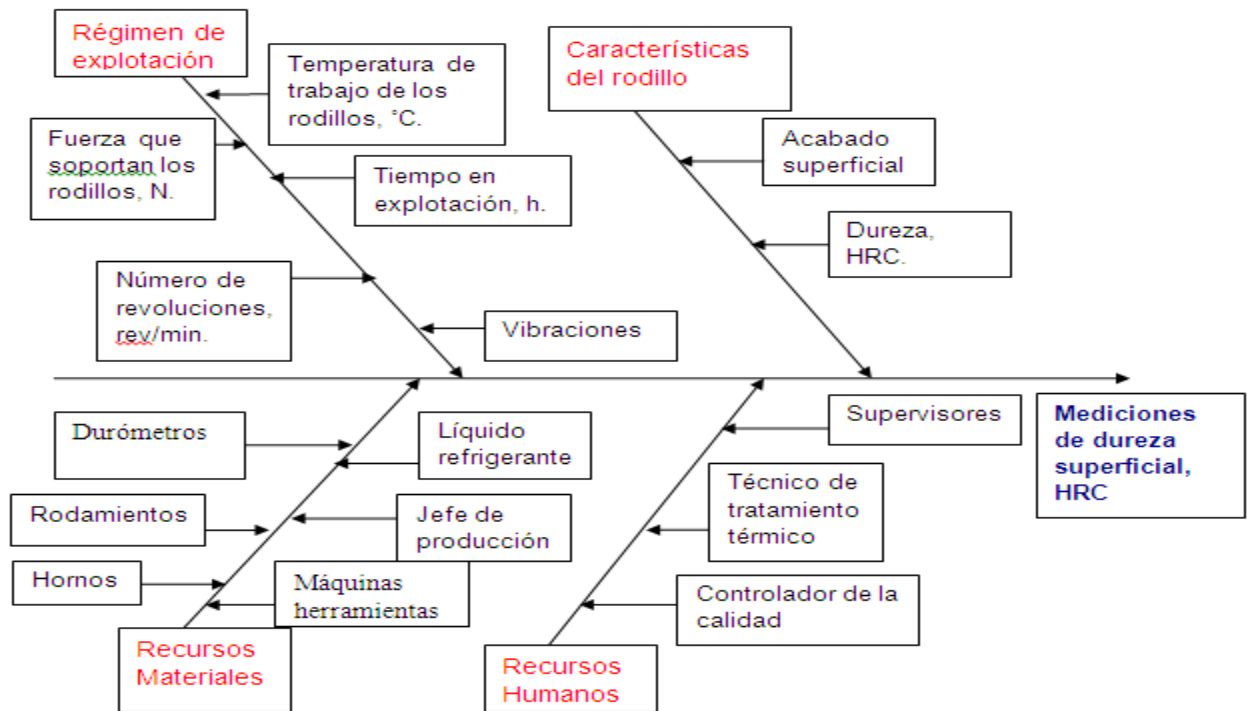


Figura 3.6. Diagrama de causa efecto relativo a la variación de la dureza superficial de los rodillos radiales.

El gráfico de la figura 3.6 muestra una síntesis panorámica de los factores sobre lo que se puede incidir para provocar cambio en el comportamiento de la dureza superficial de los rodillos radiales. Esto puede ser de gran utilidad puesto que se pueden orientar mejor las labores de planificación, control de la calidad y mejoramiento de la calidad (Trilogía de Jurán). Esto se puede armonizar utilizando estrategias de diseño estadístico experimental, considerando las técnicas del análisis de varianza y los ajustes de curva, como complemento al muestreo.

3.6. 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 4 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 tablas 3.1 a la 3.4 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 3.6 y 3.7 se muestran los resultados obtenidos a partir del cálculo para el desarrollo de la prueba de Fischer, utilizando las ecuaciones desde la 2.8 a la 2.11.

Tabla 3.7. Resultados del cálculo de F para la probeta con tratamiento térmico y los rodillos listos para su explotación.

