



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
" DR. ANTONIO NUÑEZ JIMÉNEZ "
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE LOS RODILLOS
RADIALES DEL TRANSPORTADOR DE JACOBI.

Autor: Aynel Pérez Bourricaudy

Tutor(es): MSc. Benigno Leyva de la Cruz

Curso 2014-2015

"Año 57 de la Revolución"



Declaración de autoría:

Yo: Aynel Pérez Bourricaudy

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 el propósito que estime conveniente.

.....
Autor. Aynel Pérez Bourricaudy. Tutor: MsC. Benigno Leyva De la Cruz.



Pensamiento

“La revolución no se lleva en los labios para vivir de ella, se lleva en el corazón para morir por ella.”

Ernesto Che Guevara



AGRADECIMIENTOS

Ser agradecido es uno de los principales valores que debe tener un ser humano, 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 período 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 transmitirme su sabiduría y experiencia de trabajo para llevar a cabo la realización de este trabajo y por estar siempre dispuesto a brindarme su ayuda cuando la necesitaba.
- A la Revolución Cubana por haberme permitido formarme y convertirme en un profesional dispuesto a servirle mejor, algo que no hubiera sido posible sin la posibilidad de estudiar en un centro tan prestigioso como este.
- A todos aquellos que de una forma u otra aportaron su granito de arena. A todos los profesores del departamento de mecánica con los que tuve el placer de compartir y que contribuyeron a mi formación como profesional en estos cinco años. A mis compañeros de aula de los cuales me llevo el recuerdo imborrable de todos los momentos que pasamos y su amistad eterna.

**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.



RESUMEN

En este trabajo se realizó una investigación sobre las afectaciones que se producen debido al desgaste de los rodillos radiales del transportador de Jacobi de la empresa productora del níquel “Comandante Ernesto Che Guevara”. El objetivo propuesto consistió en caracterizar el desgaste indicando la significación que representa y estableciendo su relación con la dureza superficial. Para el cumplimiento del propósito se realizó una revisión bibliográfica, caracterización de los rodillos y del micrómetro de exteriores utilizado, muestreo, análisis de causa efecto, diseño de experimento, verificación de la normalidad, análisis de variancia, prueba de Duncan, estimación bayesiana, cálculo del desgaste en la dirección diametral, ajuste de curva, valoración económica y consideraciones sobre las afectaciones ambientales. La revisión bibliográfica y sistematización del contenido permitió determinar que se han tratado de fabricar rodillos con calidad para el transportador de Jacobi, pero es insuficiente la caracterización del desgaste en relación con los factores de los que depende y las especificaciones de referencia para controlarlo. Se determinó que en los rodillos se están presentando un nivel de desgaste significativo al nivel de confianza del 95 %, el cual oscila en el rango de 1,575 mm a 1,89 mm, siendo mucho mayor que el admitido por norma (0,01mm). Se calculó un modelo matemático que establece la relación entre la dureza superficial y el comportamiento del diámetro de los rodillos para el período de explotación analizado, el cual refiere que la dureza de los rodillos disminuye a medida que se incrementa el desgaste (disminución del diámetro).



Abstract

In this work was carried out an investigation on the affectations that take place due to the waste of the radial rollers of the transporter of Jacobi of the company producer of the nickel "Major Ernesto Che Guevara". The objective that is proposed consists on characterizing the waste indicating the significance that represents and establishing its relationship with the superficial hardness. For the execution of the purpose was carried out a bibliographical revision, characterization of the rollers and of the used micrometer of exterior, sampling, analysis of cause effect, experiment design, verification and the normality, variance analysis, test of Duncan, estimate bayesiana, calculation of the waste in the diametrical address, adjust of curve, economic valuation and considerations on the environmental affectations. The bibliographical revision and systematizing of the content allowed to determine that they have been to manufacture rollers with quality for the Jacobi transporter, but it is insufficient the characterization of the waste in connection with the factors of those that it depends and the reference specifications to control it. It was determined that in the rollers they are presenting a level of significant waste to the confidence level of 95 %, which oscillates in the range of 1,575 mm to 1,89 mm, being much bigger that the admitted one for norm (0,01mm). A mathematical model was calculated that establishes the relationship between the superficial hardness and the behavior of the diameter of the rollers for the analysed period of exploitation, which refers that the hardness of the rollers diminishes as the waste is increased (decrease of the diameter).



Índice

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	5
1.1 Introducción	5
1.2. Trabajos precedentes sobre rodillos y desgaste.....	5
1.3. Revisión bibliográfica sobre el desgaste.....	10
1.4. Fundamentos de la calidad.....	12
1.4.1. Métodos estadísticos en el control de la calidad	12
1.5. Selección de los medios de medición de acuerdo con su calidad	13
1.6. Método estadístico.....	14
1.6.1. Diseños de experimentos.....	15
1.6.2. Análisis de regresión	15
1.6.3. Análisis de varianza	16
1.7. Fundamentos teóricos sobre el desgaste	17
1.7.1. Etapas del desgaste.....	17
1.7.2. Factores que influyen en el desgaste.....	18
1.7.3. Tipos de desgaste	18
1.7.4. Control del desgaste	20
1.7.5. Aplicación útil del desgaste	21
1.7.6. Aplicación de la nueva tecnología para contrarrestar el desgaste	21
1.8. Descripción del flujo tecnológico.....	23
1.9. Conclusiones del capítulo 1	24
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1. Introducción	25
2.2. Características de los rodillos del transportador Jacobi.....	25
2.2.1. Características del régimen de explotación de los rodillos radiales	27
2.3. Características del material de los rodillos.....	27
2.4. Caracterización del medio de medición a emplear en la investigación	29
2.4.1. Características del micrómetro.....	29
2.5. Muestreo irrestricto aleatorio	30
2.6. Causas efecto.....	31
2.7. Diseño del experimento	32
2.7.1 Selección de las variables entrada y sus niveles	32
2.7.2 Caracterización de la variable de salida.....	32
2.7.3. Matriz de planificación del experimento	33



2.8. Elaboración de los resultados	34
2.8.1. Límites de tolerancia	34
2.8.2. Análisis de variancia.....	35
2.8.3. Prueba de intervalos múltiples de Duncan	37
2.8.4. Estimación bayesiana	38
2.8.5. Ajuste de curva por regresión	38
2.9. Análisis económico	39
2.9.1. Costo anual de materiales.....	40
2.9.2. Costo de la mano de obra.....	40
2.9.3. Costo de afectación a la producción por parada de equipos.....	40
2.10. Conclusiones del capítulo 2	42
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
3.1. Introducción	43
3.2. Análisis de la representatividad de la muestra.....	43
3.3. Análisis del diagrama causas - efecto.....	44
3.4. Resultado del experimento	47
3.5.1. Análisis del comportamiento del diámetro exterior de los rodillos nuevos.....	47
3.5.2. Análisis del comportamiento del diámetro exterior de rodillos viejos	49
3.5.3. Análisis de variación del diámetro	51
3.6. Análisis de la variancia	51
3.6.1. Análisis de la prueba de Duncan.....	53
3.7. Análisis de la estimación bayesiana	53
3.8. Determinación de la relación entre la dureza y el desgaste.....	54
3.9. Valoración económica.....	55
3.10. Impacto ambiental	57
3.11. Conclusiones del capítulo 3	58
CONCLUSIONES GENERALES.....	59
RECOMENDACIONES	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70



Introducción

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

La fábrica “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.

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

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

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



La problemática de la vida útil y la fiabilidad de los elementos de máquinas está relacionada con el estudio de las leyes y mecanismos del desgaste que sufren durante su período de explotación (Álvarez, 1999). 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, 2011).

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea la siguiente **situación problemática**:

- Las afectaciones ambientales provocadas por los ruidos, vibraciones, derrame de polvo, grasa y el sobreconsumo de materia prima y energía.
- Después del proceso de fundición se observan defectos por cavidades de contracción (rechupes) que afectan la calidad de producción (Rodríguez, 2008).
- Se ha determinado que los rodillos radiales pertenecientes al transportador Jacobi de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, en los últimos tiempos, se fabrican de barras laminada de acero AISI 1045 (Oliveros, 2011 y Prieto, 2013), lo que provoca un sobreconsumo de materia prima.
- Limitaciones en el sistema de lubricación de los cojinetes, debido a que no se asegura el conducto para el engrase (Oliveros, 2011), lo que ocasiona una disminución de la longevidad de los rodamientos.
- La estructura metalográfica que presenta el material de los rodillos después de retirado no es la típica del temple, es del tipo perlita (Oliveros, 2011 y Prieto, 2013), lo que conlleva a suponer que no se le aplica tratamiento térmico de temple+revenido o que se produce una transformación en el material producto al régimen de trabajo al que están expuesto.
- La disminución significativa de la dureza superficial de los rodillos durante el período de explotación (Prieto, 2013; Leyva, 2014a y Poll, 2014), lo que provoca una aceleración de los mecanismos del desgaste.
- La influencia de factores aleatorios en la fluctuaciones de la cantidad de rodillos retirados (Prieto, 2013 y Leyva, 2014b), lo que provoca la necesidad de un análisis integral de las causas que provocan la salida de servicio de los rodillos.



A partir de la situación problemática definida anteriormente se plantea el siguiente **problema a investigar:**

Insuficiente caracterización del comportamiento del desgaste de los rodillos radiales de apoyo en el transportador sinfín para minerales reducidos de la Unidad Básica Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

El **objeto de la investigación** para este trabajo se establece como sigue:

Los rodillos del transportador de Jacobi de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

El **campo de acción** de este trabajo lo constituye:

La caracterización del desgaste en los rodillos del transportador de Jacobi de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis:**

Es posible determinar a partir del análisis de la variabilidad del diámetro de los rodillos antes y después de la puesta en explotación, la magnitud del desgaste y la significación de la variación; lo que permitiría la fundamentación de una propuesta de mejora de la calidad.

A partir de la hipótesis planteada se define como **objetivo del trabajo:**

Realizar un análisis del desgaste que se presenta en los rodillos radiales de apoyo en el transportador sinfín para minerales reducidos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

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

1. Fundamentar el tema de investigación, mediante la sistematización del conocimiento, contextualización y revisión bibliográfica.
2. Caracterizar los materiales y procedimientos a utilizar en el desarrollo de la investigación, para la caracterización del desgaste de los rodillos del transportador de Jacobi.
3. Efectuar un análisis y valoración de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los procedimientos definidos.



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

1. Fundamentación del tema de investigación, mediante la sistematización del conocimiento, contextualización y revisión bibliográfica.
2. Caracterizar los materiales a utilizar en el desarrollo de la investigación, para la determinación del desgaste de los rodillos del transportador de Jacobi.
3. Determinación del desgaste de los rodillos del transportador de Jacobi, a partir de la realización de un muestreo y establecimiento de los límites de tolerancia.
4. Análisis de la significación de la variabilidad del desgaste, a partir de la aplicación del análisis de variancia y la prueba de Duncan.
5. Análisis de los factores que pueden influir en la variabilidad del desgaste de los rodillos, mediante el método de causa efecto.
6. Valoración económica y de los efectos ambientales del proceso asociado al desgaste de los rodillos radiales del transportador Jacobi.



CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1 Introducción

La UEB de Hornos y Reducción tiene una importancia vital dentro del proceso de obtención del Níquel, es en esta donde se crean las condiciones (reducción de los óxidos de Níquel y Cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica. Un eslabón importante de la planta lo constituyen los enfriadores de mineral (donde ocurre el proceso de enfriamiento), de los cuales depende en gran medida la realización óptima del proceso de Lixiviación y Lavado.

La determinación y descripción de los factores responsables de las fallas de un componente, mecanismo o estructura, brindan una valiosa información para mejorar tanto el diseño, los procedimientos operativos y el uso de los componentes, como para evitar paradas de línea o pérdidas de producción en la industria.

En el presente capítulo se establece como **objetivo:** Describir los aspectos teóricos esenciales sobre el proceso de desgaste en elementos móviles sometidos a esfuerzos generados por cargas de contacto y clasificación de las principales teorías relativas al mismo.

1.2. Trabajos precedentes sobre rodillos y desgaste

Sobre la evaluación de la tecnología de fabricación por fundición de los rodillos del transportador Jacobi se refiere Batista (2007), el mismo realiza un análisis de los problemas que afectan la calidad de fabricación de estos rodillos del transportador (Jacobi), de material Ac 55Г según la norma GOST, que trae consigo la aparición de los rechupes (cavidades de contracción) en el proceso de solidificación del mismo. El autor en su trabajo, para el proceso de fundición realiza la tecnología de moldeo teniendo en cuenta los cálculos de los factores relacionados con la contracción para un mejor estudio en el proceso de solidificación de dicha pieza y compararla con la tecnología de fabricación que se utiliza en el taller de fundición de la empresa Mecánica del Níquel “Gustavo Machín”. El mismo realiza la simulación por el Método de Elementos Finitos utilizando el software ANSYS versión 10.0, para visualizar el proceso de solidificación de la pieza.

