



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

**Tesis en opción al Título de Master en
Electromecánica**

**Comportamiento microestructural del material
del enfriador de mineral de la Empresa
“Cdte. Ernesto Che Guevara”**

Autor (A): Ing. Yunaydi Paumier Castañeda

“Año 55 de la Revolución”

Moa 2013



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

**Tesis en opción al Título de Master en
Electromecánica**

**Comportamiento microestructural del material
del enfriador de mineral de la Empresa
“Cdte. Ernesto Che Guevara”**

AUTOR (A): Ing. Yunaydi Paumier Castañeda

TUTOR: Dr. C. Tomás Hernaldo Fernández Columbié

“Año 55 de la Revolución”

Moa 2013



Declaración de Autoridad

Yo: Yunaydi Paumier Castañeda

Autor de este trabajo de maestría, 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.

Ing. Yunaydi Paumier Castañeda

Dr. C. Tomás Fernández Columbié



Pensamiento

“Nosotros tenemos que encontrar el punto ideal de la calidad, producir no solamente más, sino mejor...”

Che.



AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dado sabiduría para realizar este trabajo.

A mi tutor Dr. C. Tomás Fernández Columbié por su apoyo y ayuda desinteresada.

A todos mis compañeros del departamento de Mecánica y Metalurgia, especialmente a Yodelkis Delgado, Dayanis Alcántara Borges y Félix A. Morales.

A mis padres, a mi esposo y a mi hermano, Noris Delgado, Rubildo Cobas, Eduardo Vázquez y Yionelkis Paumier, por su apoyo incondicional.

A los que de un modo u otro contribuyeron con el desarrollo del trabajo.

A nuestra Revolución, por las posibilidades que me ofrece.

A todos muchas gracias.



DEDICATORIA

A mi hijo Kevin Emanuel Vázquez Paumier, es lo más grande y hermoso que Dios me ha dado.

A todos los que me dieron fuerza y me animaron a seguir.



Síntesis

El presente trabajo se realiza con el objetivo de determinar el comportamiento microestructural del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" analizando la microestructura del acero AISI 1340, el agrietamiento y el desgaste progresivo en el interior del mismo. La metodología empleada para este fin, es el estudio del método de elementos finitos mediante el software COSMOS V 4.5, así como también el desarrollo de las técnicas de análisis químico, microscopía óptica, ensayos de dureza (HRB) y microdureza (HVN), a través de los cuales se demuestran los cambios que existen en su estructura, y la distribución de tensiones por efecto del gradiente de temperatura al llevarse a cabo el proceso de enfriamiento de mineral.

Palabras Claves: enfriadores cilíndricos rotatorios, tensiones, mineral reducido, microscopía óptica, microestructural.

Synthesis

The present research is carried out with the objective of characterizing the microstructure of the material of the rotary cylinder in the mineral cooler used in the company "Comandante Ernesto Che Guevara", analyzing the microstructural behaviour of the steel AISI 1340, the cracking and the progressive waste inside the same one. The methodology employed for this purpose is the study of the finite elements method by means of the COSMOS V 4.5 software, and also the development of chemical analysis, optical microscopy, hardness test (HRB) and micro-hardness test (HVN) techniques, by means of which the existing changes in its structure and the distribution of tensions due to the effect of the temperature gradient during the cooling of the mineral are proven.

Keys words: rotary horizontal cooler, tensions, reduced mineral, optic microscopy, microstructure.



TABLA DE CONTENIDOS

SÍNTESIS	Pág
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1. Introducción	5
1.2. Trabajos precedentes	5
1.3. Descripción de la instalación de estudio	10
1.3.1. Análisis del proceso de enfriamiento del mineral reducido	12
1.3.2. Funciones del enfriador	13
1.4. Manifestaciones del desgaste abrasivo	13
1.4.1. Desgaste por partículas abrasivas	17
1.4.2. Comportamiento microestructural de materiales frente al desgaste	19
1.5. Materiales empleados en enfriadores de mineral	20
1.6. Propiedades físicas, mecánicas y funcionales del acero al manganeso	21
1.7. Generalidades del Método de Elementos Finitos	23
1.8. Conclusiones del capítulo I	26
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	27
2.1. Introducción	27
2.2. Análisis del material del enfriador	27
2.3. Diseño de experimentos	29
2.3.1. Temperatura	29
2.3.2. Espesor	30
2.3.3. Dureza superficial	30
2.4. Preparación mecánica de la probeta	30
2.4.1. Desbaste y pulido	31
2.5. Corte de las probetas	32
2.5.1. Tiempo de corte	33
2.6. Análisis microestructural	34
2.7. Ensayo de dureza aplicado a las muestras	34
2.7.1. Método de dureza	34
2.8. Ensayo de desgaste abrasivo	35
2.8.1. Parámetros estructurales para realizar ensayo de desgaste abrasivo	36



2.8.2. Parámetros operacionales	37
2.8.3. Parámetros de interacción	37
2.9. Procedimiento estadístico	40
2.10. Procedimiento para la modelación por Método de Elementos Finitos	41
2.11. Conclusiones del capítulo 2	43
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	44
3.1. Introducción	44
3.3. Observación con microscopía óptica	44
3.5. Análisis de la dureza Vickers	46
3.6. Análisis del proceso de desgaste abrasivo	47
3.6.1. Análisis del desgaste a la entrada del enfriador	49
3.5.2. Análisis del desgaste en el centro del enfriador	51
3.6.3. Análisis del desgaste a la salida del enfriador	53
3.8. Análisis estadístico	55
3.7. Análisis por el Método de Elementos Finitos	57
3.9. Valoración económica	59
3.10. Impacto ambiental	60
3.11. Conclusiones del capítulo 3	62
CONCLUSIONES GENERALES	
RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXOS	



INTRODUCCIÓN

En 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 limitaciones 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 problemática de la vida útil y la fiabilidad de los elementos de máquinas están relacionados con el estudio de las leyes y mecanismos del desgaste que sufren durante sus períodos de explotación. El estudio de esta problemática es necesario para poder recomendar una estructura adecuada en cuanto al material y tratamiento térmico seleccionado.

Existe gran variedad de factores que traen como consecuencia el deterioro de los elementos de máquinas, por ejemplo, las condiciones de trabajo y explotación a que están sometidos los mismos. Las propiedades mecánicas y tecnológicas que puedan tener dichos elementos tienen particular significación en el aumento de su fiabilidad y el alargamiento de su vida útil.

Las nuevas tendencias relacionadas con el incremento de los niveles productivos y el vertiginoso desarrollo de La Unión del Níquel, demandan que cada día se perfeccionen los procesos tecnológicos y se eleve la eficiencia metalúrgica de los mismos.

Los enfriadores cilíndricos rotatorios son muy utilizados en las industrias de procesos, en estos equipos se enfría el mineral proveniente de los hornos por un sistema de rotación dentro de una piscina donde fluye constantemente agua fría cumpliendo su objetivo fundamental que es el enfriamiento.

Estos enfriadores por su constante trabajo presentan cada cierto tiempo grietas en las terminaciones de los rines guías de los carros agitadores así como desgaste en la pared interior del cuerpo debido a la fricción entre el flujo de mineral reducido que se trasladan en el interior de estos cilindros y las paredes interiores de los mismos, y la fricción entre el agua de enfriamiento y las paredes exteriores de los cilindros. Este fenómeno constituye uno de los factores que contribuyen a la disminución de la



eficiencia, productividad y la vida útil de dichos equipos y el incremento de los gastos para la reparación y reemplazo de los mismos.

Situación problemática

La planta de Hornos de Reducción tiene una importancia vital dentro del proceso de obtención del níquel, es en ésta donde se crean las condiciones (reducción de óxidos de níquel y cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica. Un eslabón importante de la planta lo constituyen los enfriadores de mineral (pues en ellos se debe enfriar el mineral desde la temperatura de 700 °C a la entrada del horno hasta 200 °C que sale del enfriador), el cilindro, para realizar el proceso de enfriamiento lo realiza sumergido dentro de una piscina de agua, estos cambios bruscos de calentamiento y enfriamiento provocan afectaciones al material, su rápido deterioro y su vida útil, se ha observado en la superficie del cilindro escamas y óxidos, provocado por los cambios constantes de temperatura al que está sometido.

