

REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECHANICA
DEPARTAMENTO. INGENIERIA MECANICA

TRABAJO DE DIPLOMA

~~TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO~~
TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TITULO: Desgaste en los pasadores de esteras de los tractores KOMATSU D85P-21

AUTOR: Liosmanys Díaz Barzagas.

TUTORES: Ing. Dayanis Alcántara Borges.

Msc. Tomás Fernández Columbié

Msc. Isnel Rodríguez González

CURSO 2007-2008
"Año 50 de La revolución"

Moa 2008



Declaración de Autoridad:

Yo: Liosmanys Díaz Barzaga.

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

.....
Autor. Liosmanys Díaz Barzaga.

.....
Tutor: Ing. Dasyanis alcántara Borges

.....
Tutor: MsC. Tomás Fernández Colubí

.....
Tutor: MsC. Isnel Rodríguez Gonzáles



PENSAMIENTO

"Puesto que usted ha decidido que nuestra suerte está echada, tengo el placer de despedirme como los gladiadores romanos que iban a combatir en el circo: Salve, Cesar, los que van a morir te saludan. Solo lamento que no podría siquiera verle la cara, porque en ese caso usted estaría a miles de kilómetros de distancia, y yo estaré en la primera línea para morir en defensa de mi patria".

Fidel Castro Ruz



DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y familiares así como a mis tutores y compañeros por todo el apoyo y dedicación durante mis estudios y a toda aquella persona que de una forma u otra cooperó para mi desempeño como un profesional.

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

"Dedico la culminación de este trabajo y éxito"



AGRADECIMIENTOS

Con la realización de este trabajo quiero agradecer un colectivo de personas que colaboraron con su ayuda y confianza para ser posible el desarrollo del mismo, a mis tutores: Msc. Tomás Fernández Columbié, M.sc. Isnel Rodríguez Gonzáles, Ing. Dayanis Alcántara Borges, por estar siempre dispuesto en lo que necesitaba.

A mis padres Lilia Barzaga Batista y Felipe Díaz Batista por estar siempre dispuesto para ayudarme y por todo el amor que me han dado.

A mis hermanos Naillet Díaz Barzaga y Yasmani Díaz Osorio por sus preocupaciones y por su ayuda brindadas en todo los momentos.

A mis abuelos Rafaela Sánchez Batista y Rafael Gámez Mato por estar en cada momento que lo necesité.

A mis tíos Mitha Barzaga Batista e Ibrahin Barzagas Batista por su ayuda y confianza depositada en mí.

A mis amigos Elian, Aleixi, Alexander, Georver por confiar siempre y por su ayuda condicional.

A todos que de una forma u otra aportaron su granito de arena y principalmente a mis familiares y todos los profesores del departamento de mecánica por haberme formado en esto cinco años como profesional y los compañeros del aula presentes y ausente.

A todos "Muchas Gracias"



Resumen

El trabajo realiza una investigación, sobre la influencia del desgaste en los pasadores de los tractores de estera Komatsu D85P₋₂₁. Es un tema de interés para la economía de nuestra industria, ya que está presente en una gran cantidad de proceso industrial y otro tipo que ocupan una posición importante dentro de nuestro desarrollo industrial. La construcción, la minería, la agricultura entre otras, sirven de ejemplo a lo ante dicho, de ahí lo útil e importante que es conocer algunos fundamentos teóricos de los tipos de desgaste que existe, así como los principales factores que influyen, cada uno de esto actúa aisladamente en forma combinada. La forma de acción de esto factores da lugar a diferente tipos de desgaste que se clasifican en desgaste mecánico, mecánico molecular y mecánico corrosivo. Como se puede deducir, en los procesos analizados el desgaste o pérdida de material se produce únicamente bajo la acción mecánica de una carga, este proceso puede verse favorecido por la acción simultánea del medio, al reaccionar el oxígeno con el metal se forma óxido que son muy fácil desprendido.



Abstract

The work carries out an investigation, on the influence of the waste in the pins of the mat tractors Komatsu D85P-21. It is a topic of interest for the economy of our industry, since it is present in a great quantity of industrial process and another type that occupy an important position inside our industrial development. The construction, the mining, the agriculture among other, they serve from example to it before having said, of there the useful and important that is to know some theoretical foundations of the waste types that it exists, as well as the main factors that influence, each one of this acts scatteredly in combined form. The action form of this factors give place to different waste types that they are classified in waste mechanic, molecular mechanic and corrosive mechanic. As you he/she can deduce, in the analyzed processes the waste or lost of material he/she only takes place under the mechanical action of a load, this processes he/she can it turns favored by the simultaneous action of the means, when reacting the I oxygenate with the metal he/she is formed I oxidize that they are very easy removed.



Índice	Pág.
Introducción	1
CAPITULO I. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACION.	
1.1. Introducción	4
1.2. Generalidades de desgaste y fricción	5
1.3. Desgaste	6
1.4. Clasificación de los pares tribológicos	7
1.5. Modo de acción de los distintos tipos de desgaste	8
1.6. Etapas del desgaste	10
1.7. Clasificación de los tipos de desgaste	10
1.8. Dinámica del desgaste	13
1.9. Mecanismos básicos del desgaste	15
1.10. Clasificación del desgaste abrasivo	16
1.11. Control del desgaste	17
1.12. Fricción seca en superficies metálicas	18
1.13. Coeficiente de fricción estático	19
1.14. Factores que influyen en la fricción seca	20
1.15. Aplicación de la nueva tecnología para contrarrestar el desgaste	20
1.16. Conclusiones capítulo I	22
CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS.	
2.1. Introducción	23



2.2. Características de los materiales objeto de estudio	23
2.3. Característica del tractor de estera del tipo Komatsu D85P-21	25
2.4. Metodología de cálculo para determinar el desgaste en los pasadores	27
2.5. Mediciones realizadas en los pasadores y casquillo de los tractores de esteras del tipo KOMATSU D85P-21	36
2.6. Conclusiones del capítulo II	38
CAPITULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	
3.1. Introducción	39
3.2. Resultados de los cálculos obtenidos	39
3.3. Método estadístico de planificación de experimento	43
3.4. Estadística de la regresión	44
3.5. Análisis de varianza	45
3.6. Probabilidad del modelo	46
3.7. Curva de regresión ajustada	46
3.8. Análisis del ajuste de la curva	47
3.9. Valoración económica	48
3.10. Impacto ambiental	48
3.11. Conclusiones del capítulo III	50
Conclusiones generales	51
Recomendaciones	52
Bibliografía	52
Anexo	53

Introducción.

En la mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara cuenta con escasos recursos para invertir en su industrialización, lo que es necesario la recuperación y reparación de pieza en los equipos de laboreo minero, para lograr la producción económica en el país, como crecimiento de los rendimientos y recurso de técnicas mecanizadas que representan aspectos de explotación de las maquinarias, de hecho la vida real o útil de las piezas en la que el ritmo del desgaste ocasionado por fricción debido a sobrecargas en los tractores de esteras tipos KOMATSU D85P-21 es deficiente, son las causas que acortan esta etapa. El desgaste genera considerables pérdidas de materiales, recursos y tiempo, con la consiguiente disminución de la producción, conlleva a la pérdida de gran cantidad de medios para su reparación, así como en la elaboración o adquisición de nuevos elementos empleo racional de nuevas técnicas y el aumento cada vez mayor de la mecanización y el empleo de tecnología de punta a pesar de las limitaciones de recursos, representan aspectos donde se han alcanzado logros incuestionables. Aparejado a esto Cuba, en uno de los principales renglones de nuestra economía, la industria del níquel, con más de 60 años de fundada, los períodos de explotación de las maquinarias son más intensos al igual que las condiciones climáticas y ambientales, y a pesar de estas trabas entre el esfuerzo y el logro, se ha alcanzado un incremento de la eficiencia y la diversificación de la producción para satisfacer las necesidades competitivas que exige el mercado.

La **Situación Problemática** de la investigación la constituye:

Los equipos de laboreo minero en la industria cubana del níquel de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, están expuestos a severas condiciones de trabajo, si se tiene en cuenta que la actividad que realizan es el acopio del mineral laterítico en un terreno que posee una topografía irregular, los pasadores que componen las esteras de los tractores KOMATSU D85P-21, están sujetos a grandes cargas de trabajo, por el deslizamiento entre el casquillo y el pasador, donde se genera el desgaste, se forman capas superficiales que incrementan la dureza en la superficie del mismo. Esta capa exterior, pequeña en volumen, es la que determina mayor propiedades funcionales como:

fricción, corrosión, fatiga, capacidad de carga además aumentan las propiedades físicas-mecánicas en las maquinas.

La necesidad del estudio de esta problemática de la vida útil y la fiabilidad de los elementos de máquinas es de vital importancia, para poder recomendar una estructura adecuada, en cuanto al material y tratamiento térmico seleccionado (teniendo en cuenta a la hora de seleccionar estos materiales las diferentes exigencias económicas, tecnológicas, de explotación e higiénicas) es de gran consideración para lograr un incremento en la vida útil de los órganos de trabajo de las máquinas y por tanto para la economía del país.

El **Problema** a investigar lo constituye: No se tiene establecida una metodología de cálculo que permita evaluar el comportamiento del desgaste de los pasadores de los equipos de laboreo minero sometido a fricción por rodadura.

Como **Objeto de la investigación** se establece: Pasadores de los equipos de laboreo minero sometido a fricción por rodadura.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**: Si se caracterizan las cargas, presión de contacto, material, y características del tractor de estera del tipo D85P₋₂₁, es posible determinar el desgaste que se originan en los pasadores de estos equipos de laboreo minero sometidos la fricción por rodadura.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **Objetivo del trabajo**: Establecer la metodología de cálculo para el desgaste que se originan en los pasadores de los equipos de laboreo minero sometidos la fricción por rodadura.

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

- ✓ Realizar un análisis de las condiciones de trabajo de los tractores KOMATSU D85P₋₂₁.
- ✓ Analizar las características del desgaste en los pasadores.
- ✓ Analizar los resultados de los elementos que desgastan los pasadores.
- ✓ Determinar las variaciones de los pasadores después de su vida útil.



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

- ✓ Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- ✓ Valoración de los resultados obtenidos y fundamentación del comportamiento del pasador, deformado por rozamiento.
- ✓ Valoración económica e impacto ambiental.

CAPITULO I. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACION

1.1. Introducción.

Los equipos de laboreo mineros empleados en la industria cubana, MINBAS, MINAZ, SIME, MICONS, utilizan para la construcción de gran parte de sus agregados y accesorios el acero AISI 1045, teniendo en cuenta las propiedades que este posee de incrementar su dureza al ser sometido a tratamiento térmico. El acero AISI-1045 es considerado en la práctica industrial como el material que combina elevada tenacidad – ductilidad con una gran capacidad de endurecimiento por deformación y una elevada resistencia al desgaste a pesar de su relativa baja dureza.

De acuerdo con los criterios de Caubet, 1971y Guliaev, 1983, el acero AISI-1045 en las condiciones de rozamiento, acompañado de grandes presiones, tiene una gran resistencia al desgaste. Este acero se utiliza fundido con menos frecuencia, permite una deformación fácil en frío, y posee la alta tenacidad y plasticidad típica de los aceros, al mismo tiempo que ofrece una buena resistencia al desgaste, esto se debe a que el proceso de endurecimiento va acompañado de la deformación plástica del metal, trayendo consigo un incremento en la fatiga residual compresiva interna y a un considerable aumento en la dureza de la superficie.

El acero AISI -1045 puede lograr unificar las propiedades de resistencia al desgaste en consecuencia constituye el material idóneo para garantizar la asignación de servicio de piezas de maquinarias, es un material con facilidad de conformar su costo de producción es bajo y ofrece buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga este endurece por deformación plástica, no obstante en las condiciones en que se ofertan en el mercado dichos elementos fabricados de este material, no se garantiza la dureza requerida antes de su puesta en explotación. Várela, 2003.

A continuación se realizará el análisis de los distintos aspectos relacionados con el tema que se aborda en la bibliografía consultada, con la finalidad de disponer de los elementos básicos invariantes y de las tendencias actuales que resulten esenciales para el correcto desarrollo del trabajo.