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. 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 trabajo hace referencia al desgaste de estos rodillos radiales de apoyo en el transportador sinfín, donde determina la composición química del material de estos elementos, la dureza y el análisis metalográfico en la zona de trabajo, la zona no trabajada, y la zona media de trabajo de los rodillos. El mismo plantea que una de las causas que provoca el desgaste prematuro de los rodillos es la variación de la composición química de material que no se corresponde con la real. Además se comprobó la poca resistencia al desgaste superficial, no se comprobó la presencia de martensita como resultado del tratamiento térmico en el acero, es decir, no se le dio ningún tipo de tratamiento térmico a estos rodillos. El autor en este trabajo no realiza el análisis de fiabilidad y estadístico de estos elementos.

El desgaste es el daño de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo. Es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden de la superficie. Al igual que la fricción, el desgaste no es solamente una propiedad del material, es una respuesta integral del sistema (Verdeja, 1996).

Courtney (2000), realiza una pesquisa sobre el comportamiento del desgaste de los materiales, donde define que este está influenciado tanto por parámetros externos característicos al sistema (velocidad, tamaño y forma del material abrasivo, condiciones ambientales, condiciones de carga), como por parámetros internos, que dependen de las características mecánicas de los constituyentes del tribosistema (microestructura, módulo de elasticidad, dureza y la tenacidad de fractura), sin embargo, la abrasión también depende del ángulo de impacto del abrasivo. En esta misma referencia este autor se basa también en la acción y penetración de partículas libres de alta dureza producto del medio o del mismo proceso de desgaste en las capas superficiales de los elementos de máquina, bajo la acción de asperezas o partículas y dependiendo de la



forma y dimensiones de las mismas; así como de la relación de dureza, resistencia a la rotura y fluencia, módulo de elasticidad, de las condiciones del medio y de trabajo, de la carga aplicada y del tipo de elemento, se pueden presentar diferentes mecanismos del desgaste abrasivo.

Atractiva investigación realiza Aguilar (2002), donde hace el desarrollo de una máquina tribológica para realizar pruebas de desgaste abrasivo en un tribosistema acuoso, que permite caracterizar materiales o simular las condiciones de desgaste o fricción. Este desarrollo lo realiza con el fin de hacer uso de las ventajas tribológicas, para ser aplicadas en el diseño y construcción de dispositivos mecánicos con la finalidad de seleccionar el material óptimo que tenga una vida útil predeterminada, así como proponer medios menos agresivos para los materiales.

Similar a otros autores, Rodríguez (2003), establece en su trabajo sobre el desgaste en cojinetes de deslizamiento, que la vida útil de estos elementos aún se ven hoy en día afectados por la fricción, dando origen esto a la repercusión del desgaste. El mismo propone que se lubriquen periódicamente dichos elementos, para mantener aún más la resistencia al desgaste de estos mecanismos. Teniendo en cuenta este resultado recomendado por el autor en su trabajo, no solo se necesita cumplir con la lubricación de cojinetes para su extensa vida, porque esta no alcanza para contrarrestar el desgaste en estos elementos, sino que además se debe realizar una selección adecuada de los sistemas de rodamientos a la hora de su puesta en servicio o en explotación.

Sabinet (2005), hace una caracterización del desgaste en elementos fabricados de materiales AISI 1045, principalmente en elementos de máquinas como árboles, ejes, pasadores, tornillos, entre otros. Este plantea que el contenido de carbono en el acero comúnmente no supera el 0,42 – 0,46 %, este acero posee alta resistencia, plasticidad y viscosidad en combinación con excelentes propiedades de ingeniería, baja tendencia a las deformaciones y formaciones de grietas y fisuras durante el temple, alcanzando valores de dureza de 56 – 58 HRC. Es cierto todo esto referenciado por el autor, pero se debe tener presente que la dureza en materiales debe ser de acuerdo al modo de operación o funcionamiento de la pieza.



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.

Numerosos son los trabajos que se han venido desarrollando con el propósito de determinar las causas relacionadas con el desgaste abrasivo en los materiales. Entre los temas más tratados, se encuentran el de Sagaró *et al.* (2007), quienes analizan el comportamiento al desgaste abrasivo del acero 65 Mn 4, con y sin tratamiento térmico, empleado en los martillos de molino. Precisan que durante el proceso de abrasión, la deformación del material y la fractura eventual ocurren en áreas muy localizadas bajo condiciones de altas presiones y altas razones de deformación, en las condiciones de trabajo de los equipos pesados. Referencian estos muy pocos elementos sobre este comportamiento, debido a que en este trabajo se puede abarcar más con respecto al desgaste en estos elementos, además no consideran una serie de factores que pudieran intervenir en el desgaste de estos mecanismos.

Por otro lado, Alcántara *et al.* (2008), analizan la influencia del desgaste abrasivo en los pasadores de las esteras, estableciendo que cuando entran en contacto el casquillo y el pasador, el proceso de desgaste origina diferentes capas, las que a su vez adquieren diferentes durezas en correspondencia con el contacto mecánico entre las dos superficies modificando el tamaño del grano en la aleación.

Díaz (2008), realiza una investigación sobre el desgaste en los pasadores de esteras de los tractores KOMATSU D85P-21. El mismo define que este desgaste prematuro del pasador utilizado en equipos de laboreo minero, está dado por la corrosión, adhesión, abrasión y por la fatiga superficial a la que está sometido el pasador, a las cargas variables de trabajo, y al trabajo continuo del equipo (fatiga), fenómenos que si se minimizan su efectos, o se mejoran las propiedades del acero se puede alcanzar una vida útil del pasador más prolongada.

Tomacén (2010), realiza una caracterización del desgaste en el sistema biela – manivela del automóvil Hunday, dentro de los elementos del motor que se analizan, están los relacionados con la transmisión (pistón, aro de aceite y de fuego, camisa). El



autor se basa en el análisis de los mismos fundamentado por el desgaste que han sufrido, para ello realizó un análisis metalográfico de las muestras de cada uno de los elementos. El autor no tuvo presente en su trabajo que solo con un análisis metalográfico, no es posible determinar el desgaste originado en estos elementos, sino que se pudiera haber realizado un análisis de dureza, composición del material y considerar algunos factores que intervienen en el desgaste teniendo en cuenta la forma y funcionamiento a que están sometidos estos elementos componentes.

Alcántara (2012), realiza su maestría sobre 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 microscopía 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.

Leyva (2012), realiza una investigación sobre la influencia que genera la deformación plástica superficial en la tolerancia dimensional de los pasadores que se utilizan en la cuchara mecánica tipo CMA – 8.00/1.8 de la grúa de jaiba, que se emplea en la planta de preparación de mineral de la empresa “Ernesto Che Guevara”. A través de un plan experimental, el mismo en su trabajo toma en consideración las características de los materiales a utilizar en la experimentación y las variables más significativas en el proceso, como son: avance de 0,075, 0,125 y 0,25 mm/rev y número de revoluciones del husillo de 27,54 y 110 rev/min, para una fuerza constante de 500 N, lo cual le



permitió caracterizar el acabado superficial de los pasadores después de terminado el proceso. Mediante la aplicación de los métodos utilizados, fue posible plantear durante su investigación que el diámetro de las probetas construidas a semejanza de los pasadores de $\varnothing 40$ h6, es de 40 mm con una tolerancia de 0,038 mm para un nivel de confianza del 90 % antes de la deformación plástica, y la tolerancia que es posible obtener por medio del método de deformación plástica superficial según la condiciones descrita es de 0,016 mm para un nivel de confianza del 95 %; lo que indica que es posible emplear el procedimiento de deformación plástica superficial para mejorar el acabado superficial de los pasadores, además de incrementar su dureza en el rango de 202,21 a 300,03 HV con una profundidad de endurecimiento de 0,484 a 0,607 mm . Se realiza una valoración del aporte técnico económico y del efecto social y ambiental. De una forma u otra este trabajo guarda una buena redacción y se debe tener presente a la hora de la fabricación de piezas para que las mismas obtengan un buen acabado superficial y así mejoren un poco más su durabilidad y se controlen algunos de los factores que influyen en el desgaste.

En los trabajos mencionados anteriormente se aprecia que se han tratado de fabricar rodillos con calidad para el transportador de Jacobi de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, considerando la variante de fundición cuando los mismos son fabricados de acero 55 Г según la norma GOST y se han determinado los aspectos que llevan a la retirada prematura de servicio de dichos rodillos; pero en ninguno de ellos se precisa la significación del desgaste de los rodillos objetos de estudio ni se establece la relación entre el desgaste y la variación de la dureza superficial.

1.3. Revisión bibliográfica sobre el desgaste

Se considera que, el desgaste es un proceso complejo que se produce en las superficies de los cuerpos debido a la fricción de otro cuerpo o medio, trayendo por consecuencia la variación de la micro y macro geometría superficial; de la estructura y de las propiedades mecánica -físicas del material con o sin pérdida de material (Caubet, 1971).

El desgaste metálico y abrasivo están caracterizados por el deslizamiento y arranque de la superficie metálica, la única diferencia radica en que uno ocurre entre metales y el otro con un abrasivo metálico o no metálico. Por lo que el modo de acción será análogo en los dos casos (Martínez, 1981).



Se plantea que los aceros con una alta cantidad de austenita retenida presentan una considerable resistencia al desgaste en masa abrasiva. La mejor estructura, desde el punto de vista de la resistencia al desgaste abrasivo es la martensítica o bainítica, fortalecida en su matriz (Guliaev, 1983).

El fenómeno de fricción y mecanismo de desgaste puede explicarse por la formación y posterior ruptura de uniones existentes entre dos superficies que están en contacto, ya que todas las superficies presentan algún grado de rugosidad. Así la fricción tiene una naturaleza molecular-mecánica que depende de las fuerzas de interacción molecular, de las propiedades mecánicas del material, de la deformación plástica y de la configuración geométrica de los elementos de contacto (Escanaverino, 1986).

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

Al investigar el desgaste de los metales en una corriente de granos abrasivos, se confirmó que existe una estrecha relación entre la resistencia al desgaste y las fuerzas de los enlaces en la red cristalina de los metales (Álvarez, 1995).

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

En el desgaste abrasivo influye la dureza y la tenacidad del material. La tenacidad es la resistencia que opone el material deformado por la acción de las partículas abrasivas, a la rotura. El desgaste depende también del coeficiente de fricción, fuerza de unión adhesiva entre partículas de la superficie del metal y las partículas abrasivas. Cuando los valores del coeficiente de fricción son elevados, se favorece el proceso de microcorte (Abad, 2009).



1.4. 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.
- 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:

1. Evaluar los resultados operativos reales.
2. Comparar los resultados reales con los objetivos.
3. 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.

1.4.1. 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:

1. Observar y evaluar la calidad del producto terminado y descubrir la amplitud de los fallos en concordancia con las especificaciones.
2. Seguir el rastro de los fallos desde el producto terminado, a la materia prima o proceso mediante el cual se elabora el producto.
3. 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.
4. Evaluar los procesos o medios disponibles para reducir las variaciones de la calidad.
5. 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. Método estadístico

Bajo el método científico, se consolidan leyes y teorías en diversas ramas del conocimiento, las cuales son expresables por medio de sistemas de ecuaciones diferenciales relacionadas con el método estadístico. En efecto, no es otra cosa lo que se realiza cuando en física utilizamos ecuaciones para describir el movimiento de una partícula, o resolvemos los balances correspondientes aplicando las leyes de conservación de la materia, energía o cantidad de movimiento; o bien cuando nos enfrentamos al diseño de un equipo según los procedimientos que conocemos a partir del campo de las operaciones unitarias (Vélez, 1995).

Considera Sarache (2001), que resulta evidente que no todo sistema de ecuaciones puede resolverse fácilmente, al menos desde el punto de vista analítico. Esto impuso a lo largo de la historia limitaciones importantes al tipo de modelos que podían resolverse, o de otra forma, la necesidad de recurrir a hipótesis inadecuadas o restrictivas (supersimplificaciones) para al menos poder tratar el problema. No debe extrañar que aún, exista la necesidad de utilizar permanentemente parámetros en nuestros modelos, y por lo tanto, implican la necesidad de reemplazar las leyes básicas por aproximaciones causales obtenidas de datos experimentales.

Plantean Cox (1975) y Méndez (1980), que hasta ahora los métodos estadísticos estudiados pertenecen a la experimentación pasiva, o sea, aquella experimentación donde no interviene el hombre, donde este se limita a observar y a registrar los datos para luego elaborarlos. Sin embargo, en numerosas ocasiones el investigador se ve obligado a estudiar la influencia de la variable de entrada sobre las funciones de respuesta, justamente aquí es donde es necesario planificar el experimento con un número de pruebas mínimo que le permita ahorrar recursos materiales y humanos, así como el tiempo.



1.6.1. Diseños de experimentos

Diseñar un experimento no es más que planear un experimento de modo que se reúnan los datos necesarios del problema que se investiga, es decir, la secuencia completa de pasos tomados de antemano que asegure tomar los datos apropiados que permita el análisis de los resultados del problema. Es muy importante que el diseño sea lo más simple, pero además, ocurre que la investigación se debe conducir de manera más económica, eficiente; es decir, se debe hacer todo esfuerzo posible por lograr ahorro de tiempo, de dinero, de personal y de material experimental (Bicking, 1954).