Problema

Son insuficientes los estudios realizados acerca del comportamiento microestructural, la resistencia al desgaste y el efecto de la temperatura sobre el material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral.

Objeto de estudio

Material del cilindro rotatorio de los enfriadores de mineral laterítico de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Campo de acción

Determinación del desgaste, comportamiento microestructural y el efecto de la temperatura sobre el material del cilindro rotatorio.

Hipótesis

Teniendo en cuenta la temperatura, el espesor y la dureza del material del enfriador de mineral laterítico, que está fabricado de acero AISI 1340, es posible determinar si existe variación en la microestructura del mismo y conocer por las condiciones de trabajo si tendrá menor durabilidad para el cual fue diseñado.



Objetivo general

Determinar el comportamiento microestructural y el desgaste que sufre el material del enfriador de mineral laterítico teniendo en cuenta el efecto de la temperatura de trabajo del mismo.

Objetivos Específicos

1. Definir las regularidades del comportamiento mecánico y microestructural del material del enfriador de mineral sometido a cambios de temperatura y desgaste.
2. Realizar ensayos espectral y de microscopía óptica para la evaluación del comportamiento del material del enfriador de mineral.
3. Caracterizar a través de las temperaturas de trabajo, los cambios microestructurales al que está expuesto el material del cilindro del enfriador.

Tareas

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Planificación, diseño y realización de experimentos.
3. Análisis de los resultados y obtención del comportamiento microestructural del acero AISI 1340.
4. Determinación de las tensiones térmicas generadas en el acero AISI 1340 del material sometido a la acción de cargas dinámicas (altas temperaturas y desgaste abrasivo).
5. Valoración de los efectos económicos y ambientales.

Dentro de los métodos teóricos los más empleados fueron:

- **Análisis y síntesis:** división y unión abstracta de las variables empleadas en el trabajo, el comportamiento microestructural, la dureza y las tensiones obtenidas en el material del cilindro del enfriador de mineral laterítico.
- **Inducción y deducción:** la inducción permitió arribar a proposiciones generales a partir de hechos aislados y la deducción posibilitó, a partir del estudio de conocimientos generales de los métodos de cálculo de resistencia de materiales, inferir particularidades para un razonamiento lógico.
- **Los métodos históricos:** posibilitaron el estudio detallado de los antecedentes, causas y condiciones históricas en que surgió el problema.



- **Los métodos lógicos:** se basaron en el estudio histórico de la microestructura del material del cilindro del enfriador de mineral.
- **La modelación:** se crearon abstracciones para la determinación de los componentes y del estado deformacional en ciertos puntos característicos del material del cilindro del enfriador de mineral.
- **Los métodos empíricos:** explican las características observables y presuponen determinadas operaciones prácticas, tanto con los objetivos, como con los medios materiales del conocimiento utilizado. Estos métodos se expresan a través de las técnicas de la observación, documentación, la comunicación personal e impersonal y la experimentación.

CAPÍTULO 1



CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Introducción.

Los procesos físico – químicos que ocurren en la planta de Hornos de Reducción son de vital importancia en el esquema tecnológico de la fábrica ya que es allí donde ocurre la reducción del mineral para garantizar el traspaso del níquel y cobalto del mineral reducido al licor en el proceso de lixiviación. El enfriamiento del mineral reducido que se lleva a cabo en los enfriadores de mineral ejerce una gran influencia en el desarrollo adecuado del proceso posterior de lixiviación.

En este capítulo se analizan los principales trabajos realizados y las diferentes publicaciones expuestas en la bibliografía especializada sobre el tema de los enfriadores de mineral reducido, se establecen los fundamentos teóricos del proceso de enfriamiento de mineral y se definen algunos aspectos relacionados con el tema.

1.2. Trabajos precedentes

Sai et al., (1992) reportan los datos experimentales para la respuesta transitoria de los cilindros rotatorios en término de la variación en la velocidad de descarga del sólido para un tiempo en el intervalo en las condiciones de operación; la velocidad en la alimentación del sólido, la velocidad de rotación y la inclinación del cilindro.

Perron y Bui (1994) proponen un modelo no lineal para predecir la respuesta transitoria en los cilindros rotatorios teniendo en cuenta la velocidad total en la cama que sigue al modo despacio. Ellos validan el modelo usando los datos reportados por los autores anteriormente mencionados, esta validación se basa en una corrida experimental para la velocidad del sólido alimentado así como también para velocidad de rotación e inclinación del cilindro.

Rosell (1986), planteó que una de las causas que inciden en el enfriamiento deficiente del mineral se encuentra en la cantidad de carros raspadores y el número de aletas o levantadores. Luego con el objetivo de eliminar las averías en el interior de los enfriadores de mineral, se propuso reforzar los brazos de los mismos incrementando así su tiempo de vida útil (Medina, 1995). Se debe destacar que aún no se tiene un criterio serio sobre el comportamiento de los carros en el interior de los enfriadores, pues se carece de experimentos que demuestren la incidencia del diseño y la cantidad de carros en la temperatura de salida del mineral.



En las condiciones actuales se observa la formación de costras en la superficie exterior del cilindro que a su vez disminuyen la transferencia de calor hacia el agua e introducen errores en las mediciones, Chacón (1982), expuso que los raspadores exteriores impedían la formación de costras en el exterior del cuerpo del enfriador, favoreciendo el enfriamiento, los cuales fueron eliminados en su totalidad y no aparece documento alguno que justifique el porque se eliminaron los mismos.

Rodríguez (1970; 1978) y Gangara (1980), aportaron información valiosa sobre los mecanismos de transferencia de calor que provocan el enfriamiento del mineral reducido cuando se introduce vapor de agua o agua atomizada en la atmósfera del enfriador. A pesar de que ya no se le introduce agua en ninguna de las formas mencionadas sus trabajos no dejan de ser de interés para la investigación.

Otros investigadores con ayuda de instalaciones experimentales observaron las características del movimiento de mineral reducido caliente dentro de tambores rotatorios y los resultados obtenidos demostraron que el ángulo formado por la superficie del mineral con la horizontal oscilaba entre los 20 y 26°. Además observaron que el mineral se desplaza en el cilindro formando una masa estática y que se adhiere al material en tanto que este se encuentre más caliente que la placa (Alonso, 1973; Alepuz, 1977). Estos son los únicos experimentos reportados sobre el comportamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales.

Boateng y Barr (1996) estudian el comportamiento de un flujo granular en el plano transversal de un cilindro rotatorio parcialmente lleno, ellos realizan un estudio con el objetivo de comprender y probar las capacidades predictivas del comportamiento reológico de materiales en cilindros rotatorios. En este caso se analizan las características de flujo tales como: la velocidad de las partículas, la temperatura granular y la concentración de sólido para diferentes materiales, teniendo un amplio rango de los coeficientes de restitución. Los resultados de los experimentos proporcionan las suposiciones, restricciones y los datos necesarios para la comprensión del comportamiento de flujos granulares en cilindros rotatorios parcialmente llenos.



Kahkhar et al., (1997) dedican la atención a la segregación radial de mezclas granulares en cilindros rotatorios y analizan la formación de costras debido a la densidad del material. El régimen de flujo considerado es en cascada o el régimen de flujo continuo donde una capa delgada de sólido fluye a lo largo de una pequeña superficie, mientras las restantes partículas rotan como un lecho compacto a lo largo del cilindro. La esencia de la formación de la costra segregada central consiste en el flujo, el mezclado y la segregación en la capa en cascada.

Correa (2000) realiza un balance energético a los enfriadores de mineral y muestra aspectos importantes relacionados con el fenómeno físico que tiene lugar dentro de los mismos, exponiendo además las consideraciones en las que debe estar basado el modelo físico-matemático de estos equipos.

Valle et al. (2000a, 2000b) da una visión de los problemas existentes en los enfriadores de mineral, proponiendo algunas modificaciones para aumentar la capacidad de enfriamiento de la instalación, así como una metodología de cálculo; expone, además, los resultados obtenidos en cuatro corridas experimentales de evaluación de un enfriador.

Incropera (2003) aborda la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de masa y calor, en este trabajo se exponen diferentes situaciones prácticas donde se vinculan los fenómenos de transferencia de calor con los equipos e instalaciones existentes en las industrias metalúrgicas, así como en otras empresas donde se encuentran la ocurrencia de fenómenos térmicos.