Serán abordados aspectos relacionados con la caracterización del acero AISI 1045 y la interrelación composición química-estructura–propiedades, además de las particularidades estructurales del material durante el trabajo de deformación en frío, con énfasis en el

análisis de su mecanismo de endurecimiento y las tensiones residuales que se generan en el proceso.

En el presente capítulo se establece como objetivo:

- ❖ Realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

1.2. Generalidades de desgaste y fricción

La Tribología es un termino usado a finales del siglo XX se deriva de la palabra griega tribos que significa "frotar o rozar". Hoy en día es un término usado universalmente para la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación de superficies en contacto. Para entender a la tribología se requiere de conocimientos de física, de química, y de la tecnología de materiales. Las tareas del especialista en tribología (tribólogo) son las de reducir la fricción y desgaste para conservar y reducir energía, lograr movimientos más rápidos y precisos, incrementar la productividad y reducir el mantenimiento.

Antes del nacimiento de la tribología como ciencia se pensaba en el término "lubricación" o ingeniería de lubricación. No se había generalizado la disminución de la fricción y el desgaste como prácticas cotidianas. Con la Tribología como ciencia, se estudia el desgaste por fricción y sus efectos asociados como el desgaste, además trata de prevenirlos con mejores diseños y mejores prácticas de lubricación. Toma en cuenta entre otros aspectos de la maquinaria industrial: el diseño, los materiales de las superficies en contacto, el sistema de aplicación del lubricante, el medio circundante, condiciones de operación.

Las aplicaciones de la Tribología están presente prácticamente en todas las piezas en movimiento tales como: Rodamientos, chumaceras, sellos, anillos de pistones, embragues, frenos, engranes, levas.

La tribología nos ayuda a resolver problemas en maquinaria y equipos y procesos industriales tales como: Motores eléctricos y de combustión (componentes y funcionamiento), turbinas, compresores, extrusión, rolado, fundición, forja, procesos de corte (herramientas y fluidos), elementos de almacenamiento magnético, prótesis articulares (cuerpo humano).

El fenómeno de fricción y mecanismo de desgaste puede explicarse por la formación y posterior ruptura de uniones metálicas 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. Según Escanaverino, 1983.

Uno de los problemas no resuelto en la temática del desgaste es la designación y clasificación del mismo en las superficies de los cuerpos sólidos; a continuación, se darán los conceptos más utilizados.

1.3. Desgaste

Según Verdeja, 1996. El desprendimiento de material en un componente mecánico puede variar notablemente, de muy intenso a despreciable. En cualquier caso, ello puede significar una pérdida de eficiencia y la inutilidad completa del sistema. Es muy importante dejar establecida la necesidad de emplear la máxima rigurosidad en el análisis y diagnóstico de los mecanismos de desgaste.

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.

Los análisis de los sistemas han demostrado que 75% de las fallas mecánicas se deben al desgaste de las superficies en rozamiento. Se deduce fácilmente que si queremos aumentar la vida útil de nuestro equipo, debemos de disminuir el desgaste al mínimo posible; para esto existe una materia que se encarga del estudio del desgaste, la fricción y la lubricación en superficies en contacto, esta materia recibe el nombre de Tribología.

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

❖ **Fricción:** La fricción se define como la resistencia al movimiento durante el deslizamiento o rodamiento que experimenta un cuerpo sólido al moverse sobre otro con el cual está en contacto. Esta resistencia al movimiento depende de las características de las superficies. Una teoría explica la resistencia por la interacción entre puntos de contacto y la penetración de las asperezas. La fricción depende de i) la interacción molecular (adhesión) de las superficies y ii) de la interacción mecánica entre las partes. La fuerza de resistencia que actúa en una dirección opuesta a la dirección del movimiento se conoce como fuerza de fricción. Existen dos tipos principales de fricción: fricción estática y fricción dinámica. La fricción no es una propiedad del material, es una respuesta integral del sistema.

Las dos leyes básicas de la fricción son:

- ✓ La resistencia de fricción es proporcional a la carga
- ✓ La fricción es independiente del área de deslizamiento de las superficies.

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.

Lubricación: 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: líquido, sólido, gaseoso e incluso y semisólido ó pastoso.

1.4. Clasificación de los pares tribológicos.

Según la cinemática de los cuerpos del par tribológico. Para los sistemas tribológicos formados por partes de materiales de diferente dureza y dimensiones se presentan dos pares de rozamiento fundamentales.

❖ **Par directo:** Cuando el elemento del par de mayor dureza HB_2 se mueve con respecto al más blando HB_1 y además se cumple que el área nominal del más duro es menor que la del más blando ($A_{r2} < A_{r1}$). Ver Figura 1a

❖ **Par inverso:** Cuando el elemento del par de menor dureza HB_1 se mueve con respecto al más duro HB_2 y además se cumple que el área nominal del más duro es menor que la del más blando. Ver Figura 1b

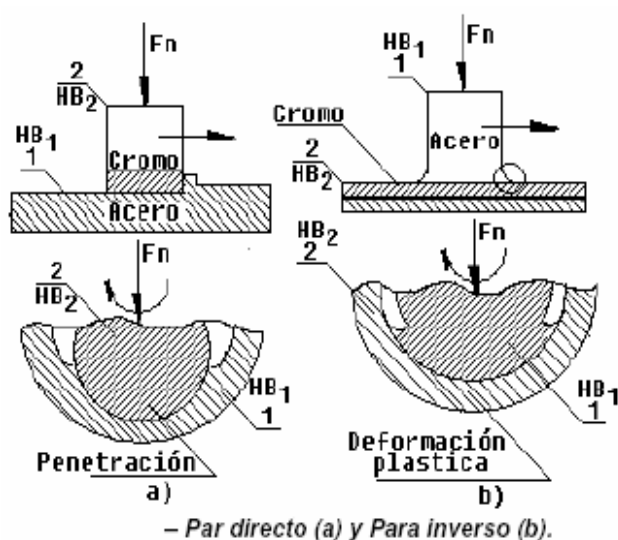


Figura: 1a y b. Pares tribológicos según la cinemática de los cuerpos.

La experiencia práctica, los ensayos de prueba y los estudios a nivel de laboratorio, han demostrado que el par inverso durante el desgaste adhesivo es más resistente al agarramiento que el directo y provoca un menor grado de deterioro de la superficie. La diferencia entre el par directo y el par inverso radica en que el par directo durante la acción de la carga, la deformación plástica del elemento de menor dureza obstaculiza el buen funcionamiento del par, motivo por el cuál aumenta la fricción. En el par inverso lo contrario al directo, la deformación plástica que tiene lugar producto de la influencia de la carga no obstaculiza el funcionamiento normal del par. Características del medio: humedad, atmósfera corrosiva, presencia de partículas abrasivas, propiedades de los lubricantes.

1.5. Modo de acción de los distintos tipos de desgaste

Existen tres tipos de desgaste, los cuales no suelen presentarse de forma aislada, sino conjuntamente y aún en etapas sucesivas, dependiendo de las condiciones de trabajo a

que esta sometida la pieza. Govantes, 1986. La acción conjunta de los distintos tipos de desgaste conduce a la destrucción del estado superficial del material o la pieza.

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.

En el primer instante del funcionamiento, se caracteriza por la destrucción mecánica de las asperezas, que son despuntadas hasta un aumento de la superficie real de contacto y hay un reparto suficiente y regular de la carga. Este es el período más difícil del rodaje, debido a los efectos dinámicos de choque, entre las asperezas y los efectos térmicos de calentamiento microlocalizado. Suárez, 1988. El gradiente térmico creado, da lugar a la dilatación diferencial de la pieza y como consecuencia a la creación de tensiones y además disminuye el límite elástico. Todo esto puede dar lugar a un período en el que el deterioro de la superficie puede llegar a ser elevado o mantenerse dentro de los límites captados en dependencia de la resistencia del metal a choques térmicos.

Luego de la destrucción mecánica de las asperezas en el caso de que las cargas sean pequeñas y exista fricción, siempre habrá cizalladura y las débiles microsoldaduras formadas se rompen en la misma entrecara sin desgarrar los metales presentes. Se trata de un deterioro mecánico debido a las interacciones atómicas o moleculares, en la que sólo hay que cortar una transferencia de metal de molécula a molécula. En este caso el desgaste es pequeño. Si uno de los metales del par de fricción es más blando, generalmente la ruptura no tiene lugar en la entrecara sino en gran proporción en el metal más blando y solo ocasionalmente en el más duro.

Ahora bien, si las cargas son importantes con fricción, durante el deslizamiento se produce arrastre y acumulación de material delante de las asperezas, aumentando las áreas de contacto, las microsoldaduras son muy densas y se acumulan esfuerzos crecientes hasta el deterioro total de la superficie, sin regeneración posible, haciendo inservible la pieza. En el caso de sobrecargas y fricción pura, la elevación de la temperatura en la zona de contacto producida por todas estas resistencias mecánicas, alcanza valores que pueden producir transformaciones estructurales deseables o no, y cuyo efecto sobre el desgaste,

puede ser importante. Si se logra en el proceso de fricción una estructura de martensita con un 5 -10 % de austenita retenida, el desgaste será pequeño.

Lo anterior puede provocar el efecto de endurecimiento debido a las tensiones normales y tangenciales que se crean, esto se traduce como un aumento de la acritud en las subcapas del material. Verdeja, 1996. Cuando la deformación alcanza un valor crítico por encima del límite de acritud, el material se rompe por fractura frágil. Durante este proceso las tensiones de cizalladura, producen deslizamiento en el interior de los granos cristalinos o ruptura de los mismos, y crean tensiones de cizalladura que alcanzan un valor máximo en algún punto, apareciendo deformaciones permanentes o fracturas, punto a partir del cual se inicia el fallo del material. Han sido varias las vías utilizadas para combatir el desgaste abrasivo y frenar las pérdidas que el mismo ocasiona. La resistencia al desgaste se consigue con una alta dureza superficial. En esta dirección han trabajado varios investigadores. Son diversos los métodos para el endurecimiento de los metales. Clauser, 1985.

1.6. Etapas del desgaste

Cuando se pone en marcha piezas mecánicas que experimentan rozamiento, se presentan esquemáticamente tres etapas:

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, representa la vida útil de la máquina. 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.

1.7. Clasificación de los tipos de desgaste

En la definición del tipo de desgaste y su magnitud inciden una serie de factores que se pueden agrupar de la siguiente forma:

- ✓ Condiciones de explotación o de operación: carga aplicada, velocidad, temperatura, tipos de movimiento, tipo de fricción, recorrido de fricción, tiempo de trabajo.

✓ Características de los cuerpos en contacto: materiales, composición química, dureza, dimensiones y forma, microgeometría superficial, microestructura.

❖ **Desgaste por fatiga.** Plantea, Bold, 1991, que el desgaste por fatiga superficial generalmente se considera debido a la acción de las tensiones o esfuerzos superficiales, sin medir necesariamente otra interacción físicas entre las superficies de los cuerpos sólidos. El proceso de desgaste por fatiga está relacionado con ciclos de tensiones repetitivos en el contacto por rodadura o por deslizamiento.

El proceso de fatiga provoca deterioros en el material debido a las tensiones variables, cuyo nivel máximo no sería perjudicial si actuara en forma constante, a tracción o compresión.

❖ **Desgaste abrasivo.** Es el daño por la acción de partículas sólidas presentes en la zona del rozamiento, es decir es el desgaste producido por partículas abrasivas que se deslizan sobre la superficie metálica produciendo desprendimiento de material, dislocaciones de cristales y ralladuras profundas. Este desgaste se pone de manifiesto en equipos agrícolas, de construcción y minería. También se observa en el equipamiento empleado en la preparación de las arenas de moldeo de fundición. En una estructura determinada la intensidad de desgaste por abrasión depende de la forma, dureza y tamaño de los granos y partículas abrasivas. Govantes, 1989.

La velocidad de desgaste depende del grado de penetración del abrasivo en la superficie y por lo tanto es función de la dureza superficial del material. La dureza, la tenacidad y sobre todo la rugosidad de las partículas abrasivas, acentúan la abrasión, mientras que la fragilidad de éstas atenúa su efecto.

Si la dureza del abrasivo es muy superior a la dureza de la superficie fraccionada, el desgaste es fuerte. Si por lo contrario es más blando la velocidad de desgaste es lenta. Se debe tener en cuenta que si la dureza de ambos es similar, el más leve cambio de una de ellas puede aumentar considerablemente el desgaste.