1.6.1.1. Principios básicos del diseño de experimentos

La forma tradicional que se utilizaba en la experimentación, para el estudio de estos problemas, se basaba en estudiar los factores uno a uno: variar los niveles de un factor permaneciendo fijos los demás, considerando lo que se muestra a continuación (Kempthorne, 1952):

1. Reproducción: Repetición, réplica del experimento. Proporciona una estimación del error experimental y estimación más precisa del efecto medio de cualquier factor.
2. Aleatorización: Selección aleatoria de la muestra o asignación al azar de tratamiento a unidades experimentales, hace válida todas las pruebas y garantiza la independencia de los elementos y de los errores.
3. Control Local: Cantidad de balanceo, bloques y agrupamientos de las unidades experimentales que se emplean en el diseño y a la vez hace el diseño más eficiente.

1.6.2. Análisis de regresión

El análisis de correlación desarrolla métodos que sirven para, “investigar si dos o más variables están relacionadas”, y para medir “la intensidad de esta relación”.

El análisis de regresión, por su parte, nos ayudará a “determinar el modelo o ecuación matemática que mejor representa la relación existente entre las variables analizadas”.

En los modelos de regresión la variable dependiente Y es siempre una variable aleatoria, mientras que los factores o variables independientes son considerados como variables no aleatorias. Esto se argumenta en el hecho de que en las aplicaciones prácticas los valores de las X_i suelen ser controladas o elegidas de antemano por el investigador, estos factores también se les denomina variables explicativas, ya que ellos



en definitiva son los que explican el comportamiento de la variable dependiente (Box y Hunter, 1989).

1.6.3. Análisis de varianza

Sarache (2004) y Ostle (1975), plantean que en la práctica nos enfrentamos a muchos fenómenos donde se necesita comparar simultáneamente más de dos valores medios. El análisis de varianza (ANOVA) nos permite realizar dicha comparación, la misma fue introducida en la tercera década del siglo XX por el estadístico inglés Ronald A. Fisher y en sus inicios estuvo vinculada a las investigaciones agrícolas, pero con el transcurso del tiempo su utilización se ha extendido a todas las ramas de las ciencias.

El ANOVA como técnica estadística, permite el estudio de las características medidas u observadas, cuyos valores dependen de varias clases de efectos que operan simultáneamente y mediante este análisis poder decidir si tales efectos son o no diferentes, es decir, esta técnica se basa en la división de la variabilidad total de una característica medible en la variabilidad causada por diferentes factores que intervienen en el problema.

En el ANOVA la repetición de la observación se debe entender como la repetición del experimento, entendiéndose por repetición (réplica) la realización repetida del hecho que se estudia bajo las condiciones que los caracterizan, no es recomendable la utilización de esta técnica para una sola observación (Ferré, 2002).

1.6.3.1. Supuestos o requisitos del ANOVA

1. La característica medible se distribuye normalmente.
2. Las varianzas de los niveles o grupos son iguales (Homogeneidad).
3. Las observaciones en los niveles o grupos están incorrelacionados o sea independientes.
4. Aleatoriedad de las muestras por grupos.

Los supuestos 3 y 4 se garantizan al diseñar el experimento. El supuesto 1 se puede comprobar mediante las pruebas de Kolmogorov - Smirnov y la Ji cuadrado (Ferré, 2002), aunque algunos estudios han demostrado que el incumplimiento del mismo no afecta sustancialmente la validez de los resultados.



1.7. 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 sufrido por los materiales después de determinadas condiciones de trabajo a los que son sometidos y puede considerarse de forma general como un fenómeno superficial. El resultado del desgaste, es la pérdida de material y la subsiguiente disminución de las dimensiones y por tanto la pérdida de tolerancias. 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).

Más del 80 % de los elementos de máquinas que se sustituyen se deben al desgaste y alrededor del 30 % de la energía mecánica que se produce en el mundo se gasta en vencer la fricción innecesaria en los sistemas tribológicos; por lo que se deduce fácilmente que si queremos aumentar la vida útil de nuestro equipo, debemos disminuir el desgaste al mínimo posible.

1.7.1. Etapas del desgaste

Cuando se ponen en marcha piezas mecánicas que experimentan rozamiento, se presentan esquemáticamente tres etapas (Clauser, 1985):

1. 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.
2. Un segundo período llamado marcha normal, en el cual está comprendido la mayor parte de la vida operativa de estos componentes. Durante este período el desgaste es débil o al menos constante.
3. 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.

La etapa secundaria se acorta con el aumento de la severidad de las condiciones ambientales, tales como temperaturas más altas, velocidades de deformación, el estrés y velocidades de deslizamiento, etc. Tenga en cuenta que, la tasa de desgaste está fuertemente influenciada por las condiciones de funcionamiento. Específicamente, las



cargas normales y velocidades de deslizamiento juegan un papel fundamental en la determinación de la tasa de desgaste.

1.7.2. Factores que influyen en el desgaste

La complejidad del desgaste se acentúa al considerar el número de factores necesarios para describirlo. Los principales factores que intervienen en el desgaste son los siguientes (Álvarez, 1995):

1. Según las variables relacionadas con la metalurgia

- ✓ Dureza
- ✓ Distancia
- ✓ Constitución y estructura
- ✓ Composición química

2. Según las variables relacionadas con el servicio

- ✓ Materiales de contacto
- ✓ Presión
- ✓ Velocidad
- ✓ Temperatura
- ✓ Acabado de la superficie

1.7.3. 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 cuando piezas son sometidas a elevados esfuerzos, los cuales provocan la aparición y propagación de grietas bajo la acción repetitiva de estos.

Desgaste abrasivo: Es la pérdida de masa resultante de la interacción entre partículas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella.



Desgaste por erosión: Es aquella que se genera por la pérdida de material en la superficie, debido a estar expuesta a repetidos impactos de partículas sólidas o líquidas, muy comunes en turbinas de gas, tubos de escape y de motores.

Desgaste por corrosión: Es el fenómeno que deteriora un material (generalmente metálico), por la acción química o electroquímica del medio ambiente, asociada o no a esfuerzos mecánicos. Esta actúa de manera habitual cuando el medio de trabajo es húmedo, este proceso de desgaste corrosivo en materiales que forman capas pasivas es acelerado cuando esta capa es débil, como en el caso de algunos aceros inoxidables austeníticos.

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: Ocurre como resultado de la destrucción de los enlaces entre las superficies unidas, permitiendo que parte del material arrancado se transfiera a la superficie del otro durante su movimiento relativo como resultado de soldadura en frío debido a las grandes presiones existentes entre las asperezas. Así, la superficie que gana material aumenta su rugosidad con el agravante de que cuando el movimiento continúa, se genera desgaste abrasivo contra la otra superficie. Existen pruebas de este tipo en las que se emplea una máquina de perno o esfera en disco.

Desgaste fretting: ocurre entre dos superficies en contacto (no necesariamente moviéndose tangencialmente), las cuales experimentan pequeñas oscilaciones cíclicas (del orden de 1 a 100 μm). Cuando algunas vibraciones aparecen en las superficies en contacto, ocurren pequeños deslizamientos en la dirección del movimiento relativo, esos pequeños deslizamientos son causa de desgaste por fretting.

Desgaste por cavitación: Se puede definir como aquel daño que ocurre en los materiales debido al crecimiento y colapso de pequeñas burbujas, que surgen debido a las variaciones de presión durante el flujo de un fluido.

Desgaste oxidativo: Se presenta en superficies metálicas bajo deslizamiento sin lubricación o poca lubricación, en presencia de aire u oxígeno.

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.

1.7.4. 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 (H_m/H_a).
- 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.

1.7.5. Aplicación útil del desgaste

Cualquiera que sea el mecanismo de desgaste será considerado como un proceso destructivo y en la mayoría de los casos es considerado como un proceso no deseado. Aunque existen una gran cantidad de aplicaciones del desgaste en forma útil que se presentan en diferentes esferas de la sociedad como son las que se mencionan a continuación.

- Por medio del desgaste abrasivo o erosivo se proporciona un acabado a las superficies. Un ejemplo es el uso de papel abrasivo para desprender material de superficies y posteriormente papeles más finos para dar un pulido a la superficie. Otro método útil es el uso de “sand blasting”, en este proceso son proyectadas partículas de arena contra la superficie con la finalidad de tener una superficie limpia.
- En muchos sistemas es posible hacer uso de los mecanismos del desgaste para diagnosticar posibles irregularidades en un sistema mientras este se encuentra en operación. Un ejemplo práctico es llevado a cabo en la medicina deportiva, en donde tanto entrenadores como atletas inspeccionan deformaciones y alteraciones del calzado usado, mostrando especial interés en el desgaste, ya que muestra en forma fidedigna lo que le ocurre a los tobillos y los pies de deportista durante la acción deportiva, encontrando por medio de esta inspección, problemas como la pronación o supinación.

1.7.6. Aplicación de la nueva tecnología para contrarrestar el desgaste

Dentro de este campo, en el mundo se ha trabajado en dos direcciones principales:

1. Búsqueda y experimentación de nuevos materiales.
2. La aplicación y desarrollo de nuevas tecnologías.



Ambas se relacionan mutuamente y en ocasiones se complementan. Una cuestión de vital importancia en la construcción de máquinas es la elección de materiales; en determinados casos no se le presta a este asunto toda la atención que merece, y se ha de insistir en tan fundamental tema recordando que, antes de decidirse por un material determinado, por sencilla y poca importancia que se le conceda a una pieza a construir, se elige el que reúna las características más apropiadas, no sólo por su resistencia, sino por su facilidad de maquinado y tratamiento, y muy especialmente también por el factor económico que puede influir notablemente en el costo de fabricación, por tanto, a la hora de la elección hay que escoger el más apropiado con detenimiento.

Dentro de las tecnologías que se han valorado en estos últimos años para contrarrestar el desgaste en los elementos de máquinas, se destacan: temple isotérmico, tratamientos termomecánicos, deposición electrolítica, deposición por fusión de aleaciones duras para formar elementos bimetálicos, tratamientos termoquímicos, temple superficial (por corriente de alta frecuencia y por láser), tratamiento superficial por luz solar concentrada, entre otros.

Otro de los métodos empleados para disminuir el desgaste y que en los últimos tiempos ha alcanzado auge con el desarrollo de nuevas tecnologías y el descubrimiento de nuevos aditivos, es la lubricación de las superficies en contacto en todos los casos que esto sea posible.

El tercer factor que estudia la tribología es la lubricación, esta es utilizada en todos los casos en donde exista la fricción, pues tiene gran utilidad en el control del desgaste y con el desarrollo de la ciencia se han obtenido logros importantes en nuevos tipos de lubricación y nuevos tipos de aditivos para mejorar los lubricantes. El deslizamiento entre superficies sólidas se caracteriza generalmente por un alto coeficiente de fricción y un gran desgaste debido a las propiedades específicas de las superficies. La lubricación consiste en la introducción de una capa intermedia de un material ajeno entre las superficies en movimiento. Estos materiales intermedios se denominan lubricantes y su función es disminuir la fricción y el desgaste. El término lubricante es muy general, y puede estar en cualquier estado material, bien sea líquido, sólido, gaseoso e incluso semisólido o pastoso.

1.8. Descripción del flujo tecnológico

En la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” el mineral pasa por diferentes procesos en diferentes plantas. La planta de Hornos de Reducción, según Rodríguez (2006), está compuesta por cilindros metálicos verticales de 15 m de altura revestidos en su interior con ladrillos refractarios y en su exterior 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, con un total de 24 hornos agrupados en 3 tres lozas de 8 hornos cada una. La homogenización y arrastre de la carga dentro de los hornos se garantiza con un sistema de 68 brazos (4 en cada hogar) acoplados a un árbol central hueco. La energía térmica y los agentes necesarios para la reducción del mineral se obtienen de la combustión de petróleo en las cámaras y del petróleo aditivo que se añade al mineral en la planta de secado. El diagrama de flujo de la instalación se muestra a continuación en la Figura 1.1.