Shrager (2004) realiza la modelación de un fluido de alta viscosidad dentro de un cilindro horizontal giratorio que gira a velocidad constante. Realiza estudios paramétricos de la cinemática y de las características dinámicas del proceso, se revelan dos modelos de flujo, así como las curvas específicas para cada flujo que caracteriza la intensidad de dispersión líquida.

Góngora (2004) realiza la modelación físico – matemática del proceso de enfriamiento del mineral reducido en cilindros rotatorios de la planta Hornos de reducción perteneciente a la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa con el objetivo de establecer un modelo empírico – teórico que permita describir el comportamiento dinámico del fenómeno de transferencia de calor existente en la



instalación y con ello contribuir a elevar la eficiencia térmica del mencionado proceso.

Resultan de gran interés los trabajos realizados por Góngora (2004, 2007 y 2009), quien estableció un modelo teórico para la evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros rotatorios, así como el procedimiento para la solución del mismo y las ecuaciones que permiten la identificación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud. A pesar de que se obtuvieron resultados promisorios, sus experimentos se caracterizaron por ser pasivos, debido a las limitaciones que impone el proceso industrial.

Abdalla (2005) realiza la simulación numérica de la convección natural de doble difusividad en un cilindro horizontal, con el cual demuestra que el aumento de la transferencia de calor puede lograrse aumentando la amplitud de la fuerza termal y frecuencia, aumentando el número de Rayleigh o también disminuyendo el número de Lewis y aumentando el parámetro de proporción de flotación.

Tabera y García (2006) desarrollan un procedimiento de cálculo para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud basado en el análisis térmico del proceso de enfriamiento del mineral a escala piloto. Estos autores omiten la transferencia de calor por radiación en el interior del cilindro, realizaron algunas suposiciones que resultan importantes en el análisis térmico del proceso.

Leyva *et al.* (2006) realiza el rediseño y fabricación del Cooler en la Fábrica René Ramos Latour de Nicaro, obteniendo grandes resultados en el ámbito económico para la industrial cubano del níquel. Propone fabricar estos Cooler con la misma calidad que los originales, agregándoles algunos nuevos componentes para poder mantener sus objetivos fundamentales como son sus ejes transversales y longitudinales de forma tal que no vaciaran la piscina de enfriamiento donde trabajan, creando una tecnología de fabricación nueva para humanizar el trabajo y mediante la adición de componentes para mejorar y ampliar su calidad obteniéndose un equipo mejor diseñado y de mayor durabilidad. Este rediseño permite obtener un equipo altamente productivo con la calidad exigida por el cliente lográndose cumplir los objetivos planteados para su fabricación.



Góngora (2007) expone las ecuaciones que conforman el modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en cilindros rotatorios horizontales y la fundamentación científica sobre la cual fueron obtenidas. La modelación se basa principalmente en el planteamiento de las ecuaciones del balance energético en forma dinámica de lo cual se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, las cuales se complementan con otras ecuaciones que establecen la relación entre los coeficientes y parámetros físicos.

Echeverría (2009) caracteriza la microestructura del material del cilindro del enfriador de mineral reducido y realiza un análisis tenso – deformacional, demostrando que existen cambios en la estructura del material, en el tamaño de los granos así como una nueva disposición en la red cristalina. Realiza ensayos de dureza y microdureza al material, demostrando que existe un incremento de dureza en el tramo de la entrada del enfriador en relación al de la salida, los cuales están dados por las altas temperaturas (por encima de 727°C) a la entrada del enfriador.

Spencer (2009), realizó la identificación del proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios con ayuda de Redes Neuronales Artificiales, alcanzando un coeficiente de correlación del 93 % entre la temperatura de salida del mineral y las variables independientes. Se considera que se debe hacer esta identificación sobre la base de un diseño de experimentos en los cuales se destaque la interrelación entre variables, debido a que la experimentación pasiva está afectada por la incidencia de los operadores.

Ortiz (2010) simula el comportamiento de la temperatura del mineral reducido durante el proceso de enfriamiento en la empresa "Comandante. Ernesto Che Guevara", mediante el empleo del método de Elementos Finitos. Muestra a través de las simulaciones que el mineral reducido experimenta una variación de su temperatura en aproximadamente unos 450 °C y que en la temperatura del agua de la piscina se aprecia un cambio de 48 °C.

Rodríguez (2011) y Matos (2012), evaluaron el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido, basado en el balance térmico y la modelación estadística. Además establecieron las tendencias de variables como: temperatura del agua



y de la superficie del cilindro en diferentes puntos a lo largo de la instalación, para diferentes flujos de mineral y flujos de agua. Se debe destacar que ambos trabajos se desarrollaron sobre una amplia base experimental a escala industrial, pero el rango de experimentación no fue suficiente, para dar una solución a la problemática en cuestión.

Al análisis y determinación de los coeficientes de transferencia de calor que intervienen en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido a escala industrial, tanto en la empresa "Comandante René Ramos Latour" como en la "Comandante Ernesto Che Guevara" se han dedicado un grupo de investigadores (Matos, 2007; Sotto, 2007; De Valle, 2008; Álvarez 2008; Arena, 2009 y Osorio, 2009). Por su parte (Leyva, 2010 y Santana, 2009) agregaron a su estudio, la evaluación de la incidencia de la temperatura del mineral a la salida del enfriador en el índice de extractable.

A la simulación del comportamiento térmico de estos equipos a partir del empleo del software profesional ANSYS versión 7.0, se dedicaron (Londrez, 2007 y Ortiz, 2010) quienes establecieron los perfiles de temperatura para el mineral, el cilindro y el agua de la piscina. En estos trabajos se buscó la implementación de metodologías que permitieran caracterizar el proceso en análisis y a su vez establecer una interrelación entre ellos, pero en su mayoría carecen de un fundamento experimental sólido.

Como se puede apreciar, la revisión bibliográfica no responde a la problemática objeto de estudio. En su mayoría, abordan temáticas relacionadas con el intercambio de calor y la mecánica del material en los enfriadores cilíndricos rotatorios.

De todo lo expresado resulta evidente que la consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática en estudio. Lo que impone la necesidad de realizar una investigación realizada con el comportamiento microestructural, así como la incidencia del desgaste del acero por efecto del mineral laterítico sobre el material del cilindro.

1.3. Descripción de la instalación de estudio

El mineral reducido es transportado por el Yacoby desde el horno de hogares múltiples y descargado a través del cabezal del enfriador al tambor rotatorio



sumergido en una piscina de agua, el cual tiene la función de enfriar el mineral reducido hasta una temperatura por debajo de 200 °C para su posterior lixiviación.

Este enfriador es un intercambiador de calor de contacto indirecto con un flujo contracorriente del agua respecto al mineral, controlándose el nivel de agua en la piscina a través de unas anillas en la zona caliente de evacuación en función del tonelaje que se está alimentando. En el agua de la piscina de hormigón está sumergido 1/3 del diámetro del tambor del enfriador.

El mismo consta de un cuerpo tubular que rota sobre seis rodillos de apoyo. Dentro del cuerpo está colocado un tornillo transportador. El cuerpo tiene seis llantas, cada una se asienta sobre dos rodillos de apoyo. La rotación del cuerpo se realiza por el grupo motor – reductor principal y motor – reductor auxiliar que se acoplan a través de un embrague frontal. Los desplazamientos axiales posibles del cuerpo del transportador son asimilados por dos rodillos de apoyo, el cuerpo se enfría con agua.

El enfriador posee una longitud de 30, 94 m, diámetro de 3, 08 m, espesor de pared de 16 mm, peso de 80530 kg sin los dispositivos de accionamiento, una productividad de 31, 3 t/h, una velocidad de rotación con el motor principal de 6, 12 rev/min y de 0, 49 rev/min con el motor auxiliar. El material de la camisa está hecho de acero al bajo manganeso.

En el interior del tambor, entre arriostres de angulares, actualmente se encuentran incorporados trece carros raspadores, articulados en ambos extremos a un sistema de pivote que facilita el movimiento del carro en cuestión, los cuales impiden que el mineral se pegue a las paredes del tambor.