Análisis de variancia						
Origen de las variaciones	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Proba.	Valor Crítico para F
Tratamientos	1	204,17	21,13	2,65	0,1543	5,98
Error	6	47,75	7,96			
Total	7	281,92				

Tabla 3.8. Resultados del cálculo de F para los rodillos antes y después de la puesta en explotación.

Análisis de variancia						
Origen de las variaciones	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Proba.	Valor Crítico para F
Tratamientos	1	50	50	6	0,0498	5,98
Error	6	50	8,33			
Total	7	100				

A partir de los resultados mostrados en la tabla anterior 3.7 y 3.8 se infiere la siguiente decisión:

- Puesto que el valor de Fischer calculado es menor que el valor de Fischer crítico ($2,65 < 5,98$) la hipótesis nula se acepta, en otras palabras no existe diferencias significativas entre la dureza que poseen los rodillos del transportador Jacobi antes de la puesta en explotación y las probetas con tratamiento térmico al nivel de confianza del 95 %.
- Puesto que el valor de Fischer calculado es menor que el valor de Fischer crítico ($6 > 5,98$) la hipótesis nula se rechaza, en otras palabras existe diferencias significativas entre la dureza que poseen los rodillos del transportador Jacobi antes y después de la puesta en explotación al nivel de confianza del 95 %.

3.6.1. Análisis de la prueba de Duncan

La prueba de Duncan se efectúa considerando las expresiones 2.12 a la 2.14 expuesta en el capítulo anterior. La misma se aplica para comparar los resultados obtenidos en la prueba de Fisher; se compara la dureza de los rodillos antes y después de la puesta en explotación y la dureza de las probetas después del tratamiento térmico y la de los rodillos nuevos. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Resultados de la prueba de Duncan.

Comparaciones múltiples	Rango de mínima significancia (Rp)	Diferencias
Dureza de los rodillos antes y después de la explotación.	4,44	5
Dureza de la probetas después del tratamiento térmico y la de los rodillos nuevos.	4,44	3,25

Los resultados indicados en la tabla anterior permiten inferir lo que se plantea a continuación:

- Existe diferencia significativa entre la dureza superficial de los rodillos antes y después de la explotación, puesto que el rango de mínima significancia (Rp) es menor que las diferencias entre las medias de los valores de dureza considerados ($4,44 < 5$);
- mientras que la dureza de la probetas después del tratamiento térmico y la de los rodillos nuevos no mostró diferencias significativas, ya que el rango de mínima significancia (Rp) es mayor que la diferencias entre las medias consideradas ($4,44 > 3,25$).

De lo anteriormente planteado se infiera que existe coincidencia entre los resultados obtenidos por la prueba de Fischer y la de Duncan, al nivel de confianza del 95 %.

3.7. Análisis de la estructura metalográfica

Después de pulidas adecuadamente 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 de ocular y objeto hasta encontrar la adecuada. Las observaciones realizadas en el microscópico fueron a 200 X y 400 X, para las muestras de las probetas antes del tratamiento térmico y los rodillos viejos 200 X y para las probetas con tratamiento térmico 400 X.

En las figuras 3.7 (a), (b) y (c) se observa el comportamiento de la estructura en relación a la etapa considerada en el análisis de la dureza superficial de los rodillos.

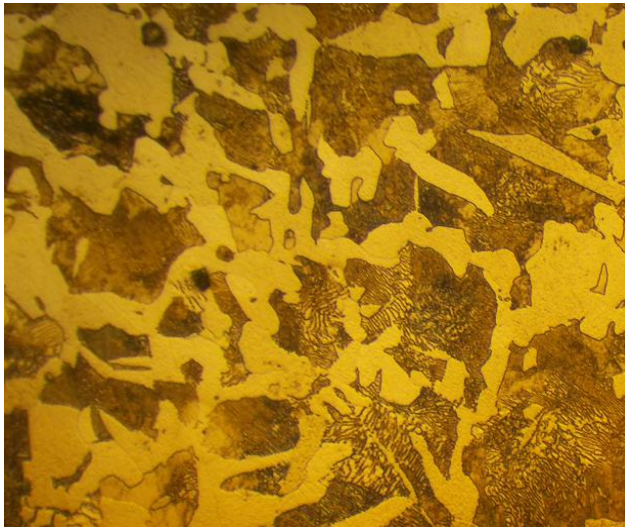


Figura 3.7(a). Muestras sin tratamiento térmico.