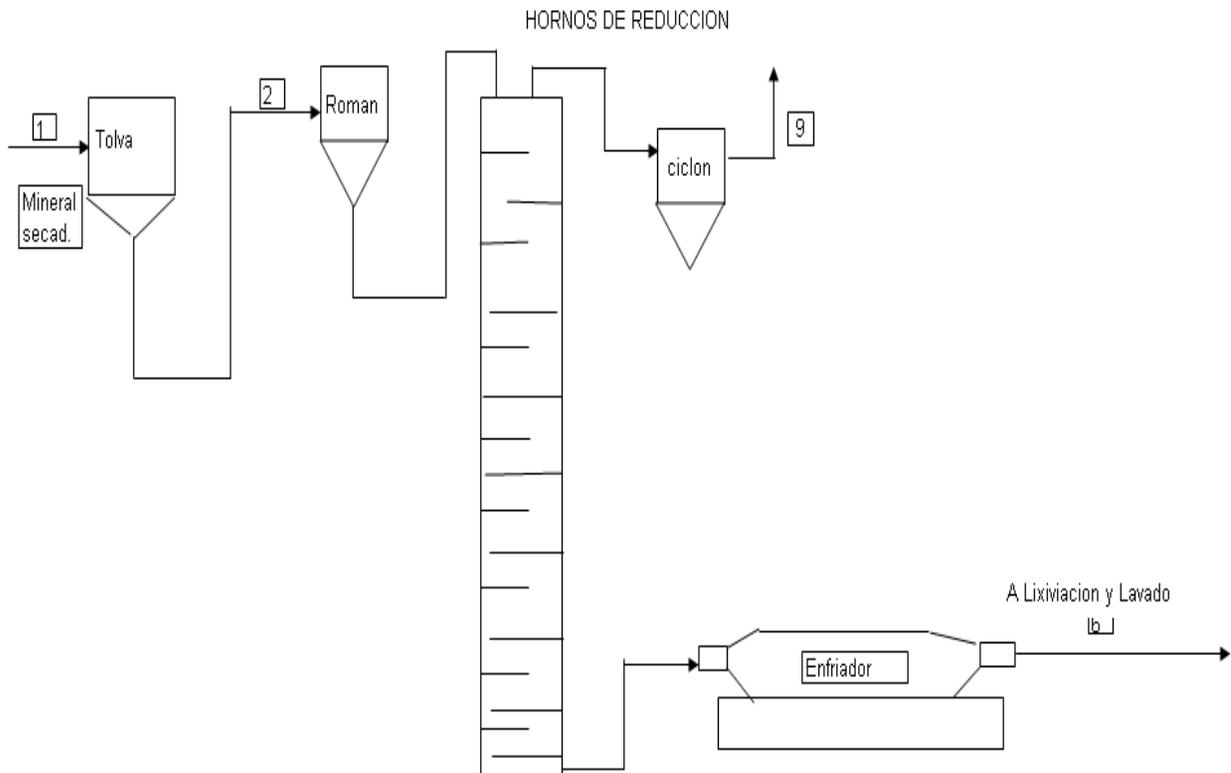


Figura 1.1. Diagrama de flujo de la planta de horno de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Otro componente estructural de esta planta son las cámaras de combustión, que están equipadas con quemadores del tipo PRIOR que se disponen en los diferentes hogares, a razón de dos cámaras en cada hogar ubicadas simétricamente. El mineral, una vez reducido, sale por el hogar hasta los transportadores sinfines llamados (Jacobi) y se traslada a los enfriaderos para posteriormente ser sometidos a lixiviación.

Estos aditamentos llamados transportadores sinfín, encargados de transportar el mineral mediante un movimiento circular a razón de 27,7 rev/min expuesto a temperatura en el orden de los 650-700°C hasta el próximo proceso, para su funcionamiento necesitan de un sistema de rodillos radiales de apoyo capaces de soportar una carga de aproximadamente 37 258,82 N, donde facilitan y mantienen la rotación para evitar sedimentación en la superficie de transportación.

Estos rodillos pertenecientes a dichos transportadores se han fabricado de acero AISI 1045 con un diámetro exterior de 305 mm en el taller de maquinado de la empresa Mecánica del Níquel "Gustavo Machín". Los mismos han presentado limitaciones en su funcionamiento pues se retiran de servicio prematuramente (Oliveros 2011).

1.9. Conclusiones del capítulo 1

1. El análisis bibliográfico ofreció gran cantidad de información en cuanto al desgaste prematuro que se produce en los rodillos radiales de apoyo en el transportador de tornillo sinfín; así como lo concerniente a los materiales utilizados en la fabricación de estos, los defectos de fabricación que presentan pero en ninguno de ellos se precisa la significación del desgaste de los rodillos objetos de estudio ni se establece la relación entre el desgaste y la variación de la dureza superficial.
2. Se describen los elementos teóricos necesarios que permiten la caracterización del desgaste de los rodillos del transportador de Jacobi, que incluye además el considerar, las características de los medios de medición a emplear, establecimiento de los límites de control, determinación de las causas que provocan variaciones del diámetro en estos y valoración económica.



CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

En la búsqueda de minimizar costos de operación y maximizar el rendimiento de maquinarias y/o equipo, el desgaste tiene un papel protagónico ya que constituye un gran enemigo en muchas de las industrias, pues con su acción tiende a retirar recursos prematuramente. Normalmente, el desgaste no ocasiona fallas violentas, pero trae como consecuencias: reducción de la eficiencia de operación, pérdidas de potencia por fricción, incremento del consumo de lubricantes, eventualmente conduce al reemplazo de componentes desgastados y a la obsolescencia de las máquinas en su conjunto. El análisis del desgaste es complejo ya que intervienen factores como dureza, tenacidad, estructura, composición química, modo y tipo de carga, velocidad, rugosidad de la superficie, corrosión presente, etc.

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

Fundamentar las propiedades a investigar, exponiendo los medios empleados, así como la descripción de los métodos y procedimientos utilizados 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 (ver Anexo1); 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 contenidos de trabajo de la UEB de maquinado de la Empresa Comandante Gustavo Machín Hoed De Beche.

Estos rodillos radiales sirven de apoyo a las llantas 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).

Materiales de los rodillos	Acero AISI 1045
Números de revoluciones	23,3 rev/min
Temperatura	250 ⁰ C
Fuerza	37 258,82 N
Flujo de agua	10 m ³ /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. Características del material de los rodillos

Composición química

En las tablas 2.2 y 2.3 se muestran la composición química estándar del acero AISI 1045 y la composición química de los rodillos, las cuales corresponden a los trabajos de Prieto (2013) y Poll (2014).

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

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

Tabla 2.3. Composición química de los rodillos (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Fe
0,43	0,25	0,60	0,010	0,011	0,06	0,04	0,04	0,0493	98,3

Se observa en la tablas anteriores que el material de los rodillos se corresponde con el acero AISI 1045, pues el contenido de carbono, manganeso y silicio están incluido en el rango establecido y el de fosforo y azufre son menores que lo indicado.

Dureza superficial

A continuación se ilustran en la tabla 2.4 los resultados del análisis de la variación de la dureza de los rodillos.

Tabla 2.4. Variación de la dureza superficial de los rodillos (Prieto 2013, Leyva 2014 y Poll 2014).

Parámetros	Valores	U/M
Variación absoluta de la dureza	-5,83	HRC
Variación relativa de la dureza	12,3	%

Estructura metalográfica

Las Figuras 2.2 y 2.3 muestran la estructura metalográfica que se obtuvo con muestras tomadas de los rodillos, antes y después de su puesta en explotación respectivamente.



Figura 2.2. Micrografía 1 (400 X).

Fuente: Poll 2014



Figura 2.3. Micrografía 2 (100 X).

Fuente: Prieto 2013 y Poll 2014.

Se observa en las Figura 2.2 y 2.3. que la estructura metalográfica del material de los rodillos después de la puesta en explotación está compuesta por perlita + ferrita; mientras que la referida a antes de la puesta en explotación es del tipo martencita, lo cual explica el comportamiento de la dureza superficial.

Variación del diámetro

La tabla 2.5 que se muestra a continuación representa los valores de las variaciones absolutas y relativas del diámetro de los rodillos.

Tabla 2.5. Variación del diámetro de los rodillos (Prieto, 2013).

Parámetros	Valores	U/M
Variación absoluta del diámetro	-4,84	mm
Variación relativa del diámetro	1,5	%

2.4. Caracterización del medio de medición empleado en la investigación

Para dicha investigación se tuvieron en cuenta las características del medio de medición a emplear en la caracterización del desgaste de los rodillos radiales del transportador rotatorio Jacobi. Para dar cumplimiento al objetivo propuesto en el trabajo se utilizó un micrómetro de exteriores, el cual antes de su uso se trató en lo posible que tuviera las mejores condiciones para así minimizar los errores.

2.4.1. Características del micrómetro

El micrómetro, que también es denominado tornillo de Palmer, es un instrumento de medición cuyo funcionamiento se basa en un tornillo micrométrico que sirve para valorar el tamaño de un objeto con gran precisión, en un rango del orden de centésimas o de milésimas de milímetro, 0,01 mm. El micrómetro a utilizar es de precisión 0,01 mm, el cual se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2.4. Micrómetro.

Este medio permite medir la magnitud del desgaste de los rodillos por tener buena propiedad, con un rango de medición capaz de alcanzar completamente el diámetro exterior del objeto de estudio, es decir, en el orden de los 305 mm (Kiwix, 2010).

Para proceder con la medición el equipo posee dos extremos que son aproximados mutuamente a un tornillo de rosca fina que dispone en su contorno de una escala grabada, la cual puede incorporar un nonio. La longitud máxima mensurable con el micrómetro de exteriores es de distintas medidas. Este equipo posee características especiales en sus diferentes partes: conserva un cuerpo que evita la variación de medida por dilatación, una parte llamada tope que determina el punto cero de la medida para evitar el desgaste y optimizar la medida, una espiga que determina la lectura del micrómetro, una tuerca de fijación que evita el desplazamiento de la espiga, un trinquete que limita la fuerza ejercida al realizar la medición, un tambor móvil que es solidario a la espiga con diferentes escalas de divisiones y un tambor fijo que es solidario al cuerpo con escala fija de 300 – 400 mm (Kiwix, 2010).

2.5. Muestreo irrestricto aleatorio

Se emplea en aplicaciones prácticas de las encuestas muestrales para que sirva de guía a la precisión de otros diseños muestrales más complejos; también el MIA es utilizado para realizar encuestas, es decir, muestreos en los que se hagan estimaciones de los parámetros poblacionales y se mida la confiabilidad y precisión apoyados en los estimados del MIA, sin embargo, en la práctica, este procedimiento de selección no es tan utilizado como los otros diseños muestrales.

Se denomina muestreo irrestricto aleatorio a un procedimiento mediante el cual, se asigna una probabilidad igual de selección a cada unidad de la población en la primera selección. El muestreo se empleó utilizando las expresiones de cálculos recomendada (Miller *et al*, 2005).

Este procedimiento se aplicó con vista 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 (Calero, 1976):

$$n = \frac{\left(\frac{Z_{1-\alpha/2} \cdot S}{d}\right)^2}{1 + \frac{1}{N} \left(Z_{1-\alpha/2} \frac{S}{d}\right)^2} \quad (2.1)$$



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

α – Es el nivel de significancia.

S – Es la desviación típica poblacional.

d – Es el error máximo de estimación.

N – tamaño de la población.

La aleatoriedad de los resultados se aseguró en este trabajo con el empleo de la tabla de números aleatorios. Se escogió el rodillo para realizar la medición del diámetro exterior por coincidencia con la serie de número aleatorio.

2.6. Causas efecto

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 del diámetro después de la puesta en explotación de los rodillos, implica el desarrollo de los siguientes pasos lógicos:

1. Se construyó el diagrama de dispersión.
2. Se reunieron 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 ha mostrado en el tiempo la variable diámetro de los rodillos retirados?, o ¿de qué depende la variabilidad de la variable diámetro de los rodillos retirados?.
3. Se confeccionó una lista de causas posibles de la variación del diámetro (defecto principal).
4. Se construyó el diagrama de causas – efecto.

Se consideró para la aplicación de esta técnica el volumen de artículos a valorar y el objetivo del análisis.

2.7. Diseño del experimento

Para efectuar el diseño del experimento se tuvo en cuenta que es importante asegurar la simplicidad y la conducción de este tal que sea económico y eficiente. Se debe hacer todo esfuerzo posible por lograr ahorro de tiempo, de dinero, de personal y de material experimental (Hernández 1997 y Chacín 2000).

Para la determinación del desgaste de los rodillos en las condiciones de trabajo del transportador Jacobi se efectuó un diseño de experimento completamente aleatorio. Las variables consideradas fueron tiempo (t) y diámetros (d). El tiempo se consideró aleatoriamente dado por el período de explotación de los rodillos y el diámetro se determinó antes y después de la puesta en explotación.

2.7.1 Selección de las variables entrada y sus niveles

Se escogió la variable tiempo porque se considera un factor que influye en la variación que experimentan el diámetro de los rodillos retirados y además es la más sencilla de cambiar. Con el incremento del tiempo de explotación de dichos rodillos es de esperar que el diámetro final de estos sea menor; lo que se traduce en incremento del nivel de desgaste de acuerdo con Prieto (2014).

Se seleccionaron dos niveles para la variable tiempo; correspondiente al momento inicial de la puesta en explotación y el referido a la salida de servicio de los rodillos. Esto se define sobre la base de consideraciones prácticas.

2.7.2 Caracterización de la variable de salida

Se escogió la variable desgaste para caracterizar el problema que presentan los rodillos radiales del transportador de Jacobi por el hecho de que esta indica el grado de utilización de la pieza y además el operar con este parámetro posibilitaría definir la significación del desgaste que ha presentado dicha pieza.

El desgaste que muestran estos elementos se cuantificó a través del análisis de la variación que se produce en el diámetro. Las variaciones que se producen en relación con las mediciones del diámetro de los rodillos considerando el antes y después de su



proceso de explotación se determinó a través de las siguientes expresiones, de acuerdo con Prieto (2014).

$$\Delta D_{abs} = \bar{D}_{desp} - \bar{D}_{antes} \quad (2.2)$$

Donde:

ΔD_{abs} - Variación absoluta del diámetro de los rodillos, mm.

\bar{D}_{desp} - Diámetro de los rodillos después del proceso de explotación, mm.

\bar{D}_{antes} - Diámetro de los rodillos antes del proceso de explotación, mm.

$$\Delta D_{rel} = \left| \frac{\bar{D}_{desp} - \bar{D}_{antes}}{\bar{D}_{antes}} \right| \cdot 100\% \quad (2.3)$$

Donde:

ΔD_{rel} - Variación relativa del diámetro de los rodillos, %.