El material enfriado es un mineral que contiene 70 – 80 % de partículas con un tamaño menor que 0, 074 mm que pasa al tambor a través de un muñón de tope del enfriador. Con el paso del mineral, este se enfría con el contacto del cuerpo del tambor que se enfría con el agua en la piscina. Los bolsillos de transmisión tienen chapas de ajuste de metal, con ayuda de los cuales se puede regular la cantidad de mineral que se extrae del enfriador.

El mineral que sale del enfriador cae en una de las canales de lixiviación, por donde se introduce una corriente de una solución carbonato amoniacal formando una pulpa que va a los tanques de contacto, los cuales tienen una capacidad de 70 m³.

El enfriador está diseñado a trabajar en las siguientes condiciones (Tabla1).

Tabla 1. Parámetros de trabajo del Enfriador.

Parámetros de trabajo del Enfriador	Valores Nominales
Temperatura del mineral entrada	650 - 700 ⁰ C
Temperatura a la salida	200 ⁰ C
Temperatura del agua en la entrada	30 ⁰ C
Presión de trabajo	0,01 – 0,02 kPa
Consumo de agua para enfriar el tambor	107 m ³ /h
Consumo de agua para enfriar los cojinetes	1 m ³ /h
Presión excesiva de agua	300 kPa
Temperatura del agua en la salida de la piscina	70 ⁰ C
Coeficiente de llenado del tambor con el material	9 %
Espesor del enfriador	16 mm

El material enfriado pasa al tambor a través de un muñón de tope del enfriador. Con el paso del mineral, este se enfría con el contacto del cuerpo del tambor que se enfría con el agua en la piscina. Los bolsillos de transmisión tienen chapas de ajuste de metal, con ayuda de los cuales se puede regular la cantidad de mineral que se extrae del enfriador.

De la cámara de salida, el mineral enfriado llega al transportador que no constituye parte del enfriador, 1/3 del diámetro del tambor enfriador está sumergido en el agua de la piscina de hormigón.

1.3.1. Análisis del proceso de enfriamiento del mineral reducido

El proceso de enfriamiento consiste en disminuir la temperatura del mineral hasta valores por debajo de 200 °C. Para ello se utiliza el enfriador cilíndrico rotatorio.

El enfriador utilizado en el proceso es un equipo de transferencia de calor, el mismo está dispuesto horizontalmente como una instalación de transporte como se muestra en la figura1.1:



Figura 1.1. Instalación destinada para el proceso de enfriamiento.

1.3.2. Funciones del enfriador

En el interior del enfriador de mineral existe una estructura donde se enganchan los rastrillos pendulares que transportan el mineral que se va enfriando. El rastrillo, una vez que sigue el movimiento del tambor y alcanza una determinada altura, por su propio peso cae y revuelve la masa caliente a través de superposición de capas, empujando la capa caliente adyacente al cuerpo y transportando la capa fría. Además ocurre el intercambio calórico entre el calor que aporta el mineral al shell y al agua de la piscina en el cual está sumergido el enfriador disminuyendo la temperatura del mineral de (750 a 200°C) en la descarga.

1.4. Manifestaciones del desgaste abrasivo

Al abordar los efectos sobre el desgaste Archard (1953), manifiesta que el mismo es un proceso complejo que se produce en las superficies de los cuerpos debido a la fricción, trayendo por consecuencia la variación de la micro y macro geometría superficial; de la estructura y de las propiedades físico - mecánicas con o sin pérdida de material.

Bowden y Tabor (1950) propusieron que para materiales dúctiles en deslizamiento, en los puntos de contacto individual (puntas de las asperezas) se generan altas presiones que causan soldadura local y las soldaduras formadas son cortadas subsecuentemente por deslizamiento relativo de las superficies, figura 1.1, a esto se le conoce como el mecanismo de adhesión.

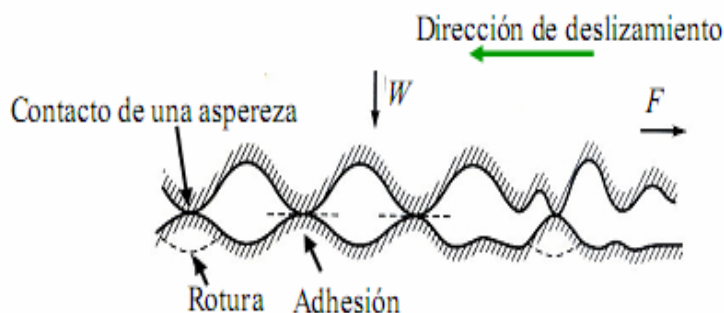


Figura 1.1. Mecanismo de fricción por adhesión durante el deslizamiento de dos superficies rugosas en contacto.

Como se puede observar en la figura 1.1, la rotura ocurre en las regiones más débiles en cualquier parte de la interfase o en uno de los cuerpos unidos. Después de romper los contactos existentes, se forman nuevos contactos. Debido a que la adhesión ocurre a partir de fuerzas moleculares entre las superficies, las fuerzas adhesivas son de la

misma naturaleza e intensidad que las fuerzas que existen entre las moléculas del material en volumen.

Consideran Wang (1998) y Kragelski (1982) que el desgaste abrasivo en la industria minera se clasifica en tres categorías de acuerdo al esfuerzo de trabajo al que son sometidas las superficies en contacto; la primera se conoce como abrasión de bajo esfuerzo, donde las partículas básicamente se deslizan sobre una superficie, sin sufrir grandes impactos; en tanto que la siguiente categoría, la abrasión de alto esfuerzo, resulta cuando el material de gran dureza es retenido entre dos superficies con el fin de triturarlo y la tercera es la abrasión severa, que se considera dentro del grupo de alto esfuerzo, en la cual se puede observar a simple vista las ranuras o surcos, así como desplazamiento del material que se produce por la intensidad del proceso.

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 1.2.

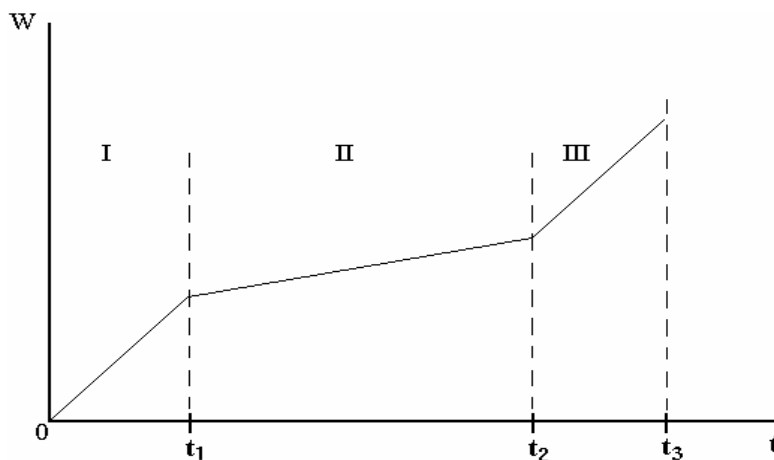


Figura 1.2. Dinámica del desgaste.

La primera etapa (I) es de asentamiento y se caracteriza por un área de contacto real muy pequeña lo que representa altas presiones reales; esto es debido a que solo entran en contacto los "picos" más altos de la rugosidad superficial. El desgaste durante este período es muy intenso y puede tener una influencia apreciable en la durabilidad.

Durante el período de desgaste establecido (II), el área de contacto aumenta debido a la eliminación de los "picos" de la rugosidad superficial. Con el tiempo el desgaste va



umentando hasta llegar a un valor crítico o permisible (III). Cuando se llega a este valor del desgaste se inicia el período de avería de la pieza o unión tribotécnica, el cual se caracteriza por un incremento de la temperatura, un aumento del nivel de ruido, la presencia de cargas dinámicas (vibraciones), todo lo cual lleva si no se realiza el cambio de la pieza a un desgaste catastrófico.

Kragelsky (1978) al estudiar el fenómeno de la fatiga superficial y partiendo de la doble naturaleza de la fricción, demostró la influencia de la presión sobre la intensidad del desgaste, concluye que si las superficies no están asentadas (superficies nuevas), la intensidad del desgaste es una función no lineal de la presión.