❖ **Desgaste por erosión.** Es producido por una corriente de partículas abrasivas, muy común en turbinas de gas, tubos de escape y de motores. Pérdida de cohesión del material. Existencia de microcorte.

❖ **Desgaste por corrosión.** Originado por la influencia del medio ambiente, principalmente la humedad, seguido de la eliminación por abrasión, fatiga o erosión, de la

capa del compuesto formado. A este grupo pertenece el Desgaste por oxidación. Ocasionado principalmente por la acción del oxígeno atmosférico o disuelto en el lubricante, sobre las superficies en movimiento. El metal deformado plásticamente, al reaccionar con el oxígeno contenido en la atmósfera, forma estructuras de capas secundarias, que se diferencian del metal original por sus estructuras y propiedades de resistencia. La actuación de presiones produce la destrucción de esas capas y el descubrimiento consecutivo de nuevas superficies del metal puro. Este fenómeno se conoce con el nombre de desgaste oxidante. Escanaverino, 1983

❖ **Desgaste adhesivo.** Es el proceso por el cual se transfiere material de una a otra superficie durante su movimiento relativo, como resultado de soldado en frío en puntos de interacción de asperezas, en algunos casos parte del material desprendido regresa a su superficie original o se libera en forma de virutas o rebaba.

Llamado en Inglés (Galling) ocurre al fundirse metal sobre metal que aparece cuando al haber interferencia mecánica entre los componentes de la sección de los desgastes por adhesión. son identificados más fácilmente por la presencia de rallas (o partiduras) en la pared externa del pasador o el diámetro. Las condiciones de presión y viscosidad pueden también causar o forzar a los casquillos que raspen contra el pasador. Este tipo de desgaste es muy frecuente en el pasador debido al giro que se produce en las esteras, el cual se corrobora con el análisis metalográfico de la superficie, esta presenta surcos o ralladuras, a lo largo del movimiento del casquillo.

Tiene una gran influencia sobre el desempeño de los sistemas metal-metal, en particular, por el deslizamiento de la superficie del casquillo separador sobre la parte externa del pasador de la esteras en una pista curva. Caubet, 1971. Dado que el deslizamiento entre el casquillo y el separador involucra efectos de adhesión, altos porcentajes de deslizamiento por rodadura que afectan fuertemente el desgaste por fatiga de contacto por rodadura, que actúa en las superficies de contacto, la formación de escamas o superficies oscuras, la cual aumenta la dureza en la zona desgastada.

Además de los tipos antes mencionados también se incluye también la cavitación. Es necesario aclarar que en la práctica se ponen de manifiesto dos o más tipos de desgaste a la vez, y en determinados momentos uno se transforma en otro.

Una de las clasificaciones más exactas es la propuesta por Peterson, 1980, realizada a partir de la naturaleza de las partículas de desgaste que se desprenden de la superficie de los cuerpos durante la fricción. Este autor considera que resultan definitorias la fatiga superficial y la magnitud del desprendimiento de partículas. Esta clasificación generalmente es válida para fricción seca. El propio autor considera que el desgaste que como consecuencia de las propiedades del lubricante tiene lugar, no ha sido debidamente estudiado.

En la tabla 1 se muestran algunos aspectos de los tipos de desgaste que más se pueden encontrar en la práctica industrial.

Tabla.1. Aspectos del desgaste.

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

1.8. Dinámica del desgaste.

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 físicas - mecánica del material con o sin pérdida del mismo.

El incremento de la durabilidad de los elementos de máquinas está íntimamente relacionado con la velocidad del desgaste y por ende con la característica dinámica del desgaste. La variación del desgaste con el tiempo (dinámica del desgaste) en su forma más conocida se muestra en la Figura. 2.

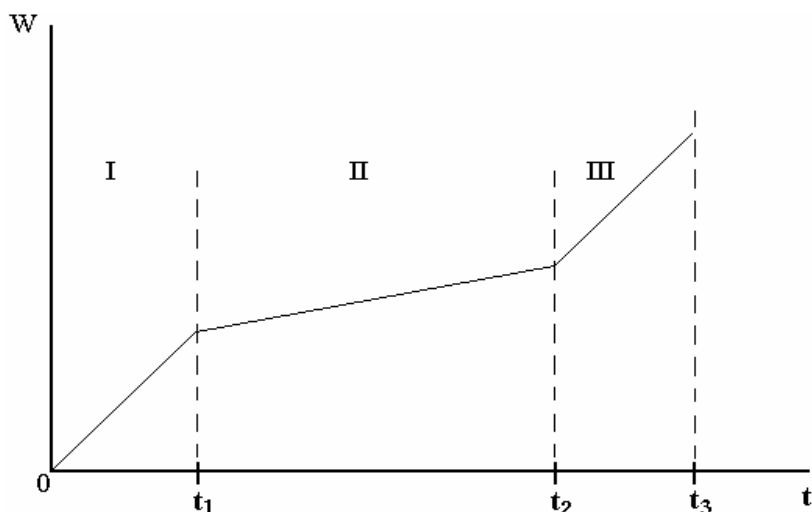


Figura. 2. Dinámica del desgaste.

Según Bold, 1991, surge por concentración de tensiones mayores a las que puede soportar el material, incluye las dislocaciones, formación de cavidades y grietas. En el mecanismo de la fatiga es posible pues, considerar tres períodos, según Fernández 1986): en el primero, que puede llamarse de incubación, ciertos puntos del material sufren procesos de deformación plástica, que en las aplicaciones sucesivas de las cargas variables van acumulándose hasta que se inicia la fisura microscópica, que marca el fin de este proceso. En el período siguiente, llamado de fisuración progresiva, la grieta que se ha iniciado en el de incubación va desarrollándose, progresando y extendiéndose en el metal bajo la acción de las tensiones repetidas y también por el efecto de entalla que la propia fisuración engendra. Ello da lugar a que también en este periodo la deformación plástica esté localizada solo en los cristales que sufren el efecto de entalla y, por lo tanto, se produzca la figuración progresiva sin deformación exterior. Finalmente en el tercer periodo de rotura, esta se produce de manera brusca simplemente por la acción de una tensión superior a la resistencia de rotura del material energéticamente entallado. La grieta de fatiga es un corte transversal, por consiguiente, se forma un estado tensional volumétrico que condicionan el carácter frágil de la rotura. Por fatiga debe entenderse la rotura causada por el desarrollo progresivo de la fisura.

El proceso de desgaste por fatiga está relacionado con ciclos de tensiones repetitivos en el contacto por rodadura o por deslizamiento. Como se conoce, el proceso de fatiga provoca deterioros en el material debido a las tensiones variables, cuyo nivel máximo no sería perjudicial si actuara en forma constante, a tracción o compresión.

1.9. Mecanismos básicos del desgaste

El desgaste está definido por dos mecanismos básicos que son:

❖ **Mecanismo de deformación plástica (macrodeformación):** Los procesos deformacionales que tienen lugar en microirregularidades de las superficies en contacto están en dependencia de las presiones que se originen en las áreas reales de contacto. Si el valor de estas presiones no alcanza el límite de fluencia del material más blando las deformaciones que predominan son elásticas y el mecanismo de desgaste predominante es el de fatiga superficial.

Si las partículas son pulidas (sin cantos vivos), tensiones por debajo del límite de rotura del material, bajo grados de penetración, se produce la deformación plástica de las capas superficiales, trayendo como consecuencia la ralladura, arrugado de la superficie con poca generación de partículas de desgaste.

❖ **Mecanismo de microcorte:** Si por el contrario a lo anterior se tiene que el valor de las tensiones alcanza o sobrepasa el límite de fluencia del material más blando las deformaciones predominantes serán plásticas y el desgaste se produce como consecuencia del micro corte, ocurriendo la ruptura de las mismas desde las primeras interacciones.

Si la penetración de la partícula abrasiva o aspereza sobrepasa cierto valor; si la partícula presenta cantos vivos; si la dureza del abrasivo es superior a la del material y si se sobrepasa el límite de rotura del material. Se produce el microcorte de las superficies, generándose partículas de desgaste en forma de limallas o virutas.

Las causas del desgaste son.

Álvarez, 1995, Caubet, 1971, Kruschov, 1957, consideran que las causas fundamentales del desgaste son:

- ❖ La penetración de las asperezas de alta dureza en las capas superficiales de la otra superficie en contacto.
- ❖ La acción y/o 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 de máquinas se pueden presentar diferentes mecanismos del desgaste.

1.10. Clasificación del desgaste abrasivo

En el desgaste abrasivo según (Álvarez, 1993) 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.

El desgaste abrasivo se puede clasificar en.

❖ **Desgaste abrasivo de baja presión**, que ocurre por deslizamiento de las partículas moviéndose libremente por la superficie y las tensiones actuantes son bajas y no exceden la resistencia a la rotura del abrasivo.

❖ **Desgaste abrasivo por alta presión**, cuando el abrasivo es atrapado entre dos superficies de carga y el desgaste no es solo por penetración, sino también por fractura de las partes frágiles y por deformación plástica de la matriz.

❖ **Desgaste abrasivo con impacto**, el cual involucra la remoción de material por la acción de un abrasivo cuyas partículas son de un tamaño apreciable e impactan en la superficie bajo un ángulo determinado. La energía de impacto se transfiere al material y hace que el abrasivo produzca grandes surcos y ralladuras apreciables a simple vista.

Es importante destacar que en la práctica el desgaste no se presenta en forma simple, sino que aparece combinado como:

- ✓ Impacto, abrasión y presión: en rodillos, cadenas y rodaje de tractores.
- ✓ Impacto, abrasión y temperatura: en martillos y cuchillas de cizalla.
- ✓ Impacto y presión: en martillos de pilón y machacadoras, quebradoras.
- ✓ Abrasión, erosión y corrosión: válvulas y asientos, tornillos sin fin.
- ✓ Fricción, corrosión y cavitación: impulsores, álabes de turbinas.

En dependencia del grado de libertad del grano abrasivo se distinguen dos tipos fundamentales de desgaste abrasivo.

- ✓ Desgaste contacto-abrasivo.
- ✓ Desgaste contaminante-abrasivo.

En dependencia del medio en que se produce el desgaste abrasivo este se clasifica en:

- ✓ Desgaste en masa abrasiva.
- ✓ Desgaste en uniones de rozamiento.
- ✓ Desgaste hidroabrasivo.

1.11. 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 ésta comienza a disminuir. Rodríguez, 1998.

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 con elementos tales como silicio, y disperso sobre ella carburo de cromo y manganeso, los cuales se oponen a la deformación plástica de la matriz, deteniendo el movimiento de las dislocaciones. Guliaev, 1983.

Se establece que para partículas abrasivas con tamaños superiores a 1mm se produce el desgaste abrasivo; lo que significa la existencia de éste en la mayoría de los casos. Otro factor de importancia es la relación dureza de las partículas abrasivas (H_a) y dureza del material (H_m); así cuando $H_m/H_a < 0,5$ se produce el desgaste mecánico por micro corte y cuando $H_m/H_a > 0,7$ se produce deformaciones plásticas y la separación de material ocurre después de un gran número de ciclos de trabajo (fatiga superficial). Álvarez, 1995.

Las partículas abrasivas de origen mineral se encuentran en altas cantidades en los suelos; así por ejemplo el óxido de sílice (arena de cuarzo) con dureza $H=10\ 000 / 12\ 500$ MPa constituye entre el 40 - 60% de los suelos cubanos. El incremento de la resistencia al desgaste en masa abrasiva si $H_m/H_a < 0,5$ se logra aumentando la dureza del metal (H_m) hasta valores que no afecten el trabajo del elemento de máquina desde el punto de vista de su resistencia a la fragilidad o impacto. No es aconsejable que la relación de dureza sea muy superior a 0,76; ya que no se obtienen resultados satisfactorios. Otaño, 1998.

Para el diagnóstico o identificación del desgaste se utilizarán los criterios dados anteriormente y los factores que hacen disminuir el mismo son:

- ✓ 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.

1.12. Fricción seca en superficies metálicas.

Desde el punto de vista de la ingeniería la fricción seca está constituida por tres elementos o cuerpos, los cuerpos sólidos y el contaminante (el cual no ha sido introducido deliberadamente).