De la revisión bibliográfica se determinó que Prieto (2013) efectuó mediciones del diámetro exterior de los rodillos, y aplicando las ecuaciones 2.2 y 2.3 determina que la variación absoluta del diámetro es -4,84 mm y la variación relativa es 1,5 %; pero no establece el nivel de significación de las variaciones observadas. Leyva (2014) determinó que la variación absoluta de dureza superficial de los rodillos es -5,83 y la relativa de un 12,3 %, pero no establece la relación entre la variación de la dureza y el desgaste.

Para controlar el nivel de desgaste se asumió que la norma del desgaste de los muñones de los árboles que giran en cojinetes de deslizamientos sin dispositivo compensadores, en cajas de avance, se tolera de 0,001 a 0,001 mm del diámetro del árbol, sobre la base de lo expuesto por Navarrete y Gómez (1986).

Sobre la base de lo planteado anteriormente en este trabajo se precisa la significación del desgaste de los rodillos objetos de estudio y se establece la relación entre el desgaste y la variación de la dureza superficial.

2.7.3. Matriz de planificación del experimento

En total, para el desarrollo de los experimentos se efectuaron 24 pruebas, 2 experimentos diferentes y doce réplicas por cada uno. Las 24 pruebas se identificaron con números del 1 al 12 siguiendo el momento de la prueba, la letra A para las repeticiones referidas antes de la puesta en explotación y la letra P para repeticiones

después de la puesta en explotación. La matriz de planificación de experimentos se expone en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Matriz. de planificación del experimento

Momento 1 (antes de la puesta en explotación)	Momento 2 (después de la puesta en explotación)
DA1	DP1
DA2	DP2
.	.
.	.
.	.
DA12	DP12

2.8. Elaboración de los resultados

2.8.1. Límites de tolerancia

Para brindar cierta información vital en la solución de 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 del diámetro exterior de los rodillos, se aplica 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)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (2.4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.5)$$

$$LT_{m\acute{a}x} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.6)$$

$$LT_{m\acute{i}n} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (2.7)$$

Donde:



\bar{X} - Media aritmética del diámetro exterior de los rodillos (\bar{D}), 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 hubo valores anormales, los mismos se eliminan procediendo como se indica a continuación (Hernández, 1986):

1. Para el conjunto de valores obtenidos en la medición se calculan \bar{X} y S (teniendo en cuenta en estos cálculos incluso aquellos valores considerados sospechosos).
2. Se establece el intervalo dado por la ecuación $LT = \bar{X} \pm t_{\alpha/2} \cdot S$ y se elimina por considerarse como anormales todos los valores que queden fuera del intervalo establecido.
3. Se realizan nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final, sin considerar, como es lógico, los valores anormales.

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

2.8.2. Análisis de variancia

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

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 por la tabla de análisis de variancia.

4. Cálculo:

Tabla 2.6. Fórmulas para el análisis de variancia.

Fuente de variable	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Fischer
Tratamientos	(k-1)	SS(Tr)	SS(Tr)/ (k-1)	[SS(Tr)/ (k1)]/ [SSE/ K(n-1)]
Error	K(n-1)	SSE	SSE/ K(n-1)	
Total	(k*n-1)	SST		

$$C = \frac{T^2_i}{k*n} \tag{2.8}$$

Donde:

C: termino de corrosión

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

k: cantidad de tratamientos

n: tamaño de muestra por tratamientos

$$SST = \sum_{I=1}^K * \sum_{J=1}^N * Y^2_{ij} \tag{2.9}$$

Donde:

SST: suma de cuadrado total.

Y^2_{ij} : variable que adquiere el valor de cada observaciones.

$$SS(Tr) = \frac{\sum_{I=1}^K * T^2_i}{n} - C \tag{2.10}$$

Donde:



SS(Tr): suma de cuadrado 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.

2.8.3. Prueba de intervalos múltiples de Duncan

El test, desarrollado por Duncan es ampliamente 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:

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

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

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

$$R_p = r_\alpha(p, f) S_{yit} \quad (2.13)$$

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

A seguir, una nueva diferencia entre las medias es calculada, comenzando con la próxima mayor versus la próxima menor, y entonces comparada con $R_{\alpha-1}$. 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.

2.8.4. Estimación bayesiana

En la estimación bayesiana, las creencia previa sobre posibles valores de μ son combinadas con evidencias muestrales directas. Esto conduce a una distribución a posteriori de μ , que en condiciones bastantes generales puede aproximarse por una distribución normal con: (Miller *et al.* 2005).

$$\mu_1 = \frac{n \cdot [\bar{X}] \cdot \sigma_0^2 + \mu_0 \sigma^2}{n \cdot \sigma_0^2 + \sigma^2} \quad (2.14)$$

Dónde:

μ_1 : media posteriori de la estimación bayesiana.

n : tamaño de la muestra.

σ_0 : desviación típica a priori

σ^2 : desviación típica obtenida, cuando la muestra es grande $\sigma^2 = s$

\bar{X} : media de la muestra.

2.8.5. Ajuste de curva por regresión

El ajuste de curva por regresión se basó en el método de mínimo cuadrado, el cual se basa en el ajuste de una curva al conjunto de puntos ordenados, tal que se logra minimizar la distancia existente entre los puntos definidos por la recta ajustada y los puntos correspondientes. El método de mínimo cuadrado se expresa por un sistema de ecuaciones normales (Miller *et al.* 2005), la cuales se muestran a continuación.

$$\sum_{i=1}^n Y_i = a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.15)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i = a \cdot \sum_{i=1}^n X_i + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (2.16)$$

Donde:

X_i : es la variable que adquiere los valores de la axisa.

Y_i : es la variable que adquiere los valores de ordenada.

En este conjunto de ecuaciones lineales a y b son las incógnitas, y dan los valores de la a y b para la línea con el mejor ajuste a un conjunto de datos apareados de acuerdo con el criterio de mínimos cuadrados.

Este sistema de ecuaciones tiene como solución las siguientes expresiones para el cálculo de a y b .

$$a = Y - b \cdot X \quad (2.17)$$

Donde:

Y : es el promedio aritmético de las observaciones referidas a la ordenada.

$$b = \frac{S_{XY}}{S_{XX}}$$

Notaciones especiales

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - [\sum_{i=1}^n X_i]^2 / n \quad (2.18)$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i - \frac{[\sum_{i=1}^n X_i] \cdot [\sum_{i=1}^n Y_i]}{n} \quad (2.19)$$

La bondad del ajuste realizado con el método de mínimo cuadrado se verificó utilizando tres criterios: el del coeficiente de determinación, de Student, y el de Fisher. Se consideró que el ajuste es significativo: según el criterio de Student, cuando se cumplió que p -Valor es inferior al nivel de significancia adoptado en la prueba; según el criterio de Fisher, cuando el Fisher de cálculo es mayor que el Fisher crítico o tabulado y según el criterio del coeficiente de determinación, cuando el valor de este estuvo próximo a 1 ó -1.

En el Software Excel se utilizó la herramienta para análisis de datos que contiene programado la opción regresión, la misma permitió realizar el ajuste de curva con el método de mínimo cuadrado y chequear los tres criterios de bondad del ajuste.

2.9. 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 del desgaste 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:

2.9.1. 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.

$$Cam = Far \cdot Cur; CUC \quad (2.20)$$

Donde:

Far - Frecuencia anual de rotura de los rodillos.

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

2.9.2. 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:

$$Cmo = Sut \cdot t_{empleado}; CUP \quad (2.21)$$

Donde:

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

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

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

Para determinar la cantidad de producción afectada, se utilizará la ecuación 2.22 y tendrán en cuenta los siguientes fundamentos:

1. 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.

2. La cantidad de mineral laterítico que se necesita para la obtención de cierta cantidad de sinter níquel + cobalto.
3. El precio actual en el mercado mundial de una tonelada de níquel.

$$Cap = t_{parada} \cdot Cpa \cdot Pum; CUC \quad (2.22)$$

Donde:

t_{parada} - Tiempo de parada, h .

Cpa - Cantidad de producción afectada, tn/h .

Pum - Precio unitario del material, CUC .



2.10. Conclusiones del capítulo 2

- Se exponen las expresiones matemáticas y procedimientos que permiten la caracterización del desgaste de los rodillos radiales del transportador Jacobi y se plantean las características del micrómetro exterior utilizado.
- Se plantean las expresiones matemáticas que permiten evaluar los resultados obtenidos en la investigación realizada, posibilitando la estimación del costo asociado al proceso de desgaste de los rodillos.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

En el presente capítulo se analizan los resultados obtenidos a partir de las mediciones planteadas 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. Además se realiza una valoración económica de la evaluación del desgaste de los rodillos, así como el impacto ambiental 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 selección de la muestra se realizó enumerando lotes de rodillos disponibles en la planta de horno de reducción de la empresa Productora de Niquel Comandante Ernesto Che Guevara. Los rodillos nuevos se escogieron aleatoriamente de un lote que contenía 40 rodillos y los rodillos viejos de un lote de 34 rodillos.

Antes:

La representatividad de la muestra se verifica considerando la ecuación 2.1 expuesta anteriormente. Las cantidades involucradas en la referida ecuación adquieren los siguientes valores: $Z_{\alpha/2} = 1,96$; $\alpha = 0,05$; $S = 0,316$ y $d = 0,18$. Lo que permitió determinar que el tamaño requerido de la muestra es de 2 unidades.

Las cantidades d , s , $Z_{\alpha/2} = 1,96$; $\alpha = 0,05$ se determinan sobre la base de los resultados de las mediciones del diámetro exterior de los rodillos, realizada por Prieto (2014) y aplicando la ecuación 2.5.

Después:

La representatividad de la muestra para este caso se verifica considerando la ecuación 2.1 que se expuso en el capítulo anterior. Las cantidades involucradas en la referida

ecuación adquieren los siguientes valores: $Z_{\alpha/2} = 1,96$; $\alpha = 0,05$; $S = 0,361$ y $d = 0,21$. Lo que permitió determinar que el tamaño requerido de la muestra es de 2 unidades.

Las cantidades d , s , $Z_{\alpha/2} = 1,96$; $\alpha = 0,05$ se determinan sobre la base de los resultados de las mediciones del diámetro exterior de los rodillos, realizada por Prieto (2014) y aplicando la ecuación 2.5.

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). Por lo tanto se escogió una muestra de 24 rodillos, 12 antes de la puesta en explotación y 12 después de la puesta en explotación.

3.3. Análisis del diagrama causas - efecto

A continuación se muestra en la Figura 3.1 el diagrama de dispersión, que refiere el comportamiento de las variaciones del diámetro de rodillos después de la puesta en explotación.

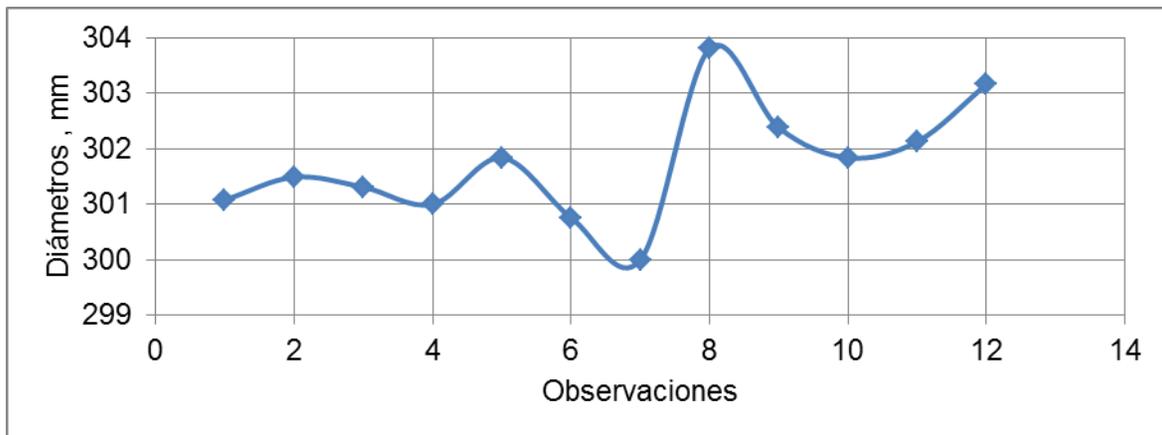


Figura 3.1. Diagrama dispersión del comportamiento del diámetro de los rodillos después de la puesta en explotación.

La observación de la figura anterior revela que el diámetro de los rodillos retirados, muestra fluctuaciones, lo que indica que no todos se desgastan por igual. Se aprecia que hay marcadas diferencias entre los valores extremos de la curva que representa el comportamiento de la variable; variando en el rango de 300 a 303,9 mm. Al comparar los valores extremos referidos con el diámetro estándar inicial de los rodillos, el cual es de 305,32 se sospecha que hay subutilización del material de los rodillos.



La realización de otro análisis para determinar las causas que provocan la variabilidad del diámetro de rodillos retirados, se efectuó a través de una reunión con diferentes funcionarios que laboran en la planta: técnico de mantenimiento, mecánicos operarios, jefe de mantenimiento entre otros, donde los mismos presentaron como principales causas influyentes, la alineación de los equipos de laboreo (transportadores), la carga a la que están sometidos los rodillos, las altas condiciones ambientales corrosivas, y esencialmente las fallas de los rodamientos.