La influencia de la presión de contacto sobre la intensidad del desgaste también fue considerada por Fleischer (1980) quien considera que a partir de la fricción o el estado al que esté sometido la superficie, se diagnostica el tipo de desgaste predominante.

Consideran Verdeja y González (1996), que este es uno de los efectos más destructivos a que están sometidos los aceros, el cual se puede definir como el deterioro a que están sometidos los mismos como consecuencia del uso o del medio ambiente y puede considerarse como un fenómeno superficial donde los esfuerzos tangenciales aunque producen ruptura de los enlaces atómicos no ocasionan, en general, la ruptura del cristal metálico, pues la sencillez y regularidad de la distribución atómica da lugar a que la red se restablezca a cada avance de un espacio interatómico, con lo que la cohesión se restablece y el efecto de los sucesivos deslizamientos produce una deformación plástica, estos esfuerzos normales al vencer la cohesión producen la ruptura total de la red cristalina, ya que ningún restablecimiento de la cohesión es posible.

Se ha determinado que el comportamiento ante el desgaste de los materiales (Blau, 1992; Tylczak, 1992; Courtney, 2000; Hutchings, 2000 y Allen *et al.*, 2001) está influenciado tanto por parámetros externos característicos al sistema (velocidad, tamaño y forma del material abrasivo, condiciones ambientales, condiciones de carga), así como por parámetros internos, que dependen de las características mecánicas de los constituyentes del tribosistema (microestructura, módulo de



elasticidad, dureza y la tenacidad de fractura), sin embargo, la abrasión también depende del ángulo de impacto del abrasivo.

La acción y penetración de partículas libres de alta dureza producto del medio o del mismo proceso de desgaste en las capas superficiales de los elementos de máquina bajo la acción de asperezas o partículas y dependiendo de la forma y dimensiones de las mismas; así como de la relación de dureza, resistencia a la rotura y fluencia, módulo de elasticidad; de las condiciones del medio y de trabajo, de la carga aplicada y del tipo de elemento, se pueden presentar diferentes mecanismos del desgaste abrasivo.

Numerosos son los trabajos que se han venido desarrollando con el propósito de determinar las causas relacionadas con el desgaste abrasivo en los materiales. Entre los temas más tratados, se encuentran el de Sagaró *et al.* (2007) quien analiza el comportamiento al desgaste abrasivo del acero 65 Mn 4, con y sin tratamiento térmico, empleado en los martillos de molino, precisan que durante el proceso de abrasión, la deformación del material y la fractura eventual ocurren en áreas muy localizadas bajo condiciones de altas presiones y altas razones de deformación, en las condiciones de trabajo de los equipos pesados es un elemento a considerar durante el desgaste abrasivos de los pasadores.

Un precedente sobre desgaste abrasivo fue el de Wirojanupatump (2000), quien realizó pruebas de desgaste, compara el fenómeno de abrasión en condición seca y húmeda, en un acero de medio contenido de carbono, el objetivo fundamental fue determinar el comportamiento de este material cuando se varían los parámetros operaciones, tales como: carga, tamaño, forma y dureza del abrasivo.

Deuis *et al.*, (1998) realiza una comparación entre el comportamiento del desgaste abrasivo en un medio ambiente seco y un húmedo empleando abrasivos como la alúmina y arena sílica, el ensayo lo realizó en recubrimientos sobre aluminio, observando que el desgaste en un ambiente húmedo es menor que en el seco, esto lo justifica debido a la generación de calor y consideraciones hidrodinámicas, así como a diferencias en la arena abrasiva.

En relación con el desgaste abrasivo Gatzanis (1993), en sus estudios sobre el empleo de diferentes aleaciones en equipos para la minería, ha investigado las propiedades de abrasión y corrosión del acero al cromo 9 %. Las mediciones de

dureza en la superficie desgastada y en el resto del volumen del material no sobrepasaron una diferencia de 2 - 5 %, reflejo de la reducida habilidad de endurecimiento por deformación del material, precisa en esta fuente que es importante establecer que durante el proceso de abrasión, la deformación del material ocurren bajo condiciones de altos esfuerzos de deformación.

Por ejemplo Ball (1983) y Lamparter (2000), han reportado que con un incremento de un 30 % en la dureza provoca, sin embargo, un decrecimiento de un 10 % en la resistencia relativa a la abrasión de aceros de mediano contenido de carbono, ya que el acero al presentar mayor dureza se hace más frágil.

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

En otra importante investigación Zum - Gahr (1981) ha identificado la influencia de las propiedades del material en el desgaste abrasivo, tales como la dureza, el endurecimiento por deformación, la ductilidad, la anisotropía de los cristales y la inestabilidad mecánica, al considerar, por ejemplo, que la resistencia a la deformación elástica/plástica determina el área de contacto entre la partícula abrasiva y el material.

Las curvas de dinámica de desgaste permiten establecer el período de incubación en el que transcurre el endurecimiento por deformación, y se acumula la suficiente energía para la fractura localizada, seguido de un período de desgaste acelerado donde ocurren las mayores pérdidas de material, y posteriormente el estado estacionario.

1.4.1. Desgaste por partículas abrasivas

El desgaste es el daño de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo, sometidas a una carga. 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 sino también una respuesta integral del sistema.

Caubet, (1971) plantea que 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.

Según Hein y Shewmon (1983) se supone que el desgaste en miembros de aceros deslizantes está causado por la presencia de partículas de perlita dispersa entre la ferrita. Estas partículas duras, inicialmente al nivel de la superficie, pueden incrustarse en la región de la ferrita por una cantidad proporcional a la presión aplicada. El efecto de esta presión es abatir la superficie de la ferrita, dejando que las partículas de perlita se proyecten hacia afuera. De esta manera, parece ser únicamente las partículas abrasivas de perlita y la ferrita incorporadas muy cercanas a la superficie, podrían ser removidas durante el principio de desgaste.

Han sido aceptados dos modelos estándar para las condiciones de contacto de materiales frágiles masivos. La teoría desarrollada por Evans *et al.* (1978), la cual considera condiciones de contacto dinámicas, asume que una partícula esférica penetra en un blanco sin distorsión y la presión de contacto es igual a la presión dinámica que ocurre cuando la partícula golpea la superficie.

Por otra parte, Wiederhon y Lawn (1979) y Lawn *et al.* (1979) indicaron que el impacto es análogo a un ensayo de indentación cuasi – estático, en el cual una carga impulsiva es entregada al blanco por una partícula aguda, vía contacto plástico. Ambos modelos asumen que la tasa de abrasión de estado estacionario siguen una relación del tipo potencia es lo que implica que la mayoría de las relaciones sea derivadas para la tasa de abrasión (Evans *et al.*, 1978; Lawn *et al.*, 1980; Gulden y Rosenblatt 1978).

Sin embargo, es importante mencionar que estos modelos no toman en cuenta las propiedades de la partícula abrasiva, las cuales se considera que tienen un efecto importante sobre la tasa de abrasión (Vaughan y Ball, 1991). Por lo que, Wada y Ritter (1992) investigaron el efecto tanto de la dureza de la partícula abrasiva como de la tenacidad de fractura de la partícula abrasiva sobre la tasa de abrasión.

En el estudio se concluyó que este parámetro es fuertemente dependiente de las durezas, de modo que cuando la dureza del par más blando es afectado por la fricción es dominado por un mecanismo de fractura con la formación de grietas laterales (Feng y Ball, 1999), mientras que cuando se incrementan las protuberancias el desgaste abrasivo, el mecanismo de rayado es predominante,



criterios análogos a otros investigadores (Shipway y Hutchings 1995, Wada y Ritter, 1992, Vaughan y Ball, 1991).

Los materiales que presentan abrasión es por la formación e intersección de fracturas frágiles, tales como vidrios inorgánicos impactados por partículas angulares duras que producen agrietamiento local, muestran el máximo de abrasión para un ángulo de incidencia normal (90^0) y una reducción estacionaria a medida que el ángulo disminuye. Sin embargo, esta conversión depende de las propiedades tales como densidad de la partícula y distribución de tamaño (Hutchings, 2000 y Janos *et al.*, 1999).