El contaminante puede ser:

- ✓ Capas de óxido o sulfatos.
- ✓ Vapor de agua.
- ✓ Películas lubricantes.

La capa de contaminante está constituida por películas de óxido producida por la reacción del oxígeno del aire con el metal. La formación de esta capa de óxido es rápida y depende de la temperatura; así en menos de 5 minutos a temperatura ambiente se pueden formar capas de espesor $100 \text{ \AA}$ en metales tales como Fe, Cu, Al.

Las propiedades físico-mecánicas de la capa de óxido difieren considerablemente de las propiedades del metal base; así la relación de dureza entre el óxido de cobre (CuO) y el cobre es de 1,6; entre el óxido de zinc (ZnO) y el zinc, es de 6,6; entre el Fe_2O_3 y el acero es de 5 veces.

Como se aprecia las capas de óxido presentan altas dureza y fragilidad, la resistencia de la capa de óxido en la superficie de rozamiento depende en grado considerable de la relación de dureza óxido-metal. Si la capa de óxido tiene una alta dureza en comparación con el metal base (sub capa) ella rápidamente se destruye bajo la acción de la fricción debido a su fragilidad, trayendo por consecuencia el incremento del desgaste.

En el caso de capas de óxido con dureza similares al metal base (como el cobre) esta tiene mayor resistencia mecánica y bajo la acción de cargas la capa de óxido se deforma conjuntamente en la subcapa del metal base.

La resistencia mecánica de las capas de óxido se disminuye con el aumento de su espesor; existiendo un espesor crítico para el cual la resistencia es mínima.

La capa de gas absorbida presente como principales constituyente moléculas de vapor de agua y de oxígeno; esta película es del orden de $3 \text{ \AA}$; cuando la humedad relativa es alta es posible películas de mayor espesor.

Las películas de lubricante se forma debido a la absorción de moléculas de lubricantes que se encuentran en suspensión en la atmósfera, (sobre todo en la industria); o producto del lubricante utilizado durante la elaboración mecánica de la pieza o grasa natural proveniente de las manos de los operarios; esta capa es del orden de $30 \text{ \AA}$ ($3 \times 10^{-7} \text{ cm}$).

La existencia de estas capas de contaminante hacen que el coeficiente de fricción sea muy pequeño en comparación con superficies limpias o sea donde no exista ningún contaminante; situación que repercute directamente en el desgaste de los elementos de máquinas si consideramos a la fricción como la causa del desgaste.

1.13. Coeficiente de fricción estático.

El coeficiente de fricción estático; se define como la pérdida de energía mecánica al inicio o fin del movimiento relativo de dos cuerpos o como la fuerza que se opone a las fuerzas que tienden a producir el movimiento. Hasta hace poco el coeficiente de fricción estático se consideraba constante pero en la actualidad se admite su variación con el tiempo de contacto.

En las uniones friccionales de todos tipos se emplean metales y aleaciones y fueron durante muchos años el material predominante.

Para las uniones por interferencia, roscados y transmisiones por fricción se emplean diferentes marcas de aceros y metales no ferrosos en dependencia de las condiciones de

trabajo. Así por ejemplo en las uniones por interferencia el coeficiente de fricción es la característica fundamental, mientras que para las transmisiones por fricción se exige además una alta resistencia al desgaste.

1.14. Factores que influyen en la fricción seca.

La determinación cuantitativa de la fricción ha sido un aspecto de interés en diferentes épocas ya que ello permitiría incorporar a los cálculos del diseño el efecto de la fricción. Sin embargo esto es un problema no resuelto en la actualidad, debido fundamentalmente a que sobre la magnitud del coeficiente de fricción influye una serie de factores que en la mayoría de los casos constituye un sistema dependiente.

Los factores que influyen en la magnitud del coeficiente de fricción se pueden resumir en tres grupos según Álvarez, 1995, Kragelsky, 1977, Kruschov, 1957, los cuales los dividen en tres grupos.

❖ Grupo I: Factores relacionados con el régimen de trabajo.

- a) Carga (presión)
- b) Velocidad de deslizamiento
- c) Temperatura
- d) Acabado superficial

Grupo II. Factores relacionados con la naturaleza del metal tribotécnico

- a) Propiedades mecánicas
- b) Propiedades físicas
- c) Constitución y estructura
- d) Composición química.

Grupo III. Factores relacionados con el medio.

- a) Corrosión
- b) Abrasión
- c) Lubricación.

1.15. Aplicación de la nueva tecnología para contrarrestar el desgaste

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

- ✓ Búsqueda y experimentación de nuevos materiales.
- ✓ 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, elíjase 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 a 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.

1.16. Conclusiones capítulo I.

- ✓ Las condiciones de trabajo de los equipos de laboreo minero sobre todo lo que se encargan de la remoción del mineral específicamente los tractores de esteras del tipo KOMATSU D85P-21, los pasadores de las mismas, que trabajan bajo la acción simultánea de fatiga, adhesión y abrasión, los mismos están expuestos a condiciones de desgaste por rodadura.
- ✓ La bibliografía consultada, aporta información sobre el valor de propiedades físicas, mecánicas y funcionales de este acero, pero son escasas las referencias relacionadas con el desgaste de los pasadores de las esteras de los tractores del tipo KOMATSU D85P, sobre todo por el desgaste abrasivo que es el que más influye en el retiro de la vida útil de los mismos.
- ✓ Según el análisis de la bibliografía se puede concluir que el fenómeno de desgaste es perjudicial para el funcionamiento de una máquina, este desgaste prematuro del pasador utilizado en equipos de laboreo minero, está dada 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.

CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS.

2.1. Introducción.

Los diferentes tipos de aceros poseen diferentes propiedades en dependencia de su composición química y las propiedades que se les hayan atribuido mediante tratamiento térmico u otro tipo de tratado. El desgaste por deslizamiento tiene una gran influencia en los sistemas pasador/casquillo, por el deslizamiento del casquillo sobre el pasador sobre la parte externa del mismo en una pista curva si se tiene en cuenta que la actividad que realizan los tractores es el acopio del mineral laterítico en un terreno que posee una topografía irregular trayendo consigo el desgaste progresivo en elementos indispensables para el funcionamiento de dichos equipos como son los pasadores. en correspondencia con lo planteado en el capítulo anterior se realizará el análisis del desgaste superficial e interna del pasador, así como la realización de ensayos de dureza de los elementos que deforman el pasador que son el eslabón y el casquillo o buje, pasador retirado de servicio y del pasador nuevo, análisis de la composición química de estos materiales.

En este capítulo se plantea como objetivo:

- ✓ Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones en la que se realizarán los experimentos.

2.2. Características de los materiales objeto de estudio.

La composición química se tomó como promedio de los resultados de tres chispas para sacar el de cada una de ellas. Dicha composición química del pasador deteriorado se muestra en la tabla 2.1. Se tomó el pasador el cuál estuvo sometido a la acción de trabajo continuo, una vez que la pieza se puso fuera de explotación por perder su configuración geométrica. Con este análisis se determinó la composición química del pasador deteriorado Alcántara, et all, 2007

Tabla 2.1. Composición química de pasador deteriorado.

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

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

La dureza que posee el pasador en toda la longitud deformada por rodadura, está compuesta por dos capas, una relacionada con el tratamiento térmico recibido antes de su uso que es de aproximadamente de 4 mm y luego de ser sometida por el propio trabajo al esfuerzo de rodadura se observa una profundidad de esta capa de 1.5 mm. Alcántara, et al, 2007

Se tomó en consideración la dureza de los elementos que incidían directamente en la fricción por contacto con el pasador, para ello se tomó la dureza del buje o casquillo y del eslabón de la cadena. En las tablas 2.2 y 2.3 se muestran la composición química de ambos elementos. Alcántara, et al, 2007

Tabla 2.2. Composición química del buje o casquillo.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%
0,40	0,34	1,15	0,015	0,019	0,27	0,01
Ni%	Al%	Co%	Cu%	Ti%	V%	W%
0,03	0,0118	0,00	0,03	0,033	0,00	0,01
Pb%	Sn%	As%	Ce%	B%	Zn%	Fe%
0,002	0,005	0,006	0,005	0,0014	0,0039	97,6

Tabla 2.3. Composición química del eslabón de la cadena.

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%
0,45	0,26	1,54	0,016	0,011	0,22	0,02
Ni%	Al%	Co%	Cu%	Ti%	V%	W%
0,05	0,0165	0,01	0,09	0,0024	0,00	0,01
Pb%	Sn%	As%	Ce%	B%	Zn%	Fe%
0,002	0,011	0,007	0,005	0,001	0,0026	97,2

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

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

2.3. Característica del tractor de estera del tipo Komatsu D85P-21

El tractor D85P-21 está provisto con una longitud de estera a lo largo de la tierra de 3480 mm (11'5''). Con un ancho de 2250 mm (7'5'') con buena estabilidad encima de terreno áspero, lo que asegura un traslado de material de poder máximo en la producción en el empuje de la tierra. Ver anexo 1, 2, 3

El Komatsu tiene un motor S6D125, que entrega una fuerza dinámica de 225 HP (168 kW) a 2000 rpm y el torque tenaz de 102 kg-m (738 ft-lb/1001 N-m) para la maniobrabilidad y productividad.

❖ Especificaciones

Motor: Komatsu S6D125, de 4 ciclo, refrescado por agua, del tipo diesel con 6 cilindros de 125 mm (4.92'') con un empuje de 11.04 ltr (674cu.in) en el desplazamiento del pistón.

Caballo de fuerza del volante: 225 (168 kW.) a 2000 rpm (SAE J1349) 228PS (168kW) A 2000 rpm (FRAGOR 6270.)

Torque Máximo: 102 kg.m (738 ft-lb /1001 N-m) at 1400 rpm, directo del sistema de inyección de combustible con gobernador de todas las velocidad mecánica. Fuerza-lubricación vestido-bomba-manejada con filtro de flujo lleno.

Depurador de aire: Seco con evacuador de polvo automático para el servicio del elemento más largo e indicador del polvo para el mantenimiento simplificado.

Sistema eléctrico: 24 voltios.

❖ Tren de aterrizaje

Este esta compuesto por la suspensión del equipo, la misma presenta oscilación, el marco de la huella del rodillo es una caja-sección, construida de acero de alta dureza para resistir la fuerza.

Número de rodillos de la huella. 8 cada uno

Número de rodillos del portador. 2 cada uno

La entrada de polvo en el pasador es durante el servicio extendido.

El área de contacto de Tierra 63340 cm² (9280sq.in)

La presión de Tierra (tractor). 0.35 kg/cm² (4.98PSI/34 kPa)

❖ **Peso aproximado operando**

El peso del Tractor, incluyendo capacidad tasada de lubricante, tanque de combustible lleno de refrigerante, operador y equipo normal.21 800 kg (48060 lb)

Peso operando, operador, equipo normal, capacidad tasada de lubricante, el tanque de combustible lleno de refrigerante. 25 725 kg (56715 lb)

❖ **Refrigerante y capacidad del lubricante (recambiando)**

El uso del refrigerante incluye todas las partes que requiere de la circulación del mismo y que permite el funcionamiento de la maquina. Estas partes son:

- Refrigerante.. . . . 79 ltr. (20.9 gal u.s)
- El tanque de Combustible.. . . . 480 ltr. (126.8 gal. u.s)
- El motor. 24 ltr. (6.3 gal. u.s)
- El conversor de Torque oblicuo. 90 ltr. (23.8 gal. u.s)
- El carril Final (cada lado). 51 ltr. (13.5 gal. u.s)
- El Tren de aterrizaje (cada lado). 3 ltr. (0.8 gal. u.s)

❖ **Características de la cuchilla:**

Se emplea acero de alta tensión y alta resistencia en la placa molde para la construcción y el fortalecimiento de la cuchilla. Se aloja el mecanismo hidráulico para la cuchilla inclinada dentro del marco del equipo para protegerla de los daños. Las características generales se recogen en la tabla 2.4

Tabla 2.4. Características generales de la máquina.