Las posibles causas potenciales que provocan la variación de la cantidad de rodillos retirados son:

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

Dentro de estos se pueden encontrar los siguientes factores como se muestran a continuación:

- | | | |
|--------------------------------|---|--|
| 1. Régimen de trabajo | { | <ul style="list-style-type: none">- Fuerza- Velocidad de rotación- Tiempo de explotación- Temperatura de trabajo- Nivel de vibraciones |
| 2. Recursos humanos | { | <ul style="list-style-type: none">- Técnico de Mtto- Supervisores- Mecánicos |
| 3. Recursos materiales | { | <ul style="list-style-type: none">- Llantas- Líquido refrigerante |
| 4. Características del rodillo | { | <ul style="list-style-type: none">- Acabado superficial- Rodamientos- Dureza- Empaquetaduras |

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 3.2.

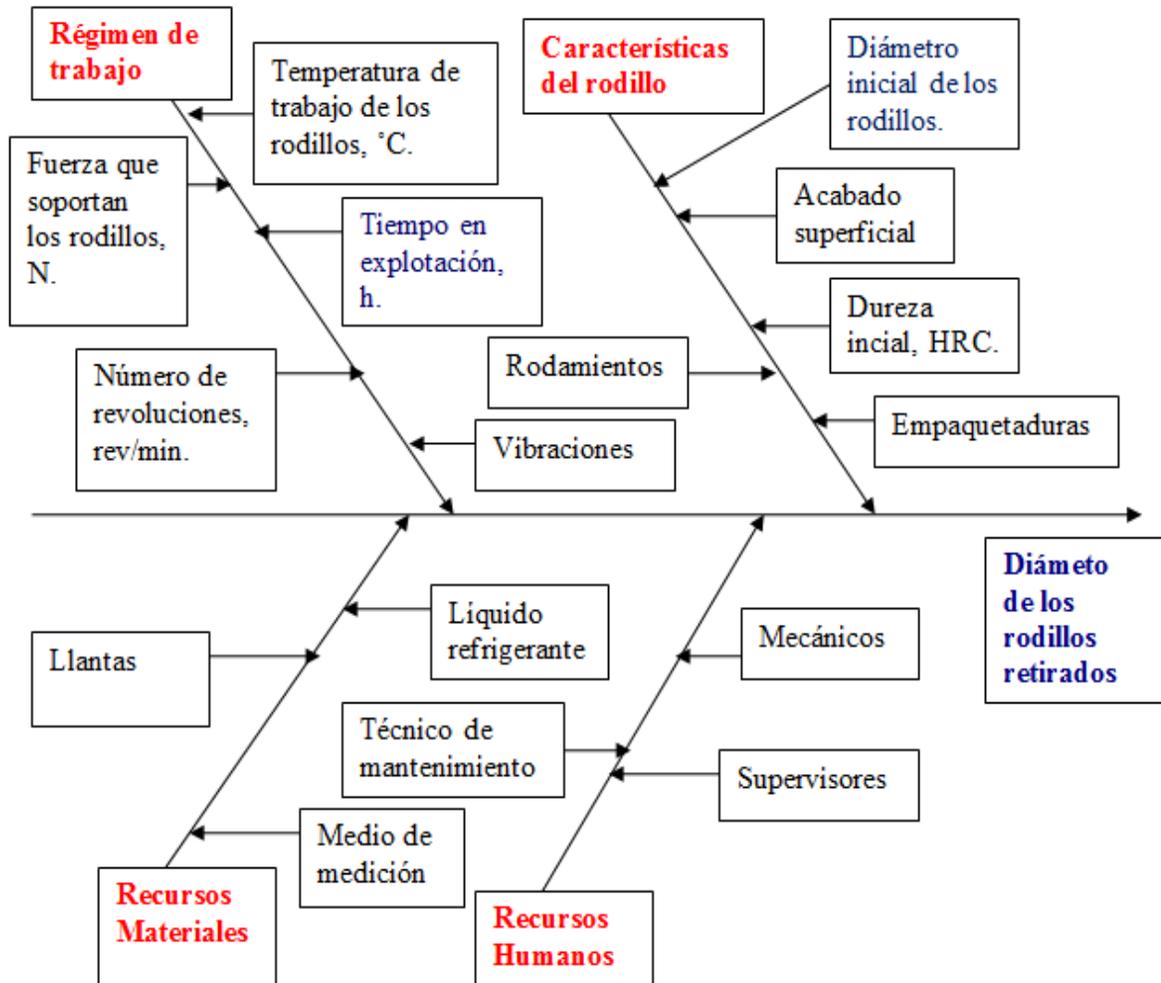


Figura 3.2. Diagrama de causas - efecto del comportamiento del diámetro de los rodillos viejos.

En la figura anterior se muestra que el diagrama representado puede servir para elaborar planes de mejora de la calidad futura, ya que muestra los factores que hipotéticamente influyen en el nivel de desgaste. Por ejemplo, en el caso de los recursos materiales se puede evaluar la posibilidad de incidir en la variación del diámetro (nivel de desgaste), utilizando líquidos refrigerantes menos corrosivos, en otros casos teniendo en cuenta las características de los rodillos, se puede seleccionar rodamientos más adecuados y propiciando el nivel de acabado y dureza adecuados. Esto se puede armonizar utilizando estrategias de diseño estadístico experimental, considerando las técnicas del análisis de varianza y los ajustes de curvas.

3.4. Resultado del experimento

La tabla 3.1 muestra los resultados de las mediciones realizadas al diámetro exterior de los rodillos radiales del transportador Jacobi, antes y después de la puesta en explotación. Las mediciones se realizaron para 12 rodillos nuevos y 12 rodillos viejos, escogidos aleatoriamente.

Tabla 3.1. Resultados del experimento para el análisis del desgaste.

Observaciones	(después)	(antes)
1	301,08	305,36
2	301,49	305,09
3	301,31	305,36
4	301	304,20
5	301,84	304,64
6	300,76	305,14
7	300	304,66
8	303,80	304,01
9	302,38	305,24
10	301,84	305,01
11	302,13	304,28
12	303,16	305,54

3.5. Análisis del comportamiento del diámetro

Este análisis se realizó para 12 rodillos como muestra seleccionados aleatoriamente, donde se ejecutaron las mediciones del diámetro antes y después de la explotación para determinar el comportamiento de la variación; comprobar si existe algún tipo de anomalía y además determinar la magnitud del desgaste. Para el análisis se aplican desde las ecuaciones 2.2 a la 2.7.

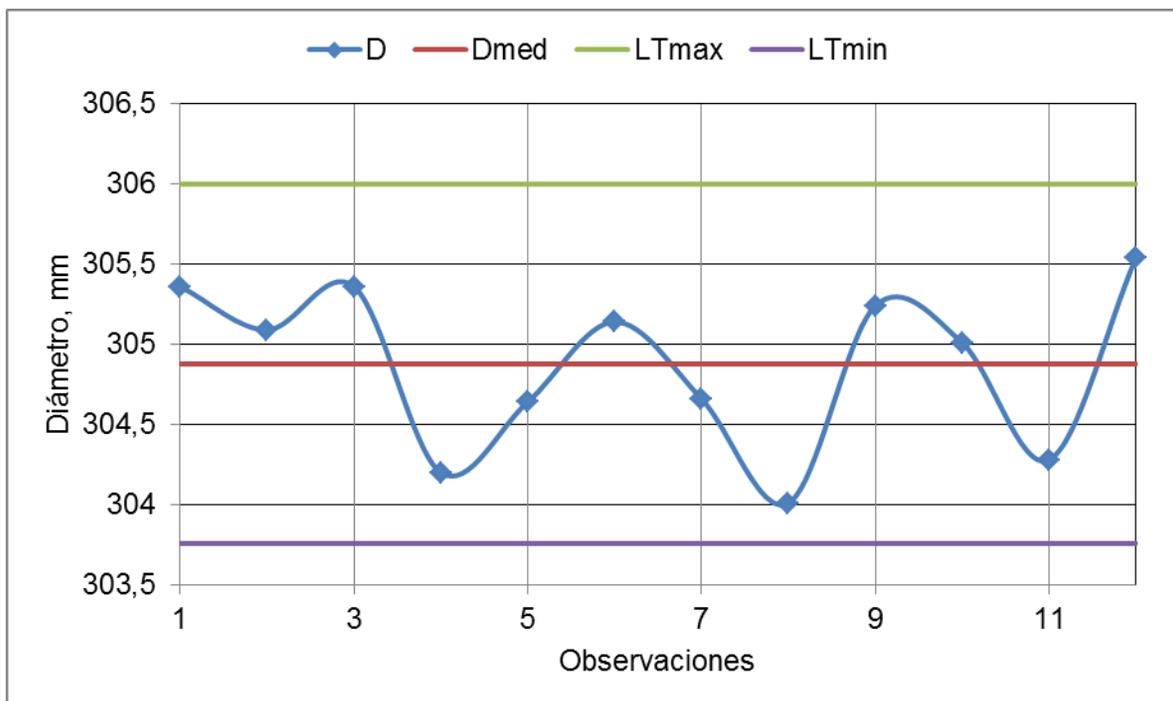
3.5.1. Análisis del comportamiento del diámetro exterior de los rodillos nuevos

A continuación se muestra en la tabla 3.2 las mediciones realizadas para las 12 muestras tomadas de acuerdo con el diámetro de los rodillos antes de la puesta en explotación; o sea a los, 12 rodillos nuevos listos para su montaje.

Tabla 3.2. Diámetro de los rodillos antes de su explotación.

Observaciones	Diámetros (mm)
1	305,36
2	305,09
3	305,36
4	304,2
5	304,64
6	305,14
7	304,66
8	304,01
9	305,24
10	305,01
11	304,28
12	305,54

Las mediciones con respecto al diámetro fueron tomadas con un micrómetro como se expuso en el capítulo anterior, las mismas se tomaron en una parte del elemento, el centro. A continuación se muestra en la Figura 3.3 el diagrama de control para las mediciones del diámetro de los rodillos antes de su explotación.

**Figura 3.3.** Diagrama de control del diámetro de los rodillos antes de su explotación.

El análisis de la figura anterior muestra que el proceso está bajo control estadístico, ya que no existen puntos fuera de los límites de control; la variable presenta un comportamiento normal. Estos valores están condicionados por el nivel de confianza especificado, el cual fue de un 95 % ($t_{0,025} = 2,201$ con $\nu = n - 1 = 12 - 1 = 11$ grados de libertad). Los límites de tolerancia para el diámetro de los rodillos son: límite inferior de 303,76 mm y el límite superior de 306 mm, y un valor promedio para el diámetro igual a 304,88 mm. Esto representa que cada observación que se efectúe del diámetro 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 el diámetro de los rodillos es de 304,88 mm, pues este valor está comprendido dentro de la banda de tolerancia.

3.5.2. Análisis del comportamiento del diámetro exterior de rodillos viejos

Partiendo de las condiciones planteadas se realizó el mismo análisis para los rodillos una vez retirados de su explotación, para determinar, a través del control de las mediciones, las variaciones existentes y la magnitud del desgaste en estos elementos.

La tabla 3.3 que a continuación se muestra representa las mediciones relativas al diámetro de los rodillos después de su explotación.

Tabla 3.3. Diámetro de los rodillos después de explotación.

Observaciones	Diámetro, mm
1	301,08
2	301,49
3	301,31
4	301
5	301,84
6	300,76
7	300
8	303,8
9	302,38
10	301,84
11	302,13
12	303,16

Una vez obtenidas estas mediciones se realiza el diagrama que muestra el comportamiento de las mediciones del diámetro de los rodillos correspondientes, después de su explotación, como se muestra a continuación en la Figura 3.4.