1.4.2. Comportamiento microestructural de materiales frente al desgaste

El fenómeno del desgaste es tema de gran interés y la necesidad de incrementar la dureza para contrarrestarlo, hacen que resulte de gran importancia hallar en cada caso el material adecuado para determinadas características y parámetros de trabajo. El acero al manganeso logra unificar las propiedades de resistencia al desgaste y de resistencia al impacto y en consecuencia constituye el material idóneo para garantizar la asignación de servicio de piezas y agregados, 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.

El acero al manganeso es considerado en la práctica industrial como el único material que combina elevada tenacidad – ductilidad con una gran capacidad de endurecimiento por deformación y una resistencia al desgaste extraordinariamente alta a pesar de su relativa baja dureza, cuando es sometido al trabajo de golpeo continuo combinado con fricción, (Varela, 2003). Esto se explica debido a que el proceso de desgaste va acompañado de la deformación plástica del metal. La principal desventaja es que su maquinado se dificulta por los métodos tradicionales.

En todos los materiales existe siempre aunque sea a microescala defectos superficiales medibles o asperezas, y se puede considerar que las superficies se encuentran en contacto por medio de estas y las zonas de apoyo son el centro de las deformaciones plásticas. La carga global no se reparte sobre la totalidad de la superficie de contacto, sino sobre algunos puntos, es decir, que solo una superficie reducida soporta efectiva y plásticamente la carga.

Por el efecto del movimiento de estas deformaciones que en general sobrepasan el límite elástico, combinada con la elevación de la temperatura que los disminuye rápidamente en las zonas de contacto, se engendran instantáneamente fenómenos físicos (difusión, temple), transformaciones de fase, hay una trituración de la estructura cristalina casi hasta un estado amorfo de la superficie en una profundidad de 0,1 – 0,5 μm conocida como capa de Bailby. Más profundamente hay una estructura deformada de 5 - 25 μm , y de 0,02 – 0,5 mm la estructura permanece invariable. Además la elevación de la temperatura puede llegar a alcanzar la fusión de uno de los metales en contacto, aunque sea de forma fugaz y puntual originándose las microsoldaduras.

1.5. Materiales empleados en enfriadores de mineral

Para elevar la resistencia al desgaste se emplean materiales con características especiales. De acuerdo con los criterios de Guliaev (1978), existe un acero que en las condiciones de rozamiento ordinario acompañado de grandes presiones, tiene una gran resistencia al desgaste. Este es el acero al manganeso (primer acero de aleación descubierto por Hadfield, empezó a utilizarse en la industria desde 1882 aproximadamente).

Este acero se utiliza fundido y con menos frecuencia, deformado en caliente, y posee la alta tenacidad y plasticidad típica de los aceros austeníticos al mismo tiempo que una resistencia bastante buena. La alta tenacidad de la austenita, al mismo tiempo que la suficiente resistencia mecánica y al desgaste, hacen de este acero un material insustituible para las piezas sometidas a desgaste y percusión simultáneamente.

El tratamiento térmico para lograr en este material el endurecimiento deseado, según Herrera (1986), es un hipertemple consistente en una austenización alrededor de 1 000 $^{\circ}\text{C}$ seguida de enfriamiento rápido en agua u otro medio refrigerante. La dureza del material hipertemplado es de aproximadamente 200 HB, pero puede aumentar en servicio mediante endurecimiento por deformación.

La experiencia del empleo de este material en las condiciones del laboreo minero demuestra que la dureza lograda en el austenizado puede llegar incluso a duplicarse, pero esto sólo es posible al término de la vida útil de las piezas y

agregados. Este inconveniente podría ser resuelto aplicando procedimientos de deformación previa a la entrada en servicio de dichos elementos.

Según los propios trabajos de Herrera, la capacidad de endurecimiento por trabajo en frío de los aceros al manganeso se ha atribuido a una transformación martensítica inducida mecánicamente, es decir, en estos aceros se formaría martensita por deformación. Entre los mecanismos por los cuales endurecen estos aceros, están la creación de defectos de empaquetamiento, maclado múltiple, transformación a martensita épsilon y transformación a martensita alfa. Sin embargo, existen diferencias de opinión sobre el mecanismo concreto de endurecimiento, e incluso sobre si se produce martensita durante el trabajo en frío.

En Adler *et al.*, (1986), se define que el mecanismo de endurecimiento de los aceros al manganeso tiene lugar por efecto de la deformación plástica, pero los autores dan un lugar preponderante al mecanismo de maclado sobre los fenómenos de deslizamiento de los planos cristalinos.

1.6. Propiedades físicas, mecánicas y funcionales del acero al manganeso

En diferentes bases de datos (Materiales, 1996, Key to Steel, 2002) se hace referencia a las propiedades físico y mecánicas a temperatura ambiente, obtenidas en el acero al manganeso. En la tabla 2, se puede observar las propiedades química estándar del acero aleado al bajo manganeso.

Tabla 2. Propiedades químicas del acero al bajo manganeso

C %	Si %	Mn %	P %	Cr %	Mo %	Ni %
0,25	0,48	1,26	0,026	0,05	0,02	0,02

El carbono, hasta contenidos ligeramente superiores a 1,00 % proporciona elevada resistencia mecánica, incrementa la dureza, el límite de fluencia (hasta aproximadamente 350 MPa), la capacidad de endurecimiento y la resistencia al desgaste abrasivo; disminuyendo en contraposición los valores de resistencia al impacto y de la elongación relativa (Subramanyan *et al.*, 1999; Manganese Centre, 1998).

El alto contenido de manganeso tiene un efecto estabilizador sobre la austenita, de manera que ésta es retenida completamente durante un enfriamiento rápido del acero desde altas temperaturas hasta la temperatura ambiente. Se tiene así un



acero de alta tenacidad, resistente al impacto y endurecible por trabajo de deformación (Bilmes, 2001).

El cromo y el molibdeno tienden a elevar la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo, pero su contenido en la aleación debe ser cuidadosamente escogido debido a que son fuertes formadores de carburos y ferritizantes; además disminuyen la resistencia mecánica, la elongación y la resistencia al impacto.

En contraposición el níquel disminuye la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo, pero incrementa la capacidad de soportar cargas dinámicas (Torres, 2002).

El acero al manganeso aleado con níquel grado D (3,0 a 4,0 % de Ni) incrementa la tenacidad, la ductilidad, aumenta el porcentaje de elongación, retiene cualidades no magnéticas, disminuye ligeramente la fluencia y la resistencia a la abrasión, y mejora la soldabilidad (Torres, 2002; Varela, 2003).

Con respecto a los otros elementos de aleación: el silicio se introduce con el objetivo principal de desoxidación (hasta 1 %); en contenidos cercanos al 2 % produce un cierto aumento en el límite de fluencia y resistencia a la deformación plástica bajo choques repetitivos.

El azufre, su contenido no es crítico debido a la cantidad de manganeso. El fósforo en cantidades hasta un 0,06 % garantiza buena soldabilidad.

El vanadio al ser buen formador de carburos aumenta el esfuerzo de fluencia pero disminuye la ductilidad y es muy útil para refinar el grano.

El cobre es utilizado para refinar la austenita. El titanio reduce el carbono en la austenita y forma carburos muy estables, también neutraliza el exceso de fósforo y refina la estructura de la pieza fundida (Varela, 2003).

A modo de resumen, se puede plantear que las referencias presentan una gran diversidad de criterios en relación con las propiedades física, mecánica y funcional del acero aleado al manganeso, en dependencia de su composición, estructura y método de deformación empleado. En los trabajos analizados no se exponen modelos experimentales o teóricos que relacionen las propiedades mecánicas (Resistencia Mecánica y Dureza) y funcionales (resistencia al desgaste abrasivo), con la variación de las condiciones de aplicación en condiciones de temperatura y desgaste abrasivo.

1.7. Generalidades del Método de Elementos Finitos

En la actualidad, el método de la simulación ha sido muy generalizado y constituye una potente herramienta de cálculo numérico capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica; permitiendo simular y realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejas, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

Según Kuhlman (1996), modelar un sistema físico consiste en representar la realidad con cierto grado de aproximación. Se entiende por realidad el comportamiento de las iteraciones observables o medibles existentes en la naturaleza. Para representar la realidad es necesario un lenguaje preciso, las matemáticas por tanto son la principal herramienta. Las regularidades que se encuentran en el universo permiten la formulación de leyes generales que constituyen lo que hoy en día se denomina conocimiento físico.