Figura 3.7 (b). Muestras con tratamiento térmico.



Figura 3.7 (c). Muestras de rodillos retirados.

El análisis de las estructuras metalográficas obtenidas permite arribar a las siguientes observaciones:

1. La microestructuras de las probetas que se someten a tratamiento térmico muestra granos de menor diámetro en relación con la probeta que no poseen tratamiento térmico y granos de mayor diámetro en relación con las probetas de los rodillos retirados.
2. La microestructura de la probeta sin tratamiento térmico refiere la presencia de ferrita más perlita, lo que indica que se corresponde con la característica del acero AISI 1045 laminado; la referida a probetas con tratamiento térmico indican una estructura martensítica con presencia de carburo alrededor de los granos y la estructura correspondiente a las probetas de rodillos retirados no muestra presencia de martensita, sino de "ferrita + perlita".
3. En la micrografías según la norma GOST 5639 – 65, en la muestra del material con tratamiento térmico los granos presentes son pequeño con un tamaño 7, donde se pudo presenciar que en 1 mm^2 se orienta aproximadamente un total de 1000 granos con un diámetro medio de $31,5 \mu\text{m}$, en las probeta con tratamiento sin térmico los granos tienen un tamaño 5, y se pudo presenciar que en un 1 mm^2 se orienta aproximadamente un total de 250 granos con un diámetro medio de $63 \mu\text{m}$ y en la muestra de los rodillos retirados el tamaño del grano es 6 con 500 granos por 1 mm^2 y un diámetro medio de $45 \mu\text{m}$. El diámetro medio de los granos de las probetas correspondiente a los rodillos retirado disminuye en un 29 % con relación a los de las probetas de rodillos nuevos.

De los resultados obtenidos productos a los ensayo de dureza y de metalografía se determina que el aumento de la dureza de las probetas que se tratan térmicamente se puede relacionar con la disminución del diámetro medio de los granos y la formación de martensita. La disminución de la dureza de los rodillos durante el periodo de explotación se puede explicar por medio del disminución del diámetro medio de los granos y la ausencia de martensita.

3.10. Valoración económica

Para el análisis económico del trabajo de caracterización de las fallas de los rodillos se tuvieron en cuenta algunos factores económicos que influyen en los diferentes costos o gastos que le incurren a la planta a la hora del proceso de explotación de los rodillos. A continuación se muestran los resultados de los mismos en la tabla 3.10 según las ecuaciones planteadas en el epígrafe 2.10 del capítulo anterior:

Tabla 3.9. Valoración económica

Ecuación	Indicadores	Valores	U/M
2.15	Costo anual de materiales	131825,8	CUC
2.16	Costo de la mano de obra	3796,8	CUP
2.17	Costo de afectación a la producción	2580877,4	CUC

Estos resultados se obtuvieron de acuerdo con las ecuaciones caracterizadas; es decir, para la obtención del resultado de la ecuación 2.15 se tuvo presente el costo unitario de un rodillo de 1 220,61 CUC y la frecuencia de rotura de los rodillos de 9 rodillos por mes, por lo que equivale a 108 rodillos anuales. En la caracterización de la ecuación 2.16 para arribar a este resultado se tuvo presente el salario unitario total de los obreros (7 obreros mecánicos) encargados de la atención del sistema de trabajo de los rodillos que es de 158,2CUP/h en total y el tiempo empleado de 8 horas por cada obrero mecánico. Seguidamente en la ecuación 2.17 se arribó al resultado obtenido teniendo presente el tiempo de parada de los equipos por sustitución de los rodillos que es de aproximadamente 8 horas, la cantidad de producción afectada por parada de los equipos de 272 toneladas, y el precio unitario del mineral de 9 488,52 CUC/tn.