	Longitud global de la maquina	Capacida d de la cuchilla	Longitud y ancho de la cuchilla	Máxim o alce sobre la tierra	Máximo profundida d debajo de tierra	Ajuste de máximo inclinació n
Inclinació n de la cuchilla	6060 mm(19'11'')	5.9 m ³ (7,7 cu. Yd)	4365 mmx1390 mm (14'4''x 4'7'')	1360 mm (4'6'')	540 mm (1'9'')	500 mm (1'8'')
Angulo de la cuchilla	6350 mm (20'10'')	3.9 m ³ (5.1 cu. Yd)	4890 mmx1035 mm(16'1''x3'5'')	1350 mm (4'5'')	550 mm (1'10'')	400 mm (1'4'')

La máquina es capaz de trabajar con facilidad en suelo húmedo, posee múltiple-disco, las operaciones se realizan manualmente, la dirección de los embragues se empuja hidráulicamente, posee sistema de freno y una instalación de doble estera con dientes

segmentados en el cubo con saetas, para el reemplazo fácil en la remoción de tierra en campo.

2.4. Metodología de cálculo para determinar el desgaste en los pasadores.

Para el cálculo de los pasadores desgastado se debe tener en cuenta diferentes factores que influyen en los mismos por ejemplo: el tiempo de explotación del tractor, trabajo que realiza según el terreno, la carga, fuerza y peso así como el área, diámetro y la longitud de los pasadores desgastado.

❖ Desgaste por fatiga superficial.

La teoría del desgaste por fatiga superficial fue planteada por Kragelsky, 1977, y ha sido desarrollada por él y sus colaboradores. De acuerdo al estado tensional-deformacional de las capas superficiales se distinguen dos tipos de desgaste por fatiga:

✓ **Desgaste por fatiga de alto número de ciclo:** Se produce cuando las capas superficiales de los cuerpos en contacto están deformadas elásticamente.

✓ **Desgaste por fatiga de bajo número de ciclos:** Se presenta cuando se producen deformaciones plásticas en las asperezas en contacto. Este tipo de desgaste está presente en la mayoría de los elementos de máquinas y se hace más evidente durante el periodo de asentamiento.

En la práctica industrial los elementos de máquinas pueden presentar características dinámicas diferentes debido al tipo de unión, condiciones del medio y tipo de desgaste. El esquema más sencillo es el lineal en este caso el desgaste con relación al tiempo de trabajo se determina según. Álvarez, 1995.

$$W = K \cdot t \quad (2.1)$$

Donde:

W: Desgaste lineal por fatiga; mm

t: Tiempo de trabajo; hr

Desgaste: Para cada material existe una cierta relación entre la dureza del material abrasivo y la del material desgastado por encima de la cual, el desgaste alcanza un valor estable y es independiente de un posterior incremento de esta relación. Tenenbaum. 1966, halló que esta relación en los aceros es de 0,6. Hasta este valor se observa una dependencia lineal

entre el aumento de la dureza del abrasivo y el desgaste que sufre la superficie del material desgastado.

$$k = \frac{H_a}{H_g} \leq 0.6 \quad (2.2)$$

Donde:

K : Coeficiente del desgaste

H_a : Dureza del material abrasivo; mm.

H_g : Dureza del material desgastado; mm.

❖ **Indicadores del desgaste:** Al desgaste de los elementos de máquinas se produce con o sin la pérdida de material es por ello que la evaluación de la magnitud del mismo se puede cuantificar por diferentes indicadores.

❖ **Desgaste lineal:** Se utiliza cuando los valores absolutos del desgaste son de medianos a altos y está fundamentado en las dimensiones de la piezas antes y después del ensayo del desgaste, la exactitud de este método depende de la calidad de los desgaste de medición que se utilicen. Para la determinación de los valores absolutos del desgaste mediante estos métodos se utilizan instrumentos tales como calibres interiores y exteriores, dispositivos mecánicos de palancas, dispositivo óptico, microscopios instrumentales y universales, pasámetros, bloques planos paralelos, micrómetros exteriores e interiores, indicadores de carátulas. Conociendo el desgaste lineal se determina la intensidad lineal del desgaste.

Donde:

$$W_h = h$$

W_h : Desgaste lineal; [μm o mm].

I_h : Intensidad lineal del desgaste; mm

$$I_h = \frac{W_h}{S_f} \quad (2.3)$$

S_f = recorrido de fricción (mm^2)

h: Espesor del material desgastado; μm o mm.

❖ **Recorrido de fricción:** Se determina generalmente cuando conocemos las dimensiones del radio medio de contacto y semiancho de la banda de contacto, Dobrovolski, et al, 1970.

$$S_f = 2 \cdot \pi \cdot r_{med} \cdot b \quad (2.4)$$

Donde:

r_{med} : Radio medio; mm.

b: Semiancho de la banda de contacto; mm.

❖ **Desgaste volumétrico:** Este se fundamenta en la medición del volumen antes y después del proceso del desgaste. Es también usado con frecuencia y al indicador anterior requiere de medios de medición de alta precisión. Este generalmente se determina partiendo del indicador lineal del desgaste.

$$W_v = W_h \cdot A_n \quad (2.5)$$

❖ **Intensidad volumétrica del desgaste:** Este indicador se mide cuando la relación que existe entre el desgaste volumétrico y el área nominal y el recorrido de la fricción se conoce.

$$I_v = \frac{V}{S_f \cdot A_n} \quad (2.6)$$

Donde:

I_v : Intensidad volumétrica del desgaste; mm

V : Volumen del material desgastado; mm^3 .

A_n : Área de fricción nominal; mm^2

❖ **Velocidad o razón de desgaste:** A través de este indicador se mide el ritmo del proceso de desgaste y no es más que la relación que existe entre el desgaste y el tiempo en que este ha tenido lugar.

$$W^I = \frac{Wh}{t} \quad (2.7)$$

Donde:

W^I : Velocidad o razón del desgaste; mm/hr.

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

$$q = \frac{Fn}{l} \quad (2.8)$$

Donde:

l : Longitud del pasador; mm

Fn : fuerza nominal que actúa sobre el pasador; N

q : Carga que soporta el pasador; N/ mm

Los semiejes de la zona de contacto elíptica, para este contacto considera Álvarez, 1995 se determina por medio de la fórmula.

$$b = 1.128 \sqrt{\frac{Fn \cdot R_1 \cdot R_2}{l \cdot R_2 - R_1} \left[\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right]} \quad (2.9)$$

Donde:

R_1 - Radio del pasador; (mm).

R_2 - Radio del casquillo; (mm).

E -Módulos de elasticidad; kgf / cm^2 .

μ -Coeficientes de poisson.

Si $E_1 = E_2 = E = 2,1 \times 10^6$ y $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$, se analiza según Fernández, 1970

Para determinar entonces el valor del semieje, a se calcula a partir del criterio de Álvarez, 1995.

$$a = \alpha \sqrt[3]{\frac{3Fn(1-\mu^2)}{E\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r'_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r'_2}\right)}} \quad (2.10)$$

Podemos considerar también calcular el valor del semieje a , partiendo de la siguiente ecuación planteada por, Dobrovolski, et .all, 1970.

❖ **Radio o el semieje a del área del coeficiente de poisson:** Si se practica una compresión de dos cuerpo con, R_1 y R_2 por medio de fuerza nominal como resultado de la deformaciones elástica locales se forma un área de contacto, cuyo contorno tiene forma de circunferencia. El radio de esta área con el coeficiente de poisson $\mu = 0.3$ se determina por la formula. Dobrovolski, et .all, 1970.

$$a = 1.109 \sqrt[3]{\frac{F_n \cdot R}{E}} \quad (2.11)$$

Donde:

r_1, r'_1, r_2, r'_2 : Radios de curvatura de los cuerpos 1 y 2 que se tocan; mm.

a : Semieje; mm.

A partir del valor del semieje, a se determina el valor del semieje b , consideraciones del mismo autor.

$$b = \beta \sqrt[3]{\frac{3Fn(1-\mu^2)}{E\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r'_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r'_2}\right)}} \quad (2.12)$$

Podemos considerar también calcular el valor del semieje b , a partir de la siguiente ecuación planteada por Álvarez, 1995.

$$b = 1.076 \cdot \sqrt{\frac{Fn \cdot R}{l \cdot E}} \quad (2.13)$$

❖ **Radio:** Es el reducido de la curvatura en la zona de contacto de los dos cuerpos que se comprimen, pasador/casquillo.

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.14)$$

❖ **Área nominal para cuerpo de superficies curvas**

La determinación del área nominal de contacto en cuerpos de superficies curvas se determina a partir de las conocidas expresiones de Hertz siempre que el estado tensional volumétrico sea elástico. Para este caso se hace necesario determinar el semiancho de la banda de contacto. Para contacto entre cuerpos cilíndricos cóncavo y convexo con ejes paralelos (pasadores de deslizamiento radial)

$$A_n = 2b \cdot l \quad (2.15)$$

❖ **Peso nominal:** Se determina teniendo en cuenta la relación que existe entre la fuerza nominal y dos veces el semiancho de la banda por la longitud del pasador desgastado.

$$P_n = \frac{F_n}{2b \cdot l} \quad (2.16)$$

Donde:

P_n : Peso nominal; N/cm^2

Los valores de los coeficientes α y β como funciones del ángulo ψ se calculan por las siguientes ecuaciones.

$$\cos \psi = \frac{\pm \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'}\right)\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'}\right)\cos 2\varphi}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'}} \quad (2.17)$$

$$\psi = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \quad (2.18)$$

Siendo φ el ángulo entre los planos principales de curvatura de los cuerpos en los cuales se encuentran los radios R_1 y R_2 . Los signos en la ecuación anterior se eligen de forma que el $\cos \psi$ sea positivo.

Tabla.2.5. Valores de los ángulos ψ ; α y β

ψ^0	α	β	ψ^0	α	β
20	3, 778	0, 408	60	1,482	0,717
30	2, 731	0,493	65	1,378	0,759
35	2, 397	0,530	70	1,284	0,802
40	2,136	0,567	75	1,202	0,846
45	1, 926	0,604	80	1,128	0,893
50	1, 754	0,641	85	1,061	0,944
55	1, 611	0,678	90	1,0	1,0

❖ **Tensiones de contacto.** Plantea Álvarez, 1995. que las tensiones de contacto son aquellas que surgen durante la compresión mutua de dos cuerpos en contacto, bajo la acción de la fuerza externas, estando el material en un estado tensional volumétrico, al no poderse deformar libremente en la zona de contacto.

Las tensiones de contacto tienen un carácter puramente local y disminuyen consecuentemente a medida que se alejen de la zona de contacto.

El análisis de las tensiones de contacto, al determinar la resistencia en la zona de contacto se debe hacer teniendo en cuenta las consideraciones siguientes:

- Determinar los radios de curvatura de los cuerpos que se tocan, así como el ángulo entre sus planos principales de curvatura.
- Calcular las dimensiones de los semiejes de la zona de contacto (zona elíptica), según las ecuaciones siguientes.

❖ **Tensión máxima en el centro de la zona de contacto casquillo/ pasador:** A través de la estrecha relación que existe entre la fuerza que actúa. El punto más peligroso está situado sobre el eje Z, a cierta profundidad que depende de la relación que existe entre a y b (b/a) se utiliza la siguiente ecuación.

$$\sigma_{\max} = 1,5 \frac{Fn}{\pi \cdot a \cdot b} \quad (2.19)$$

Donde:

$\sigma_{\max}$: Tensión máxima en el centro de la zona de contacto pasador; N/mm²

✓ Las presiones se distribuyen irregularmente. La presión mayor, que actúa en el centro del área de roce, es 1.5 mayor que la media y se determina por la siguiente ecuación. Dobrovolski, et .all, 1970.

$$P_{\max} = \frac{1.5 \cdot F_n}{\pi \cdot a^2} \quad (2.20)$$

Donde:

$P_{\max}$: Presión máxima de contacto; N/mm²

a : Radio del área del coeficiente de poisson; mm

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

$$\sigma_3 = -|\sigma_{\max}| = -1,5 \frac{Fn}{\pi \cdot a^2} = 0,388 \sqrt[3]{4Fn \frac{E_1^2 \cdot E_2^2}{(E_1 + E_2)^2} \cdot \frac{(R_1 + R_2)^2}{(R_1^2 + R_2^2)}} \quad (2.21)$$

✓ Podemos considerar también calcular el valor tensión máxima en el centro de la zona de contacto, a partir de la siguiente ecuación. Dobrovolski, et .all, 1970.

$$\sigma_3 = -P_{\max} \quad (2.22)$$

σ_3 : Tensión máxima en el centro de la zona de contacto se determina por; N/cm²

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

$$\sigma_{\max} = 0,5642 \sqrt{\frac{Fn}{l} \frac{\left(\frac{R_2 - R_1}{R_1 \cdot R_2} \right)}{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2}} \quad (2.23)$$

Si $E_1 = E_2 = E$ y $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$; entonces

Donde:

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

Podemos considerar también calcular el valor Tensión máxima de contacto, a partir de las siguientes ecuaciones, 2.24 y 2.25. Dobrovolski, et .all, 1970.

$$\sigma_{\max} = 0,418 \sqrt{\frac{Fn \cdot E}{l} \frac{R_2 - R_1}{R_1 \cdot R_2}} \quad (2.24)$$

$$\sigma_{\max} = 0,418 \sqrt{Fn \cdot E \div l \cdot R} \quad (2.25)$$

❖ Causas y mecanismos del desgaste abrasivo.