Las leyes físicas que rigen el comportamiento del universo son las herramientas fundamentales de la modelación cuando se expresan en un lenguaje tan preciso como es el de las matemáticas.

Se llama sistema a un conjunto de elementos en el cual todos se encuentran tan estrechamente vinculados entre sí, que en relación con las condiciones circundantes se presenta (se distingue) como algo (un todo) único.

Elemento: es el último componente de un sistema, no se puede subdividir y el sistema está compuesto por la unión de varios elementos.

El término modelo se utiliza con múltiples connotaciones, según el campo en que se esté empleando. Pero cualquiera que se analice tendrá de común con los demás que constituye una representación (un simulacro, imagen) de una realidad objetiva.

El término simulación infiere el estudio de un sistema mediante un modelo. Si se refiere a un modelo matemático se tendrá la simulación matemática. En síntesis la simulación, en general, es el estudio de un sistema, o parte de dicho sistema, mediante el trabajo del modelo matemático o del modelo físico (Huang 1994).

Al respecto se puede considerar que la modelación no es, en general, un fin en sí misma, sino un paso hacia la simulación. La modelación permite el estudio integral de un proceso basándose en los modelos desarrollados previamente y que definen

el comportamiento individual de cada elemento. De manera que mediante la simulación se puede analizar, del sistema, el efecto de sus interrelaciones, determinar recintos, hacer estudio de capacidades, detectar "cuello de botellas", estudiar las condiciones límites de operación y otras aplicaciones más.

Luego, en primer lugar, la simulación presupone el conocimiento del comportamiento de los elementos del sistema y en segundo lugar, se utiliza cuando no es posible, o al menos no es económico, estudiar el sistema real directamente.

La combinación de la computadora digital y software profesionales conforman la simulación digital la que es una herramienta poderosa capaz de solucionar sistemas compuestos por numerosas variables, ecuaciones y parámetros de equipos. Se han obtenido actualmente experiencias útiles en la aplicación de estas técnicas con programas tales como: ANSYS, COSMOS, MATLAB, entre otros.

Un modelo matemático, como se ha expresado anteriormente es una representación simplificada de los aspectos del proceso real que está siendo investigado en términos de ecuaciones matemáticas u otras formulaciones de esta naturaleza que permiten llegar a resultados en términos cuantitativos precisos y, de esta forma, tomar decisiones o seleccionar la alternativa de solución más adecuada.

El método de los elementos finitos (FEM) o método de aproximación por porciones es una técnica numérica empleada para obtener soluciones próximas de problemas matemáticos con condiciones de frontera que son dominados por las ecuaciones diferenciales.

Actualmente se considera el método de las diferencias finitas (FD) como una subclase del FEM. El cual se reduce al método de las FD cuando las mallas son regulares. (Ver figura 1.3)



Figura 1.3. Diferencias finitas y elementos finitos.



Es por eso que muchas de las técnicas conocidas para la solución de problemas por medio de las FD pueden ser empleadas en la aplicación de los elementos finitos.

Algunas ventajas del FEM son:

- Permite realizar cálculos en geometrías asimétricas y en espacios dimensionales superiores para las cuales sería muy complicado hacer cálculos manuales.
- Puede aplicarse a cuerpos compuestos por varios materiales.
- Las formas irregulares que se presenten en la frontera pueden ser aproximadas usando elemento con lados rectos o exactamente usando lados curvos.
- El tamaño de los elementos puede variar.
- El método emplea una formulación integral para generar un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Reducción o sustitución de pruebas de laboratorios.
- Realización de números grandes de corridas experimentales.
- Solución de complejos problemas físico-matemáticos cuya resolución analítica resultaría prácticamente imposible.



1.8. Conclusiones del capítulo 1

- Las bibliografías consultadas no muestran las regularidades del comportamiento de las propiedades físicas, mecánicas y funcionales del acero al manganeso en correspondencia con la variación de las condiciones de aplicación de temperatura y desgaste en el material del enfriador del mineral.
- No existe suficiente información sobre el estudio microestructural del material del cilindro rotatorio del proceso de enfriamiento del mineral en los materiales consultados.
- El desgaste, efecto directo de la fricción, se caracteriza por presentar períodos como la fatiga, el micro corte de las asperezas superficiales y las deformaciones macro plásticas, las cuales dependen de la carga aplicada; velocidad; temperatura; tipos de movimiento; tipo de fricción; recorrido de fricción y tiempo de trabajo.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Las propiedades de los aceros es una función de la composición química y la estructura cristalina. La estructura cristalina por otra parte depende de los procesos de enfriamiento y cristalización del acero líquido, del tratamiento térmico posterior que se aplica al producto terminado y además, de la composición química.

Por medio de ensayos y análisis, es posible determinar las propiedades de los aceros para realizar una caracterización posterior de los mismos, guiándose estas operaciones por normas establecidas.

El objetivo de este capítulo es fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones en las que se realizará el estudio de microestructura del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral, así como los ensayos para conocer el comportamiento del desgaste abrasivo en el mismo.

2.2. Análisis del material del enfriador

El análisis químico del material empleado, como se observa en la tabla 2.1, se realizó empleando un espectrómetro de emisión óptica SPECTROLAB en el Laboratorio del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche".

Se analizaron tres muestras y cada una se sometió a tres chispas en dos bordes y en el centro para obtener un promedio.

Las muestras se limpiaron de óxidos y grasas primero en una muela abrasiva y luego sobre una lija rotatoria antes de someterse al análisis químico en el espectrómetro de emisión óptica.

Tabla. 2.1. Composición química del acero AISI 1340

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %
0.25	0.48	1.26	0.026	0.025	0.05	0.02	0.02

Al igual que el carbono, actúan otros elementos que devienen en intersticiales, debido a su diámetro atómico menor a 2 Å, lo que les da mayor posibilidad de difusión a través de los intersticios de la estructura cristalina del hierro. Estos elementos son el Nitrógeno ($d_A = 1,42 \text{ Å}$), Hidrógeno ($d_A = 0,92 \text{ Å}$), Boro ($d_A = 1,94 \text{ Å}$), Oxígeno ($d_A = 1,20 \text{ Å}$). Va a ser esta posibilidad de difusión intersticial la

responsable de una gran cantidad de posibilidades tecnológicas y variantes de propiedades en el acero, especialmente las vinculadas al endurecimiento, gracias a la solución sólida intersticial de carbono en hierro (Fernández, 2011).

Por otro lado, otros elementos como el cromo, níquel, titanio, manganeso, vanadio, cobre, con diámetros atómicos cercanos al del hierro, formarán soluciones sólidas sustitucionales en un intervalo que dependerá de la semejanza de estructura cristalina, de la afinidad química y de las valencias relativas.

Estas soluciones sustitucionales son las más frecuentes y numerosas entre las aleaciones, especialmente en el acero. Las propiedades de la ferrita y la austenita aleadas varían a medida que aumentan en ellas el contenido de estos elementos de aleación, el Mn; Si y Ni, incrementan la dureza y el límite de rotura de la ferrita, la austenita puede formar conjuntos intermetálicos (Fernández, 2011).

Se confirma que el material a emplear en los experimentos es un acero AISI 1340 con una estructura metalográfica ferrita - perlítica cuya imagen se puede apreciar en la figura 2.1.

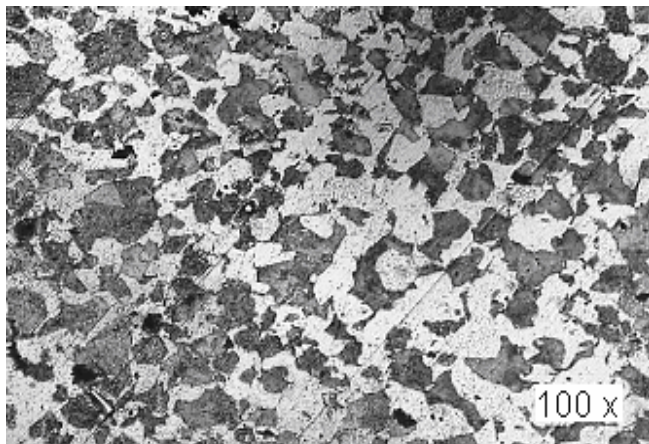


Figura 2.1. Estructura metalográfica ferrita - perlítica del acero AISI 1340 (100X).