Se debe señalar que lo anteriormente expresado se hace a manera de mostrar una referencia sobre la implicación económica ocasionada por la salida de servicio de los rodillos, pero en estos análisis no están incluidos los costos por concepto de todo el trabajo experimental realizado. La valoración económica incluye todos los gastos en lo que se incurre, alguno de los cuales son difíciles de cuantificar.

Cabe indicar, que teniendo en cuenta los costos por materiales, por la mano de obra, y por la afectación a la producción, se producen debido a las fallas presentes en los rodillos y su debida sustitución, por lo que estos traen como afectación a la planta, un gasto de 2 716 500,08 CUC anuales.

3.11. Impacto ambiental

La instalación donde se encuentra el objeto de estudio actualmente tiene una incidencia peligrosa en relación con el impacto ambiental asociado al planeta y al ser humano. Las averías presentes en los rodillos radiales de apoyo en el transportador sinfín afectan la continuidad del transportador y la entrada del mineral a los enfriadores; esto genera escape de gases y polvo, trae consigo la contaminación de la planta, sus alrededores y al ser humano presente (trabajadores), así como el sonido del mal funcionamiento emitido por estos rodillos. Estos rodillos una vez deteriorados son echados a un lado de la planta para materias primas. Es por eso que nuevamente se fabrican más de estos para la sustitución de los retirados por causa de desgaste, fallas de rodamientos, entre otros problemas. Lo anterior perjudica también el medio ambiente por el insuficiente uso de los recursos de que el hombre dispone, pues es necesaria la obtención de mayor cantidad de material para enfrentar la necesidad de construcción de nuevos rodillos. La ineficiencia por desgastarse o averiarse estos rodillos, ocasionan afectaciones al transportador ya que el mismo puede derramar parte del mineral reducido en el piso de la planta afectando el entorno ambiental.

No solo existe incidencia del impacto ambiental en la instalación objeto de estudio sino también en el proceso de maquinado para la fabricación de los rodillos en la empresa Mecánica del Níquel, la cual para su fabricación puede ejecutar los procesos de fundición, maquinado y ensamble de los rodillos. En el proceso de maquinado que es el que generalmente se utiliza para la fabricación de estos elementos se produce una gran cantidad de desprendimiento de desechos sólidos que al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema.

3.12. Conclusiones del capítulo

- Se calculó el tamaño de la muestra mínimo requerido para asegurar la representatividad en los resultados, lo cual indica que el tamaño requerido es de 4 unidades, según las especificaciones de precisión y exactitud definida.
- El comportamiento de la variación superficial de los rodillos antes y después de la puesta en explotación muestra que el promedio antes de la explotación es de 47,5 HRC, mientras que después de la explotación son de 42,5 HRC respectivamente. Se infiere que la dureza disminuye significativamente en un 10,5 %.
- El análisis del comportamiento de la variación de la dureza superficial de los rodillos del transportador Jacobi permite plantear que las variaciones observadas se deben a posibles influencias de los recursos humanos, los recursos materiales, el régimen de explotación y las características de los rodillos.
- Se analizó el comportamiento de la estructura metalográfica del material de los rodillos, en tal sentido se utilizaron probetas sin y con tratamiento térmico y probetas de los rodillos después de su puesta en explotación, lo que permitió determinar relación entre la variación de la dureza y el comportamiento de la estructura metalográfica.
- La valoración de la incidencia económica y ambiental del trabajo realizado permite revelar que el costo total en el que se incurre por retirar 9 rodillos al mes es de 2 716 500,08 CUC anual y que los efectos ambientales producidos en la planta de Horno de reducción, y en el taller de maquinado donde se fabrican los rodillos se expresan en contaminación sónica, derrame de desechos sólidos, emisión de gases y polvos a la atmósfera y mayor consumo de material.