Las causas del desgaste abrasivo son:

- ✓ La penetración de las asperezas de alta dureza en las capas superficiales de la otra superficie en contacto.
- ✓ La acción y/o 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.

Bajos 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, modulo de elasticidad; de las condiciones del medio y de trabajo, de la carga aplicada y del tipo de elemento de máquinas se pueden presentar diferentes mecanismos del desgaste abrasivo.

a) Mecanismo de microcorte.- Si la penetración de la partícula abrasiva o aspereza sobrepasa cierto valor; si la partícula presenta cantos vivos; si la dureza del abrasivo es superior a la del material y si la tensión de contacto se sobrepasa el límite de rotura del

material; se produce el microcorte de los superficies, generándose partículas de desgaste en forma de limallas o virutas. Ver anexo 5.

La existencia del microcorte se puede determinar por las siguientes recomendaciones que depende del grado de penetración de las asperezas o partículas abrasivas:

$$D_p = R \left(\frac{\pi \cdot HV}{2F_n} \right)^{0.5} - \left(\frac{\pi \cdot HV}{2F_n} R^2 - 1 \right)^{0.5} \quad (2.26)$$

Donde:

D_p = Grado de penetración; μm o mm.

HV = dureza del material mas blando; kg. / mm²

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

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

$0.10 < D_p < 0.27$

$D_p = 0.09$ deformación plástica por rayado.

2.5. Mediciones realizadas en los pasadores y casquillo de los tractores de esteras del tipo KOMATSU D85 P- 21

❖ Dimensiones del casquillo.

Diámetro.....60 mm

Radio.....30 mm

✓ Se determino las dimensiones del pasador nuevo, las características del mismo son las que se reflejan a continuación, ver anexo 4.

❖ Dimensiones del pasador nuevo.

Longitud.....240 mm

Diámetro.....50 mm

Radio.....25 mm

Peso.....4.5 kg

Después de que los pasadores son retirados de su vida útil presentan diferentes dimensiones productos del desgaste, la magnitud del desgaste presentado por los mismos se recogen en la tabla 2.6

Tabla 2.6. Mediciones realizadas a los pasadores desgastados.

Mediciones realiza al pasador	
Numero de mediciones	Desgaste del pasador lineal; mm
1	0
2	0.5
3	1
4	1.5
5	2
6	2.25
7	3
8	3.5
9	4

Después de realizada las mediciones se pudo tener en cuenta que los pasadores alcanza un valor máximo de 4 mm ($0,004 \mu m$), ver anexo5

✓ El tractor Komatsu D85P₋₂₁ consta con una carga inicial y otra final en la cual se tomaron diferentes dimensiones aproximada partiendo desde la carga inicial y terminando en la final en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Mediciones realizadas al tractor Komatsu D85P₋₂₁

Mediciones realiza al tractor	
Número de mediciones	Carga del tractor; kg.
1	21 800
2	22 000
3	22 500
4	23 000
5	23 500
6	24 000
7	24 500
8	25 200
9	25 725

Después de realizada las mediciones se pudo tener en cuenta un valor máximo 25 725 kg y otro mínimo 21 800 kg de carga.

2.6. Conclusiones del capítulo II

- ✓ Se determinó que el pasador corresponde con la composición química de un acero del tipo AISI 1045 según norma ASTM, el casquillo es AC 1540 y el eslabón es AC 1545.
- ✓ Las condiciones de trabajo de los equipos de laboreo minero sobre todo el tractor D85P está provisto con una longitud de estera a lo largo de la tierra de 3480 mm (11'5"). Con un ancho de 2250 mm (7'5") con buena estabilidad encima de terreno áspero, lo que asegura un traslado de material de poder máximo en la producción en el empuje de la tierra
- ✓ Quedó establecido el procedimiento de cálculo para el desgaste de los pasadores, el epígrafe 2.4 del presente capítulo establece la metodología de cálculo para determinar el desgaste de los pasadores expuesto a condiciones de carga, así como al desgaste por el medio que trabajan.

CAPITULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados derivados del cálculo, y como objetivo principal el análisis económico en los pasadores de las esteras del tractor $D85P_{-21}$, y el impacto ambiental asociados a la Mina de Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

El objetivo del capítulo:

Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos que dan solución al problema planteado.

3.2. Resultados de los cálculos obtenidos.

En el anexo 6 aparecen los resultados obtenidos en la metodología de cálculo

❖ El esquema más sencillo para el cálculo del desgaste por fatiga es el lineal, donde el desgaste de los pasadores ocurre en consecuencia al tiempo de trabajo 6720 hr y el coeficiente de desgaste de 0.6, utilizando la ecuación (2.1).

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

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

❖ Intensidad lineal del desgaste se determina conociendo las mediciones realizadas a los pasadores desgastados, ver Tabla 2.6, y el recorrido de fricción de 7.225mm^2 de la ecuación (2.3).

Se determinó que la intensidad lineal es:

$$= \begin{pmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} - \blacksquare$$

❖ El radio reducido en la curvatura en la zona de contacto se determina por el radio del pasador/casquillo de 2.5 mm y 30 mm respectivamente, ecuación (2.14).

Lo que indica que el radio reducido de los cuerpo en la zona de contacto sea de

=

❖ El semiancho de contacto b del pasador ocurre en consecuencia de la fuerza nominal de 257 250 N y el radio reducido de la curvatura de contacto del pasador/casquillo y la longitud del pasador de 240 mm y el módulo de elasticidad para acero de $2.1 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$ de la ecuación (2.13).

Se tuvo como resultado del semiancho de contacto el siguiente:

$$b = 0.09 \text{ mm}$$

❖ Recorrido de fricción se determina generalmente en zona de fricción del pasador en dependencia del radio medio de contacto que es de 12.5 mm y semiancho de la banda de contacto, ecuación (2.4).

Donde se determinó el recorrido de fricción como resultado el siguiente:

=

❖ La determinación del área nominal de contacto en cuerpos de superficies curvas para contacto entre cuerpo cilíndricos cóncavo y convexo con eje paralelos para, (pasadores de deslizamiento radial) se hace necesario determinar el semiancho de la banda de contacto y la longitud., ecuación (2.15).

El área nominal de contacto en cuerpos de superficies curvas es:

$$A_n = 43.089 \text{ mm}^2$$

❖ Radio o el semieje a para un coeficiente de poisson de 0.3 se determina teniendo en cuenta la fuerza nominal y el la radio de curvatura de contacto entre el pasador/ casquillo con el módulo de elasticidad, ecuación (2.11).

El semieje a , da como resultado el siguiente.

=

❖ El desgaste volumétrico se fundamenta en la medición del volumen antes y después del proceso del desgaste, generalmente se determina partiendo del indicador lineal del desgaste y del área nominal de contacto, ecuación (2.5).

El resultado obtenido del desgaste volumétrico de los pasadores es:

$$= \left(\begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right)$$

❖ Intensidad volumétrica del desgaste se determina cuando el desgaste volumétrico y el área nominal y el recorrido de la fricción se conoce, ecuación (2.6).

Partiendo desde esta vía se determinó el valor de la intensidad volumétrica del desgaste en los pasadores:

$$= \left(\begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right) -$$

❖ Velocidad o razón de desgaste este indicador se mide el ritmo del proceso de desgaste y el tiempo en que este ha tenido lugar, ecuación (2.7).

La velocidad del desgaste para los pasadores es:

$$= \left(\begin{array}{c} \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \\ \times \end{array} \right) \times \text{---}$$

❖ Esta entra en una unidad del largo de los cilindros cóncavos y convexos, suponiendo que ella esta distribuida uniformemente a lo largo de la longitud del pasador con la aplicación de la fuerza nominal, ecuación (2.8).

El resultado de la carga aplicada en el pasador es:

$$= \times \text{---}$$

❖ Se determina el Peso nominal teniendo en cuenta la fuerza nominal y dos veces el semiancho de la banda por la longitud del pasador, ecuación (2.16).

Peso nominal que resiste el pasador es:

$$P_n = 5.97 \times 10^3 \frac{N}{mm^2}$$

❖ La tensión máxima en el centro de la zona de contacto casquillo/ pasador no es mas la fuerza que actúa y la relación que existe entre a y b (b/a) ecuación (2.19).

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

$$\sigma = \times \text{---}$$

❖ La presión se distribuye irregularmente la mayor, que actúa en el centro del área de roce, es 1.5 mayor que la media correspondiente a la presencia de la fuerza normal y el semieje a , que actúa en el pasador, ecuación (2.20)

La presión máxima que resiste el pasador es:

$$= \quad \times \quad \text{---}$$

❖ Del análisis del estado de tensión en los puntos característico en el caso de una zona de contacto circular, la tensión máxima en el centro de la zona de contacto del pasador se determina teniendo en cuenta la fuerza nominal y el semieje a , que actúa en el pasador, ecuación (2.21)

Tensión máxima en el centro de la zona de contacto de los pasadores es igual a la presión máxima:

$$\sigma = - \quad \times \quad \text{---}$$

$$\text{Donde: } \sigma_3 = -p_{\max}$$

❖ En los pasadores de deslizamiento radial curvo la tensión máxima de contacto se determina según la fuerza nominal, modulo de elasticidad, longitud y el radio de curvatura que actúa sobre el pasador, ecuación (2.25).

$$\sigma = \quad \times \quad \text{---}$$

❖ Grado de penetración de las asperezas o partículas abrasivas no es más que la fuerza nominal y la dureza y el radio de curvatura que actúa en los pasadores, ecuación (2.26).

El diámetro de la partícula abrasiva que actúa en los pasadores es:

$$Dp = 0.6 \mu m$$

3.3. Método estadístico de planificación de experimento.

Se modeló estadísticamente a través del análisis de regresión, la influencia del desgaste generado por la carga del equipo sobre el pasador de la estera para evaluar las mecánicas y funcionales del acero AISI 1045. Dicho análisis se realizó atendiendo a los principios

enunciados en el epígrafe 2.5 del capítulo II. La variable independiente fue carga y la variable dependiente el desgaste, las cuales están relacionadas con los valores de endurecimiento por acritud.

Las propiedades mecánicas y funcionales cuyo comportamiento se describe en los modelos que se desarrollan y éstas son: Desgaste VS carga.

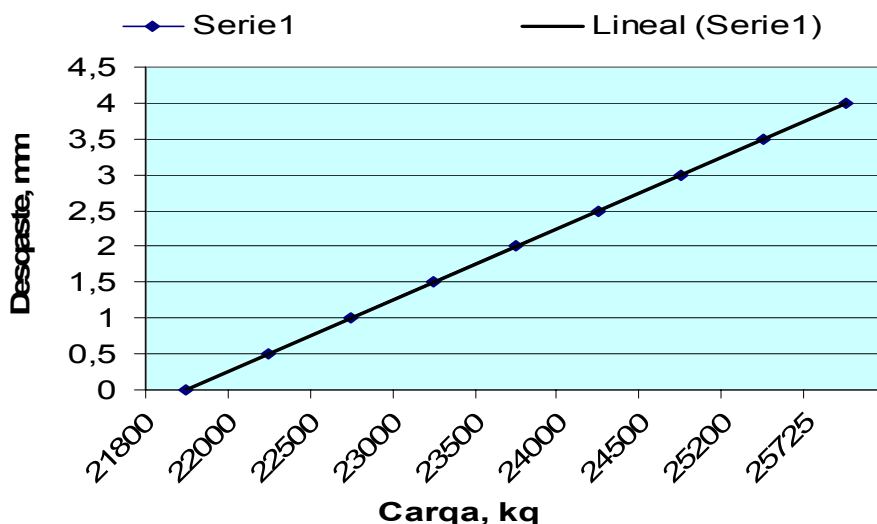


Gráfico 3.1. Comportamiento del desgaste VS carga.