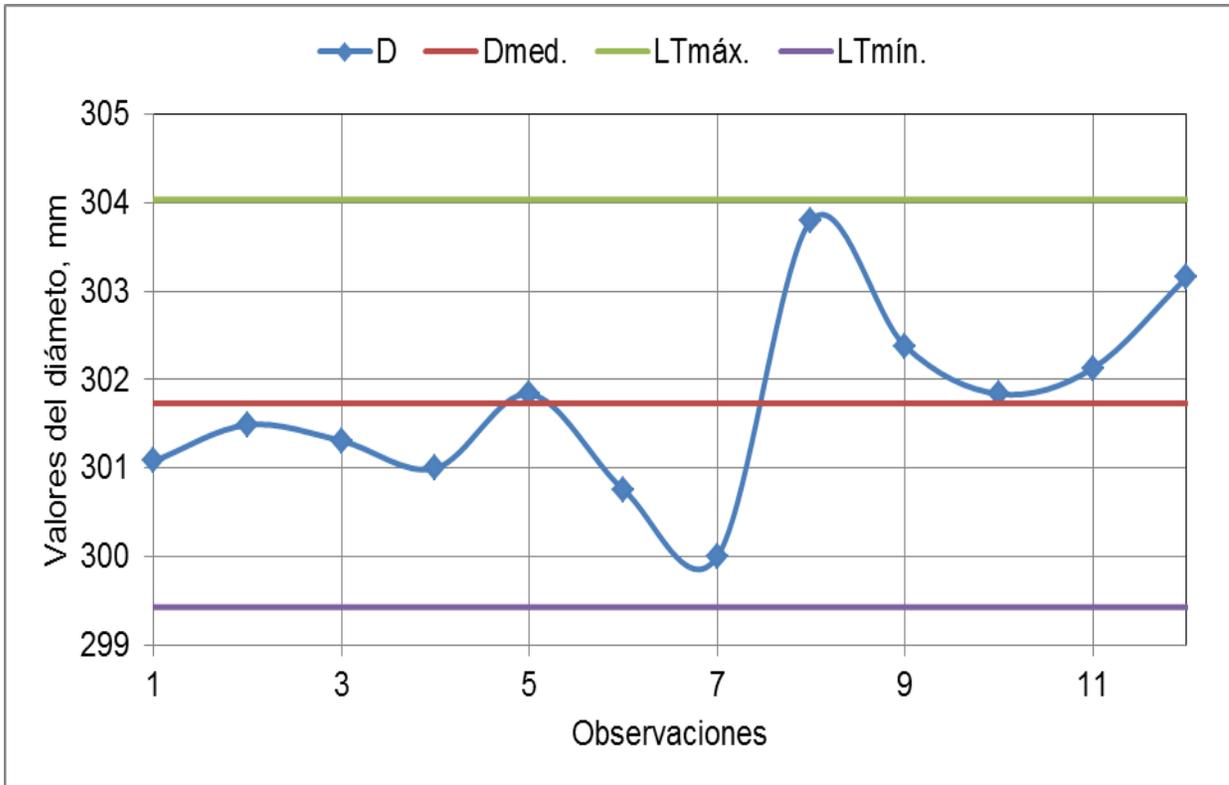


Figura 3.4. Diagrama de control del diámetro de los rodillos después de explotación.

La figura anterior muestra que el proceso está bajo control estadístico, ya que no existen puntos que sobrepasen los límites de control; la variable muestra un comportamiento normal. Estos valores están establecidos por el nivel de confianza descrito; de un 95 % ($t_{0,025} = 2,201$ con $\nu = n - 1 = 12 - 1 = 11$ grados de libertad), donde los límites de tolerancia para el diámetro de los rodillos son: límite inferior de 299,43 mm y límite superior de 304,04 mm y un valor promedio para el diámetro igual a 301,73 mm. Esto significa que cada medición efectuada del diámetro 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 el diámetro de los rodillos es de 301,73 mm después de su explotación, pues este valor está comprendido dentro de la zona de tolerancia.

3.5.3. Análisis de variación del diámetro

La tabla 3.4 refiere las variaciones relativas del diámetro exterior de los rodillos. La caracterización de las variaciones en las variables estudiadas se realizó según las ecuaciones 2.2 y 2.3 expuestas en el capítulo anterior.

Tabla 3.4. Variación del diámetro de los rodillos.

Ecuación	Parámetros	Valores	U/M
2.2	Variación absoluta del diámetro	-3,15	mm
2.3	Variación relativa del diámetro	1,037	%

En la tabla anterior se aprecia que la variación absoluta del diámetro es de -3,15 mm y la relativa 1,037 %. El signo negativo de la variación absoluta indica que el diámetro disminuye con el transcurso del tiempo y el valor de 3,15 refiere que el desgaste en la dirección diametral es de 3,15 mm.

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 12 por coincidencia con la serie de la tabla de número aleatorio. El supuesto de 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 homogeneidad de la variancia, esto es que se obtienen resultados bastantes confiables aun violándose dicha condiciones; además, Montgomery (2002) refiere que se hace más necesario la verificación del cumplimiento del supuesto de homogeneidad cuando el experimento es desbalanceado, esto es cuando la cantidad de observaciones por tratamiento no es la misma.

La observación de los valores contenidos en la tabla 3.5 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 homogeneidad.

Tabla 3.5. Diámetro de los rodillos antes y después de su explotación.

Observaciones	Diámetros (después)	Diámetros (antes)
1	301,08	305,36
2	301,49	305,09
3	301,31	305,36
4	301	304,20
5	301,84	304,64
6	300,76	305,14
7	300	304,66
8	303,80	304,01
9	302,38	305,24
10	301,84	305,01
11	302,13	304,28
12	303,16	305,54

En la tabla 3.6 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 3.6. Resultados del cálculo de F.

Análisis de variancia					
Origen de las variaciones	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Crítico para F
Tratamientos	1	59,35	59,35	87,63	4,30
Error	22	14,90	0,677		
Total	23	74,24			

A partir de los resultados mostrados en la tabla anterior 3.9 se formula la siguiente decisión:

- Puesto que el valor de Fischer calculado es mayor que el valor de Fischer crítico ($87,63 > 4,30$) la hipótesis nula se rechaza, en otras palabras si existe diferencias significativas entre los diámetros que poseen los rodillos del transportador Jacobi antes 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 2.10 a la 2.11 expuesta en el capítulo anterior. La misma se aplica para comparar los resultados obtenidos, agrupar las diferencias que no son significativas y contractar a la prueba de Fisher; se compara los valores del diámetro de los rodillos antes y después de la puesta en explotación. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Resultados de la prueba de Duncan.

Comparaciones múltiples	Rango de mínima significancia (Rp)	Diferencias
Desgaste de los rodillos antes y después de la explotación.	0,70	3,14

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

- Existe diferencia significativa entre las medias de los diámetros 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 considerados ($0,70 < 3,14$).

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 estimación bayesiana

Este análisis se efectúa teniendo en cuenta la ecuación 2.14 planteada en el capítulo anterior. La misma se utiliza para calcular la media posteriori antes y después de la puesta en explotación, para ello se tuvieron en cuenta algunos parámetros calculados como $n = 12$; $\bar{X} = 304,88 \text{ mm}$; $\sigma_0 = S = 0,316 \text{ mm}$; $\sigma = 0,508 \text{ mm}$ y $\mu_0 = 304,78 \text{ mm}$ para antes de la puesta en explotación y $n = 12$; $\bar{X} = 300,17 \text{ mm}$; $\sigma_0 = S = 0,361 \text{ mm}$; $\sigma = 1,047 \text{ mm}$ y $\mu_0 = 301,73 \text{ mm}$ para después de la puesta en explotación. Los resultados alcanzados se muestran a continuación en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Resultados de la estimación bayesiana.

Ecuación	Parámetros	Valores	U/M
2.14	Media posteriori antes de la puesta en explotación	304,86	mm
2.14	Media posteriori después de la puesta en explotación	301,09	mm
2.2	Variación absoluta del diámetro.	-3,78	mm

En la tabla anterior se aprecia que la variación absoluto del diámetro es de -3,78 mm. Dicho valor posee mayor probabilidad de ocurrencia que el de 3,15 mm, de acuerdo con Miller *et al.* (2005).

Se concluye sobre la base de lo planteado por Navarrete y González (1986) que los rodillos están presentando un desgaste muy superior al recomendado en la norma de referencia, pues 1,575 mm y 1,89 mm son mucho mayor que 0,01mm. No obstante se debe tener en cuenta que la determinación exacta de las magnitudes de los desgaste límites de piezas, es una tarea difícil, partiendo de las exigencias específicas que imponen a ellas, de acuerdo con Navarrete y González (1986).

3.8. Determinación de la relación entre la dureza y el desgaste

En el Anexo 2 se muestran los valores obtenidos de la dureza y el diámetro de los rodillos antes y después de la puesta en explotación. Los resultados mostrados incluyen las mediciones de dureza realizadas por Leyva (2014).

La Figura 3.5 muestra el comportamiento de la dureza de los rodillos vistos aleatoriamente en dos momentos de su período de explotación. Se observa que la dureza disminuye de conjunto con el diámetro, o sea a medida que disminuye el diámetro de los rodillos la dureza también disminuye.

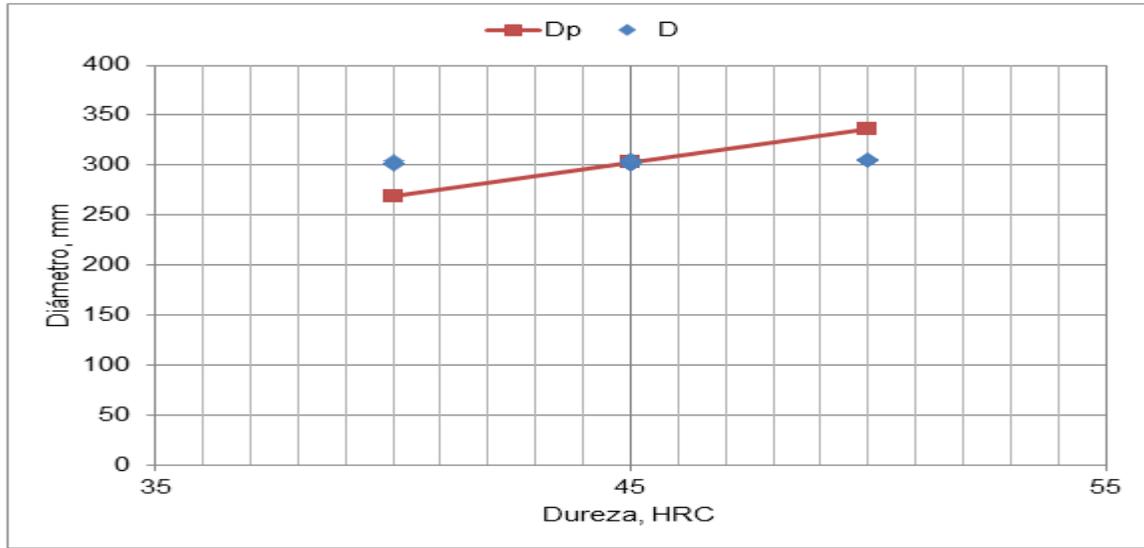


Figura 3.5. Comportamiento del diámetro exterior de los rodillos en función de la dureza superficial.

La tabla 3.9 muestra el modelo matemático que relaciona al diámetro de los rodillos con la dureza superficial y los criterios de idoneidad del modelo ajustado. Se aprecia que la representación de la relación entre la dureza superficial y el diámetro por un modelo lineal es significativa al nivel de confianza del 95 %, puesto que se cumplen con todos los criterios de idoneidad, o sea el coeficiente de correlación está próximo a la unidad, el Fisher calculado es mayor que el Fisher crítico y la probabilidad para la intersección es menor que 0,05.

Tabla 3.9. Relación entre la dureza y el diámetro.

Modelo	Parámetros	Criterio de idoneidad	Ec.
$D = 6,728 \cdot H$	H-Dureza superficial del rodillo, HRC. D- dimetro exterior del rodillo, mm.	$r = 0,997$ $F_{cal.} = 3\ 720,83$ $F_{crit.} = 4,88 \cdot 10^{-26}$ $P = 6,09 \cdot 10^{-27}$	3.1

3.9. Valoración económica

Para el análisis económico del trabajo de caracterización del desgaste de los rodillos se tuvieron en cuenta algunos factores económicos que influyen en los diferentes costos o

gastos que se incurren en 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 2.12 del capítulo anterior:

Tabla 3.10. Valoración económica

Ecuación	Indicadores	Valores	U/M
2.15	Costo anual de materiales	131 825,8	CUC
2.16	Costo de la mano de obra	3 796,8	CUP
2.17	Costo de afectación a la producción	2 580 877,4	CUC

Estos resultados se obtuvieron de acuerdo con las ecuaciones expuestas; 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 158,2 CUP/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/m.

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, afectación a la planta por un gasto de 2 716 500,08 CUC anuales. Por lo que todo trabajo que se lleve a cabo en aras de aumentar la longevidad de los rodillos y llamar la atención en el sentido de plantear el problema posee valor, el cual es difícil de cuantificar en términos de los beneficios que aporta.



3.10. 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 los transportadores 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.