CONCLUSIONES GENERALES

- Las bibliografías consultadas, ofrecen información en cuanto a la calidad que se debe lograr en la producción de los rodillos radiales de apoyo del transportador de tornillo sinfín (Jacobi); referente a los materiales empleados en la fabricación de los rodillos, la deficiencia en la tecnología de maquinado, y carencia de tratamiento adecuado del material.
- Se han fundamentado las propiedades a investigar a partir de las necesidades de la dureza de los rodillos radiales del transportador Jacobi sometidos a cargas, para definir sus principales regularidades a través del empleo de métodos científicos de investigación.
- El análisis del comportamiento de la variación superficial de los rodillos del transportador de Jacobi permite plantear que las variaciones observadas muestran un comportamiento normal al nivel de confianza del 95 %, y que los factores sistemáticos potenciales de posibles influencias son los recursos humanos, los recursos materiales, el régimen de explotación y las características de los rodillos.
- El comportamiento de la variación superficial de los rodillos antes y después de la puesta en explotación muestra que el promedio antes de la explotación es de 47,5 HRC, mientras que después de la explotación son de 42,5 HRC respectivamente. Se infiere que la dureza disminuye significativamente en un 10,5 %. Además se analizó la estructura metalográfica del material de los rodillos en las distintas etapas, lo que indico que la disminución de la dureza de los rodillos durante la puesta en explotación se expresa en un cambio de la estructura metalográfica.
- La valoración de la incidencia económica y ambiental del trabajo realizado permite revelar que el costo total en el que se incurre por retirar 9 rodillos al mes es de 2 716 500,08 CUC anual y que los efectos ambientales producidos en la planta de Horno de reducción, y en el taller de maquinado donde se fabrican los rodillos se expresan en contaminación sónica, derrame de desechos sólidos, emisión de gases y polvos a la atmósfera y mayor consumo de material.



RECOMENDACIONES

1. Realizar estrategias de diseño experimental para determinar las regularidades que se establecen entre los factores que influyen en la variación de la dureza superficial de rodillos.
2. Utilizar la escala de dureza Rockwell B para poder realizar las mediciones de dureza con instrumentos de mayor precisión.
3. Realizar difractocopias por rayos X y microcopia electrónica de las muestras obtenidas, para explicar la variación que se produce en la dureza.
4. Evaluar la posibilidad de introducir modificaciones en el material de los rodillos, considerando la variante de reajustar la composición química a experimentar con otro material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alcántara et al. Influencia del desgaste abrasivo en los pasadores de esteras de los tractores KOMATSU D85P-21. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2008.
2. Alcántara, D., Comportamiento del desgaste en pasadores de equipos de laboreo minero fabricado de acero AISI 1045. Trabajo de Diploma en opción al título de Máster en electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2012.
3. 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.
4. 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.
5. Álvarez, F. Caracterización del desgaste por fatiga. Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2006.
6. Barboza; H.D., Incremento de la resistencia a la torsión del acero AISI 1045 mediante tratamiento térmico de Temple – Revenido. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Universidad Nacional de Trujillo, Perú. Facultad de Ingeniería. 2012.
7. Barceinas, S y Juárez, H. Propiedades, Fortalecimiento y comportamiento de los Materiales, Capítulo IV, 2001.
8. Belozarov, V; Makhatilova, A.; Subbotina, V. Cyclic strength of parts with overlapping zones formed by roller burnishing. Strength of Materials. Translated from Problem Prochnosti, 38 (3) 144 – 148, 2006
9. Callister, W. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Departament of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7.