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre desgaste y carga. La ecuación del modelo de regresión ajustado es

$$\text{Desgaste} = -21,1643 + 0,000982349 \cdot \text{carga}$$

3.4. Estadística de la regresión.

En la tabla 3.1 se refleja el análisis de la estadística de la regresión para estimar el comportamiento del desgaste en correspondencia con la carga

Tabla 3.1. Estadísticas de la regresión

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,99607841
Coeficiente de determinación R ²	0,99217219
R ² ajustado	0,99105393
Error típico	0,12951401
Observaciones	

Este procedimiento está diseñado para proporcionar estimaciones de los coeficientes de regresión cuando las variables independientes están fuertemente correlacionadas. Permitiendo un pequeño sesgo, a menudo la precisión de las estimaciones puede aumentarse en gran medida.

El valor actual del parámetro de cadena es 0,0, qué es equivalente a los mínimos cuadrados ordinarios. Para cambiar el parámetro de cadena, pulsar el botón alternativo del ratón y seleccione Opciones del Análisis. El parámetro de cadena está normalmente entre 0.0 y 1.0. Para determinar un buen valor para el parámetro de cadena, debe examinar los coeficientes de la regresión estandarizados o los factores de inflación de la varianza.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica 99,2172% de la variabilidad en el desgaste. El estadístico R-cuadrado ajustado más conveniente para comparar modelos con números diferentes de variables independientes es 99,1054%. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0,129514. El error absoluto de la media (MAE) de 0,0996278 es el valor promedio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) revisa los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se suceden los datos en su fichero. Dado que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

3.5. Análisis de varianza.

Este procedimiento está diseñado para comparar dos muestras de datos. Calculará varios estadísticos y gráficos para cada muestra, y ejecutará varias pruebas para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las dos muestras.

Tabla 3.2. Análisis de varianza para las variables desgaste VS carga.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	14,8825829	14,8825829	887,247584	1,2388E-08
Residuos	7	0,11741715	0,01677388		
Total	8	15			

La tabla ANOVA descompone la variabilidad del desgaste en las contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los P-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que ningún P-valor es inferior a 0,05, ninguno de los factores tiene efecto estadísticamente significativo en desgaste para un nivel de confianza del 95,0%.

3.6. Probabilidad del modelo.

La gráfica 3.2 muestra el resumen estadístico para dos muestras de datos (desgaste VS carga.)

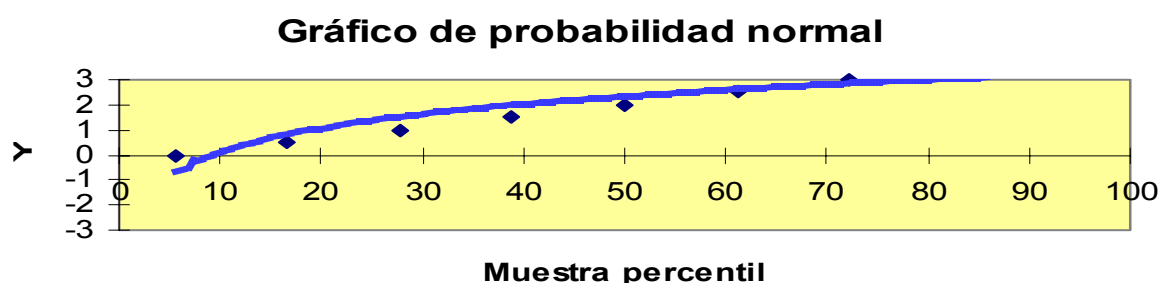


Gráfico 3.2. Comportamiento de la probabilidad del modelo ajustado.

De particular interés está la asimetría estandarizada y la curtosis estandarizada que puede usarse para determinar si las muestras proceden de distribuciones normales. Los valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican salidas significativas de normalidad que tendería a invalidar las pruebas que comparan las desviaciones normales. En este caso, ambos valores de asimetría estandarizada están dentro del rango esperado. Ambos valores de curtosis estandarizada están dentro del rango esperado.

3.7. Curva de regresión ajustada.

Los intervalos de predicción y confianza correspondientes a los límites internos y externos en el gráfico del modelo ajustado.

Esta tabla muestra los valores predichos para el desgaste usando el modelo ajustado. Además de las mejores predicciones, la tabla muestra:

- (1) 95,0% intervalos de predicción para las nuevas observaciones
- (2) 95,0% intervalos de confianza para la media de muchas observaciones.

Tabla 3.3. Valores de la predicción del desgaste VS carga.

Valores predichos					
			95,00%		95,00%
Predicho		Límites de Predicción		Límites de Confianza	
X	Y	Inferior	Superior	Inferior	Superior
21800,0	0,250874	-0,100542	0,602289	0,078531	0,423216
25725,0	4,10659	3,74303	4,47016	3,91066	4,30252

Los intervalos de predicción y confianza correspondientes a los límites internos y externos en el gráfico del modelo ajustado.

3.8. Análisis del ajuste de la curva.

Este resultado muestra los resultados del ajuste a distribución normal a los datos en el desgaste. Se muestran los parámetros estimados de la distribución ajustada. Se puede comprobar si la distribución normal se ajusta los datos adecuadamente seleccionando. En la gráfica 3.3 se observa el comportamiento del ajuste de la curva del modelo.

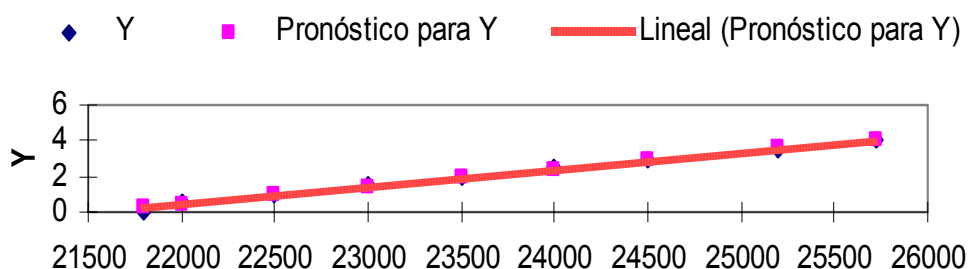


Gráfico 3.3. Comportamiento del ajuste de la curva del modelo.

Resumen del Análisis

Datos: Desgaste

9 valores comprendidos desde 0,0 hasta 4,0

Distribución normal ajustada:

Media = 2,0

Desviación típica = 1,36931

Límites de Tolerancia Normal para Desgaste

95,0% intervalo de tolerancia para 99,73% de la población

X-bar +/- 5,38446 sigma

Superior: 9,37298

Inferior: -5,37298

Asumiendo que el Desgaste proviene de una distribución normal, los límites de tolerancia que podemos situar 95,0% confianza que 99,73% de la distribución se encuentra entre -5,37298 y 9,37298. Este intervalo se calcula tomando la media de los datos $\pm 5,38446$ veces la desviación típica.

3.9. Valoración económica

En todas las investigaciones y operaciones que se realicen el término económico juega un papel fundamental, tanto en la calidad del trabajo como en el empleo óptimo de los recursos de los que se dispongan. Así también en los momentos actuales resalta por su importancia el impacto medio ambiental debido a la destrucción gradual que sufre el planeta y al agotamiento de recursos necesarios.

Actualmente la sustitución de los pasadores no se realiza, sino la sustitución de toda la estera, pues para desmontar los pasadores se hace muy difícil hacerlo sin deteriorar otros elementos como los eslabones de dichas esteras. Estas esteras son sustituidas en la mayoría de los casos debido al desgaste de los pasadores.

❖ Según el manual de precios oficiales de la empresa Importadora del Níquel.

El costo de la estera perteneciente al Buldózer del tipo KOMATSU D85P-21 que es el más utilizado en toda la empresa del níquel, es de 9 952.65 USD, incluyendo el seguro 39.49 USD, importe del flete 172.42 USD desde el puerto de la Habana, y el costo del empaque 84.64 USD.

Estas esteras son cambiadas en un plazo de aproximadamente seis años de trabajo.

❖ Gastos en materiales

- ✓ El costo de la chatarra de acero es de 18.00 CUC.
- ✓ Un pasador desechado con un peso de 4.5 kg, un eslabón de estera de 17 kg de peso y un casquillo de 1.2 kg de peso.
- ✓ Peso total de 22.7 kg.
- ✓ Con un precio como chatarra para materia prima de 0.4 CUC.

3.10. Impacto ambiental.

En la Mina de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara experimenta una vertiginosa rapidez de los cambios culturales, tecnológicos, sociales y productivos, esto implica la necesidad de frecuentes adaptaciones de la actividad humana en sus múltiples facetas a

las mutables exigencias del entorno. El problema ecológico planteado desde hace varias décadas como un problema global de la humanidad, adquiere dimensiones particulares serias cuando se considera el impacto tecnológico que los descomunales avances de la ciencia y la técnica han provocado en la vida social del territorio en los últimos tiempos.

Esta afirmación refleja parte del efecto social de los resultados de la investigación y sus perspectivas a partir de los resultados obtenidos.

Se puede afirmar que toda investigación encaminada a estudiar los problemas que de alguna manera puedan afectar el medio ambiente, constituye una herramienta para trabajar esta temática en aras de garantizar el sano desarrollo de las actividades sociales y económicas.

En el caso de los pasadores de las esteras de los equipos de laboreo minero, se presentan evidencias de contaminación.

El desgaste producido en los pasadores origina la pérdida de dimensiones, provocando el desbalanceo del sistema y a su vez grandes vibraciones de magnitudes que generan ruidos. Por otra parte al terminar la vida útil de los pasadores es casi imposible sustituirlos sin dañar otros elementos de la estera como los eslabones de esta, y aunque en nuestro país se hace énfasis en la recuperación de materias primas como las chatarras de acero.



3.11. Conclusiones del capítulo III.

- ✓ Se obtuvieron los resultados para la determinación de diferentes tipos de desgaste y tensiones de contacto bajo la acción de la rodadura.
- ✓ Se realizó el análisis estadístico y gráfico del desgaste VS carga aplicada en los pasadores de los tractores D85P₋₂₁.
- ✓ Debido a las condiciones de trabajo a que están sometidos los equipos de laboreo minero del tipo KOMATSU D85P₋₂₁ se obtuvieron la valoración económica e impacto ambiental.

Conclusiones generales.

✓ Las condiciones de trabajo de los equipos de laboreo minero sobre todo lo que se encargan de la remoción del mineral específicamente los tractores de esteras del tipo KOMATSU D85P₋₂₁, los pasadores de las mismas, que trabajan bajo la acción simultánea los mismos están expuestos a condiciones de desgaste por rodadura. Según el análisis de la bibliografía se puede concluir que el fenómeno de desgaste es perjudicial para el funcionamiento de una máquina, este desgaste prematuro del pasador utilizado en equipos de laboreo minero, está dada 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.

✓ Se determinó que el pasador corresponde con la composición química de un acero del tipo AISI 1045 según norma ASTM, el casquillo es AC 1540 y el eslabón es AC 1545 expuesto a condiciones de trabajo en los equipos de laboreo minero sobre todo el tractor D85P₋₂₁ está provisto con una longitud de estera a lo largo de la tierra de 3480 mm (11'5''). Con un ancho de 2250 mm (7'5'') con buena estabilidad encima de terreno áspero, lo que asegura un traslado de material de poder máximo en la producción en el empuje de la tierra.

✓ Se obtuvieron los resultados estadísticos para la determinación de diferentes tipos de desgaste VS carga y las tenciones de contacto bajo la acción de la rodadura seca. Debido a las condiciones de trabajo a que están sometidos los equipos de laboreo minero del tipo KOMATSU D85P₋₂₁ se obtuvieron la valoración económica e impacto ambiental.