3.11. Conclusiones del capítulo 3

- Se efectúa la identificación de las causas que hipotéticamente pueden estar influyendo en el comportamiento de las fluctuaciones observadas en la variable diámetro de los rodillos viejos. Se destaca que en general los factores potenciales de posibles influencias son los recursos humanos, los recursos materiales, el régimen de trabajo y las características de los rodillos y esencialmente, los rodamientos internos, lo cual se refleja en su tiempo de vida útil.
- Se determinó que el nivel de desgaste presentado en los rodillos es significativo al nivel de confianza del 95 %, el cual oscila en el rango de 1,575 mm a 1,89 mm, siendo mucho mayor que el admitido por norma (0,01mm).
- Se calculó un modelo matemático que expresa la relación entre la dureza superficial y el comportamiento del diámetro de los rodillos durante el período de explotación escogido, el cual indica que la dureza de los rodillos disminuye a medida que se incrementa el desgaste (disminución del diámetro).
- 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

- La revisión bibliográfica y sistematización del contenido permitió determinar que se han tratado de fabricar rodillos con calidad para el transportador de Jacobi. Pero es insuficiente la caracterización del desgaste en relación con los factores de los que depende y las especificaciones de referencia para controlarlo.
- La identificación de las causas que hipotéticamente pueden estar influyendo en el comportamientos de las fluctuaciones observadas en la variable diámetro de los rodillos viejos permitió determinar que en general los factores potenciales de posibles influencias son los recursos humanos, los recursos materiales, el régimen de trabajo y las características de los rodillos y esencialmente, los rodamientos internos, lo cual se refleja en su tiempo de vida útil.
- Se determinó que en los rodillos se están presentando un nivel de desgaste significativo al nivel de confianza del 95 %, el cual oscila en el rango de 1,575 mm a 1,89 mm, siendo mucho mayor que el admitido por norma (0,01mm).
- Se determinó un modelo matemático que establece la relación entre la dureza superficial y el comportamiento del diámetro de los rodillos para el período de explotación analizado, el cual refiere que la dureza de los rodillos disminuye a medida que se incrementa el desgaste (disminución del diámetro).
- La valoración de la incidencia económica y ambiental del trabajo realizado. El costo total en el que se incurre por retirar 9 rodillos al mes se estimó en 2 716 500,08 CUC anual. 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. Mantener la limpieza de la instalación y las normas sanitarias requeridas.
2. Evaluar la posibilidad de utilizar otra marca de rodamiento para los rodillos y aplicar el sistema de lubricación adecuado.
3. Efectuar un adecuado control de cada operación y de la salida del producto terminado, no permitiendo variación en la calidad de los materiales o sustituirlos por otros con menos calidad de la requerida ni el uso de elementos mal almacenados o mal transportados que altere sus propiedades.
4. Evaluar la posibilidad de introducir modificaciones en el material de los rodillos, considerando la variante de reajustar la composición química o experimentar con otro material; teniendo en cuenta que la resistencia al desgaste se incrementa con el aumento del contenido de carbono hasta en el rango de 0,6 a 0,8 % y de la dureza, la inclusión de pequeñas cantidades de elementos aleantes (níquel, cromo, silicio, magnesio).
5. Evaluar la posibilidad de emplear el método de deformación plástica superficial con rodillos como alternativa tecnológica para mejorar la resistencia al desgaste mediante el incremento de la dureza y disminución de la rugosidad superficial, con mayor eficiencia técnico-económico y menor contaminación ambiental que los tratamientos tradicionales.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez, E; G, M. *Estudio del comportamiento de factores que intervienen en el desgaste. Investigaciones científicas. UCLV. Año 20. N 2. Mayo-Agosto. 1995. p 69-76.*
2. Álvarez. L, González. *Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Revista construcción de maquinaria. Santa Clara, No2: 69-76, 1999.*
3. Aguilar, M. *Diseño de una máquina tribológica para pruebas de desgaste abrasivo severo, Tesis de Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Febrero de 2002.*
4. 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.*
5. 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.*
6. Abad, H. *Comportamiento microestructural de las capas en los pasadores de los equipos de laboreo minero. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2009.*
7. Alcántara, D. *Comportamiento del desgaste en pasadores de equipos de laboreo minero fabricados de acero AISI 1045. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2012.*
8. Bicking A, C. *Algunos usos de la estadística en la Planificación de Experimentos. El Control de la calidad en la industria. Vol. 10 No. 4, Enero 1954*
9. Batista, Y. *Evaluación de la tecnología de fabricación por fundición del rodillo del transportador rotatorio (Jacobi). Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2007.*



10. Caubet, J.J. "Teoría y Práctica Industrial del rozamiento". España, 1971.
11. Calero A. *Técnicas de muestreo*. Editorial pueblo y educación. Ciudad Habana. 1976. 506 p.
12. COX D. R. *Planificación de Experimentos*. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1975.
13. Clauser, H. R. *Diccionario de materiales y procesos de ingeniería*. Editorial Labor S.A. Barcelona, 1985.
14. Callister W. D. *Materials Science and Engineering. An Introduction*. Ed. John Wiley & Sons. Inc. Publishers. 1997.
15. Chacín, F. *Diseño y análisis de experimentos I*. Ed. FEPUVA – UCV. Caracas, Venezuela. 2000. p 388
16. Chen, Z; et al. (2000). *Yield surfaces of fcc crystals with crystallographic slip and mechanical twinning*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China.Vol.10. No.1. P.34-39. Disponible en la World Wide Web.
17. Escanaverino, J. M. *Teoría y práctica del rozamiento*. La Habana, 1986.
18. Enciclopedia Kiwix, 2010.
19. Feingenbaum, A. V. *Control total de la calidad*. Instituto Cubano del libro, La Habana 1971.
20. Fleischer, F. *Tribología y Fiabilidad*. Mandeburgo .1985.
21. Fausto del C. Hernández, *Metrología dimensional*, 1986.
22. Ferré, J. Rius, F. X. *Técnicas de Laboratorio 274 648 - 652*. 2002.
23. 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/>.
24. Guliaev, A. *Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir*. 1983. Pág. 53-8932. Guliaev, A. *Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir*. 1983. Pág. 17-22.
25. González et al. *Análisis de regresión y series cronológicas*, 2004.
26. Hernández, F. *Metrología dimensional*, 1986.



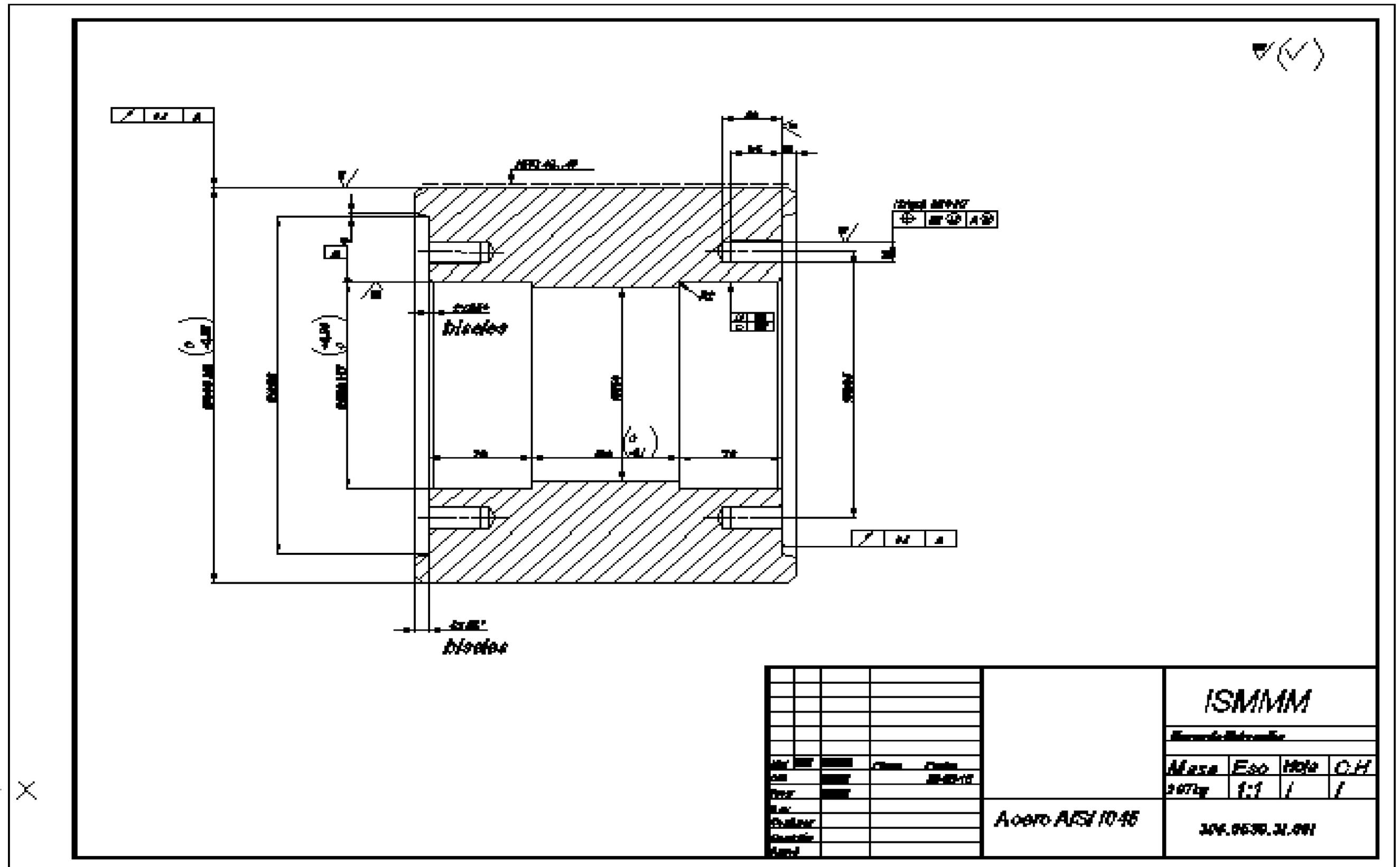
27. John J. W Neuner. *Contabilidad de costos*, 1975.
28. Bower, A F; Johnson, K L. *The Influence of Strain Hardening on Cumulative Plastic Deformation in Rolling and Sliding Line Contact*. J. Mech. Phys. Solids. Vol. 37, no. 4, pp. 471-493. 1989.
29. Jurán, J.M. *Manual de Control de la Calidad. 4ta. Edición. Parte 1 – 5*, 1993.
30. Kempthorne O. *The Design and Analysis of Experiments. John Wiley and Sons. , New York, 1952, p.10.*
31. 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.*
32. Leyva, B. *Tolerancia dimensional en pasadores elaborados de acero AISI 1045 deformados por rodadura. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2012.*
33. Leyva, B. *Diagnóstico y pronóstico de las fallas de los rodillos del transportador Jacobi .Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2014. Revista Minería y Geología. Disponible en <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/>.*
34. Martínez, F. Martínez, H. *Adaptación de máquinas pulidoras para ensayos de desgaste abrasivo. Revista construcción de maquinaria. Santa Clara. No 1: 47-55. 1981.*
35. Méndez, I. *Lineamientos Generales para la planeación de Experimentos. Monografía No. 15, Vol. 15 IIMAS. 1980.*
36. Navarrete, E y Gómez, J. *Mantenimiento industrial. Facultad de construcción de maquinaria, departamento de mecánica industrial ISPJAE. La Habana. 1986.*
37. Mazón et al. *Contabilidad de costos*, 2005.
38. Miller et al. *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*, 2005.
39. Omarov A, M. *Análisis económico de la actividad de la empresa*, 1976.



40. Oliveros, E. *Desgaste de los rodillos radiales de los transportadores sinfín para mineral laterítico. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2011.*
41. Prieto, R. *Caracterización de las falas de los rodillos radiales del transportador Jacobi. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2013.*
42. Pero-Sanz, J. A et al: *Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Madrid: DOSSAT, 2000.*
43. Poll, Y. *Determinación del comportamiento de la dureza superficial de los rodillos radiales del transportador Jacobi. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2014.*
44. Rodríguez, Y. N. *Estudio del deterioro por abrasión e impacto de los martillos de las trituradoras para óxido de níquel en la Planta de Calcinación y Sínter de la Empresa Ernesto Guevara. ISMM. Moa. 1998. 50 p.*
45. Rodríguez, A. *Desgaste en cojinetes de deslizamiento. Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2003.*
46. Rodríguez, A. *Procesos y equipos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, 2006.*
47. Rodríguez, A. *Solidificación en piezas fundidas de acero de medio contenido de carbono del tipo 55 F. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2008.*
48. Stankoimport, M. *Servicio o instrucción manual de máquinas y equipos. Empresa Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed de Beche. 1977.*
49. Shigley, J. E. *Diseño en Ingeniería Mecánica. Editorial McGraw Hill, 1990.*



50. Sarache, L. *Diseño de Experimentos y Análisis Multifactorial Aplicado a la Industria. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida. Venezuela. 585 – 590. 2001.*
51. Sarache L. y M. Peña. *Software para el uso del Diseño Multifactorial de Dos Niveles en la Investigación SEMPRO 2". 5^{to}. Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Mérida, Venezuela. 2004.*
52. Stankoimport, M. *Servicio o instrucción manual de máquinas y equipos. Empresa Mecánica del Níquel Gustavo Machín Hoed de Beche. 2004.*
53. Sagaró et al. *Comportamiento al desgaste abrasivo del acero 65 Mn 4, con y sin tratamiento térmico, empleado en los martillos de molino. Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2007.*
54. *Software Microsoft Word.*
55. *Software Microsoft Excel.*
56. *Software Auto Cad 2000.*
57. Vélez, R, Hernández, V. *Cálculo de probabilidades I. Madrid: UNED; 1995.*
58. Verdeja, L, González, R. *El desgaste de materiales en el crisol de horno alto: conceptos generales. Revista de minas. Madrid: No 13 -14, 1996.*
59. Walpole, R, et al. *Probabilidad y Estadística para Ingenieros, 2008.*





Anexo 2

Tabla 1. Valores de dureza y diámetros de los rodillos.

Observaciones	Dureza de los rodillos	Diámetro de los rodillos
1	45	301,08
2	40	301,49
3	40	301,31
4	45	301
5	40	301,84
6	45	300,76
7	40	300
8	40	303,8
9	40	302,38
10	45	301,84
11	40	302,13
12	45	303,16
13	50	305,36
14	45	305,09
15	50	305,36
16	50	304,2
17	45	304,64
18	45	305,14
19	45	304,66
20	50	304,01
21	50	305,24
22	45	305,01
23	50	304,28
24	45	305,54