10. Caraballo, M. Endurecimiento mediante explosivos del acero Hadfield. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMMM, 2004a.
11. Clauser, H. R. Diccionario de materiales y procesos de ingeniería. Editorial Labor S.A. Barcelona, 1985.
12. Escanaverino, J. M. Teoría y práctica del rozamiento. La Habana, 1986.
13. Fernández, Rodríguez, Alcántara, Guilarte. Variación microestructural del acero AISI 1045 endurecido por rodadura, 2010. Revista Minería y Geología. Disponible en <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/>.
14. Fernández, T., Mecanismo de endurecimiento del acero AISI 1045 deformado por rodadura. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM. 2011.
15. Hernández, F. Metrología dimensional, 1986.
16. Jaramillo H.E., Suárez M. Análisis de falla del eje de un reductor de velocidad. 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Universidad Autónoma de Occidente, Facultad de ingeniería, Colombia. 2007.
17. Jurán, J. M. y Gryna, Frank: Manual de control de la calidad, Vol.1, 4ta. Ed., McGraw Hill, Madrid, 1993.
18. Kehl, George; Fundamentos de la práctica metalográfica, 1985.
19. Korotcishe. L. Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura. Mir. Moscú. 1989. Pág. 53-64.
20. Leyva, B; Fernández., T; Rodríguez., I; Alcántara., D y Oliveros, Y. comportamiento de la tolerancia dimensional en piezas cilíndricas de acero AISI 1045 durante la deformación plástica superficial con rodillo simple. VI conferencia internacional de aprovechamiento de recursos minerales. CINAREM 2011. Noviembre 2011
21. Leyva, Y., Verificación de la rugosidad superficial obtenida en la fabricación de los rodillos del transportador de Jacobi. Trabajo de Diploma en opción al título de Máster en electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2013.

22. 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.
23. Luffe, A. Modificación del hierro con grafito esferoidal en el molde. *Liteinoe proistbostba*. 6 (12) 5 – 6, 1994.
24. Mallo, M., Manual teórico práctico del mecánico forjador, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Cuba. Pág 93-121 y 145-152.
25. 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.
26. Miller R., John E. Freun, Richard Johnson., *Probabilidad y Estadística Para Ingeniero*. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba 2005.
27. 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.
28. Montgomery, D., *Diseño y análisis de experimentos*. Editorial Félix Varela. La Habana. 2004. 585 p.
29. 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.
30. Odintsov, L.G. Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial", Editorial CM, 1987. Pág 385-422, URSS.
31. Oliveros, E., Desgaste de los rodillos radiales de los transportadores sinfines para mineral laterítico. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2011.
32. Omarov A, M. *Análisis económico de la actividad de la empresa*, 1976.
33. Pero-Sanz, J.A. "Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades", Editorial DUSSAT SA, 3ra Edición. España. (2000). pp. 393-502.
34. Pickering, F.B. *Proceedings of High Manganese Steel, ASTM A 128 AB*. Edited by Foct and A. Hendry, Institute of Metals. 1996. 34 p.

35. Prieto, R., Comportamiento de la variación del diámetro y la dureza de los rodillos del transportador Jacobi. Trabajo de Diploma en opción al título de Máster en electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2013.
36. Rodríguez, A., Solidificación en piezas fundidas de acero de medio contenido de carbono del tipo 55 Г. Trabajo de Diploma en opción al título de Máster en electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2008.
37. Rodríguez, H., Manual de trabajo, Práctica de Dibujo Aplicado, Editorial Pueblo y Educación. 1986.
38. Ruíz, F., Diagnóstico de la calidad y estrategia de solución del Servicio de Reparación y Mantenimiento Constructivo en la TSA. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero industrial. Universidad de Holguín, Cuba. Facultad de Ingeniería Industrial (2007).
39. Skalki, K; Ronda, J. Application of contact mechanics to modelling of burnishing process. International Journal of Mechanical Sciences. 37 (5) 461 – 472, 1988.
40. 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.
41. Sugino Corporation, "Superroll – Rollerburnis hing tool", USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2005. <http://www.suginocorp.com>.
42. Verdeja, L, González, R. El desgaste de materiales en el crisol de horno alto: conceptos generales. Revista de minas. Madrid: No 13 -14, 1996.
43. 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.
44. Walpole, R, et al., Probabilidad y Estadística Para Ingeniero. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba 2008.