Recomendaciones

- ✓ Extender los cálculos realizados a los pasadores a otros elementos que conforman estos equipos sometidos a otros tipos de desgaste.
- ✓ Dar continuidad a la investigación del desgaste de los pasadores de los equipos de laboreo minero.
- ✓ Proponer la experiencia recogida en el presente trabajo, a los distintos sectores de la economía de nuestro país.
- ✓ Realizar la valoración económica detallada de la inversión que se debe realizar considerando las ofertas de varios proveedores.
- ✓ Capacitar a los operarios de la planta en cuanto a la importancia que tiene la preservación del medio ambiente.
- ✓ Convertir el trabajo en material de consultas para la asignatura de elemento de maquina.



BIBLIOGRAFIA

1. Alcántara, Fernández, Rodríguez, Fernández. Procedimiento para endurecer el acero 45 mediante la deformación plástica con rodillo simple. Revista ingeniería e investigación VOL. 28 No. 1, 2007(15-21)
2. Alvarez. L, González.J. *Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Revista construcción de maquinaria*. Santa Clara, No2: 69-76, 1993.
3. Alvarez, E; G, M. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2. Mayo-Agosto. 1995. p 69-76.
4. Bold, P.E. Shear mode crack growth and rolling contact fatigue. Wear. Vol: 307-317, 1991.
5. Clauser, H. R. *Diccionario de materiales y procesos de ingeniería*. Editorial Labor S.A. Barcelona, 1985.
6. Caubet, J. *"Teoría y Práctica Industrial del rozamiento"*. España, 1971.
7. Dobrovolski, Zablensky, Mak, Radchik, Erlij. Elementos de maquinas. Editorial Mir, Moscú, 1970.
8. Escanaverino, J. M. *Teoría y práctica del rozamiento*. La Habana, 1983.
9. Handbook.; Manual del tractor Komatsu D85P₂₁ en la mina de la Empresa Ernesto Guevara.
10. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág. 17-22
11. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág. 53-89
12. Govantes, G. Rodríguez,G. *Relación entre el desgaste abrasivo, composición química y propiedades mecánicas de una familia de aceros inoxidables al Cr-Ni-Cu-Al*. Revista construcción de maquinarias. Santa Clara, No 1: 21-26, 1989.
13. Kragelsky, I.V.: Fundamentos del cálculo de la fricción y el desgaste. Mashinostroyeniye.Moscú. 1977.



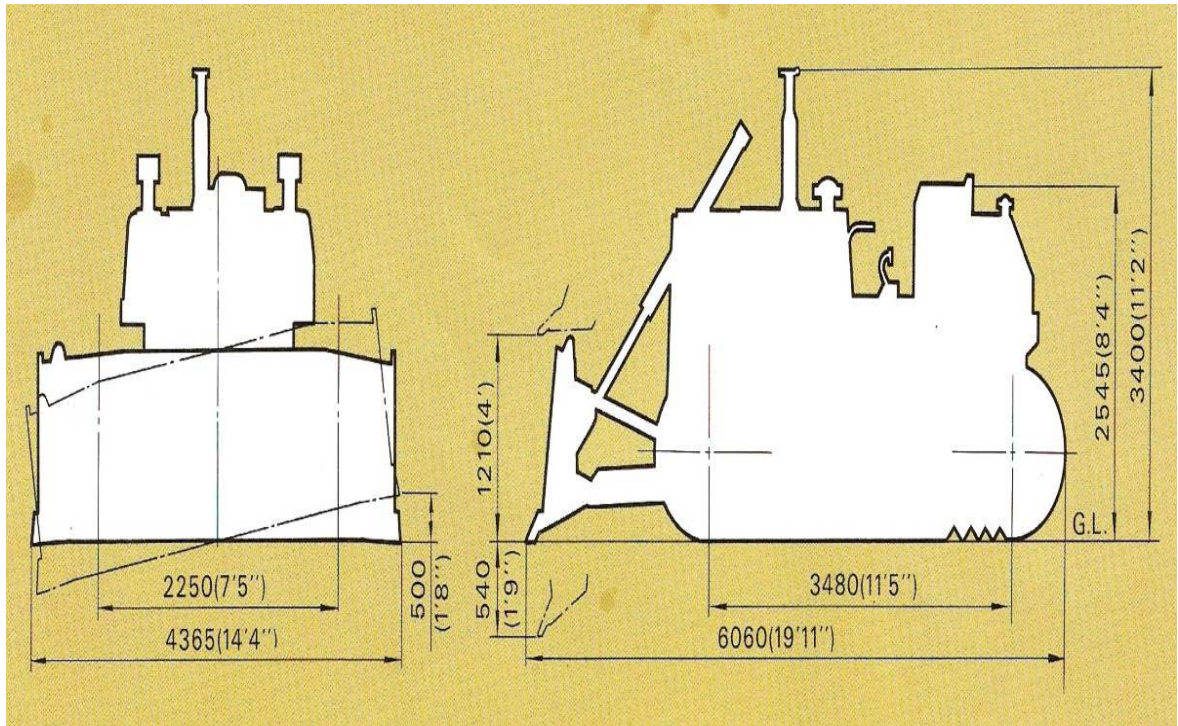
14. Kruschov, M.M. Resistance of metals to wear by abrasion, as related to hardness. "Proceedings of Conference on Lubrication and Wear". London 55- 59. 1957.
15. Fernández, G. Resistencia de materiales, (Tomo II), villa Clara, Julio. 1980
16. Martínez, F. Wieslaw, L. *Aspectos físico – químicos del desgaste abrasivo. Revista construcción de maquinaria*. Santa Clara. No 2: 11-35. 1981.
17. Martínez, F. Martínez, H. *Adaptación de máquinas pulidoras para ensayos de desgaste abrasivo. Revista construcción de maquinaria*. Santa Clara. No 1: 47-55. 1981.
18. Varela, A. Presentación de Metalurgia Física II. Octubre de 2003. Disponible en el World Wide Web. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
19. Verdeja, L, González, R. *El desgaste de materiales en el crisol de horno alto: conceptos generales. Revista de minas*. Madrid: No 13 -14, 1996.
20. Suárez, A. Resistencia al desgaste abrasivo del hierro fundido de baja aleación. Boletín de información científico técnico. La Habana, No 2: 40-54, 1988.
21. OTAÑO, N. J. Fragmentación de rocas con explosivos. Editorial Félix Varela. La Habana. 1998.
22. 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
23. Tenenbaum M.M Desgaste de materiales de construcción y elemento de maquina en el desgaste abrasivo. Editorial Mashinoestroyeniye, 1966.
24. Winer, W.O. and Peterson, M. B. Wear control Handbook. ASME. 1980.



Anexo: #1

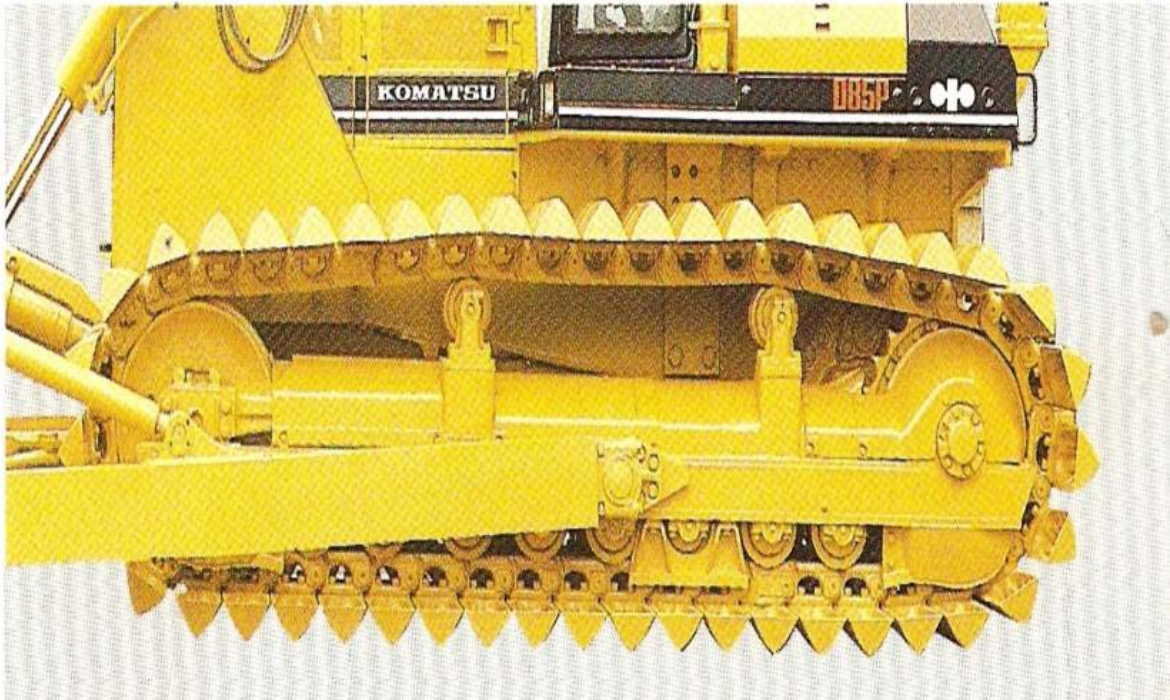


Anexo: #2





Anexo: #3





Anexo: #4





Anexo: #5





Anexo: #6

- Realización del cálculos en los pasadores.
- Carga que soporta el pasador.

$$F := \frac{P}{n} \quad \text{---}$$

$$= \quad \times \quad \text{---}$$

- Semiancho de la banda de contacto del pasador.

$$b := \frac{\left(\frac{P}{n} \right)}{\left(\frac{1}{\sigma} + \frac{1}{\sigma} \right)} \quad \text{---}$$

$$= \quad \sqrt{\frac{P}{n \cdot \sigma}} \quad =$$

- Área nominal de contacto del pasador

$$A := b \cdot l$$

- Peso nominal que soporta el pasador

$$W := \frac{A}{\rho} \quad = \quad \times \quad \text{---}$$

- Desgaste lineal (wh ,μm o mm)

$$w := \left(\frac{P}{n} \right) \quad \text{---}$$

$$= \left(\frac{P}{n} \right) \quad =$$



- Desgaste por fatiga.

$$\begin{array}{ccc} \vdash & & \vdash \\ \vdash & \cdot & \\ & = & \times \end{array}$$

- Desgaste volumétrico

$$\begin{array}{ccccccc} \cdot & & & \cdot & & & \cdot \\ = & & & = & & & = \\ \cdot & & & \cdot & & & \cdot \end{array}$$

$$= \left(\begin{array}{c} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right)$$

- Velocidad o razón del desgaste(W')

$\begin{array}{l} \cdot \\ \cdot = \end{array}$

 $\begin{array}{l} \cdot \\ \cdot = \end{array} \quad \text{_____}$

[illegible]



- Radio del área o semieje a, para el coeficiente de Poisson $\mu: 0.3$.

$$a := \sqrt{\frac{F \cdot \mu}{\pi \cdot \sigma_c}} =$$

- Tensión máxima en el centro de la zona de contacto circular.

$$\sigma_c := - \frac{F}{\pi \cdot a^2}$$

- Presión máxima de contacto.

$$p_c := \frac{F}{\pi \cdot a^2}$$

$$\sigma = - \frac{F}{\pi \cdot a^2} \times$$

$$= \frac{F}{\pi \cdot a^2} \times$$

$$, \sigma_c := - \frac{F}{\pi \cdot a^2}$$

- Tensión máxima en el centro de la zona de contacto pasador/ casquillo

$$\sigma_c := \frac{F}{\pi \cdot a^2} \quad \sigma = \frac{F}{\pi \cdot a^2} \times$$

- Tensión máxima de contacto.

$$\sigma_c := \frac{F}{\pi \cdot a^2} \quad \sigma = \frac{F}{\pi \cdot a^2} \times$$

- Grado de penetración.

$$p_c := \frac{F}{\pi \cdot a^2}$$

$$p_c := \left(\frac{F}{\pi \cdot a^2} \right) - \left(\frac{F}{\pi \cdot a^2} \right) \cdot \left(\frac{F}{\pi \cdot a^2} \right) := \mu$$