Puede observarse gran proporción de ferrita y una pequeña cantidad de perlita. En la muestra desde el núcleo a la periferia, se observa un aumento progresivo de la cantidad de perlita, cuando la región que estamos observando es ya próxima a la superficie. Ello es indicio de que los contenidos en carbono crecen desde ese interior hacia la periferia.

2.3. Diseño de experimentos

Plantean Hendry *et al.* (1973); Hlavacek (1978); Westerberg (1980) y Chacín (2000) que es importante que el diseño sea lo más simple, pero además, existe el problema de que la investigación se debe conducir de forma tal que sea económica y eficiente, se debe hacer todo esfuerzo posible por lograr ahorro de tiempo, de dinero, de personal y de material experimental.

Se escogió un diseño de experimento factorial completo (Gutiérrez y De la Vara, 2003), con dos variables y dos niveles. Este método de planificación estadística, establece el número de ensayos a realizar.

El número de experimento cuando intervienen k factores con dos niveles cada uno (-1 y +1), se determina con un arreglo de la función exponencial: $N = 2^k$

Donde:

N - Número de experimentos

K - Número de factores

En este caso, se analizará la influencia de dos factores, de aquí que $k = 2$, el número de experimento sería: $N = 2^2 = 4$ experimentos, multiplicado por 3 réplicas serían 12 ensayos para cada probeta para un total de 36 experimentos. La matriz de planificación de los experimentos se expone en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Matriz de planificación de los experimentos

Niveles	Variables		Salida		
	T (°C)	θ (mm)	H (HV)		
(-1)	650	12	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
(+1)	200	16			
Ensayo					
1	-1	-1	HV1	HV2	HV3
2	+1	-1	HV1	HV2	HV3
3	-1	+1	HV1	HV2	HV3
4	+1	+1	HV1	HV2	HV3

2.3.1. Temperatura

La temperatura es una variable cuantitativa que se utilizará en el rango desde 650 °C a la entrada del cilindro del enfriador de mineral y 200 °C a la salida del mismo (obteniéndose un nuevo resultado en cada cambio), permite evaluar el comportamiento microestructural del material a todo lo largo del cilindro y depende

de la temperatura que tiene el mineral laterítico al entrar en su interior y del número de revoluciones con que trabaja el enfriador.

2.3.2. Espesor

El espesor es una variable cuantitativa que depende de la dureza del material, al este tener mayor dureza presenta mayor resistencia al desgaste, además depende del accionamiento de los carros raspadores en el interior del enfriador y de la calidad dl mineral laterítico.

2.3.3. Dureza superficial

La dureza es uno de los parámetros más importantes de los materiales, se admite también que es el más relevante en cuanto a la influencia en la resistencia al desgaste abrasivo, adhesivo y a la fatiga por contacto superficial (Rodríguez, 2009).

La elección de cada uno de los niveles está determinada por el mayor o menor grado de tolerancia que se quiere medir en el material, o lo que es lo mismo, por la mayor o menor homogeneidad en la estructura (Martínez, 1984).

2.4. Preparación mecánica de las probetas

Con el fin de verificar la hipótesis planteada, se inicia la experimentación con la toma de muestras del cilindro de un enfriador de mineral. La selección de las muestras del cilindro del enfriador se realizó de acuerdo a la figura 2.2.

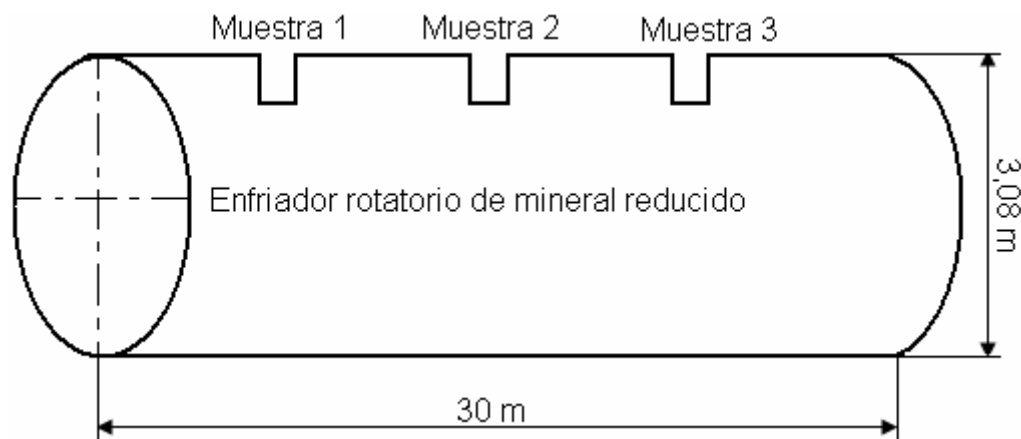


Figura 2.2. Selección de muestras en el cilindro.

Como se aprecia en la figura anterior, se realizaron tres cortes en tres zonas del cilindro, uno en la entrada, el segundo en el centro y el último en la salida del enfriador. Los cortes se realizaron mediante una antorcha de oxiacetileno según la Norma ASTM E 3 – 92 en dimensiones de 300 X 300 mm.



Cada una de las muestras obtenidas se cortó en dimensiones de 15 X 15 mm con el empleo de una fresadora vertical con constante régimen de enfriamiento para evitar que el calentamiento producido por la fricción durante el proceso, pudiera provocar transformaciones en la estructura por cambios de fase. Las probetas fueron normadas según norma ASTM E 646 – 00.

A cada muestra se le denotó con una letra y un número como se muestra a continuación:

- E1 - probeta 1 de la entrada del enfriador de mineral
- E2 - probeta 2 de la entrada del enfriador de mineral
- E3 - probeta 3 de la entrada del enfriador de mineral
- M1 - probeta 1 del medio del enfriador de mineral
- M2 - probeta 2 del medio del enfriador de mineral
- M3 - probeta 3 del medio del enfriador de mineral
- S1 - probeta 1 de la salida del enfriador de mineral
- S2 - probeta 2 de la salida del enfriador de mineral
- S3 - probeta 3 de la salida del enfriador de mineral

2.3.1. Preparación metalográfica de la probeta

En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: corte, desbaste, pulido, desengrasado y lavado (ASTM E 3 – 95 y Norma NC 10 – 56: 86).

Corte: las muestras cortadas son de diámetro 15 mm y espesor de 15 milímetros, se realizó el corte con una fresa SANDVIK plaquita T – MAX – CUT 12 04 12 de calidad T 025 20 (Coromant corokey, 1996).

2.4.1. Desbaste y pulido

El pulido con los papeles abrasivos se realizó variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina. Se emplearon lijas del tipo No 180, 400 y 600 (ASTM E 3 – 95).

El pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio cambiando el sentido del lijado a 90° al pasar de un pliegue a otro, para eliminar la capa de material distorsionado y deslizado dejado por el anterior, esto permite obtener una superficie lisa y pulida, libre de impurezas o ralladuras, por último las muestras se pulieron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL.

Para el acabado final se utilizó un paño de fieltro grueso, usando como sustancia abrasiva, el óxido de cromo. Una vez pulida las probetas se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro, se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono (Cl_4C) para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir, se emplearon las técnicas de ataque manual por inmersión en el reactivo químico. Se aplicó el ataque por inmersión de las muestras durante cinco segundos con el reactivo nital, al cuatro por ciento (mezcla de cinco mL de ácido nítrico (HNO_3) y 95 mL de alcohol etanol (ASTM E – 262 Practice A)).

2.5. Corte de las probetas

Cálculo de la operación de corte

$$N_c = \frac{P_z \cdot V_c}{6120} \quad (2.1)$$

Donde:

N_c - potencia de corte, kW

P_z - presión, Mpa

V_c - velocidad de corte

$$P_z = P \cdot 0,9 \cdot S_z \cdot b \quad (2.2)$$

Donde:

b - ancho de fresado, mm

P - presión específica, MPa

S_z - avance por diente, mm/diente

Se prefija S_z entre 0,18 – 0,22 mm/diente.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_f \cdot n}{1000} \quad (2.3)$$

Donde:

V_c - velocidad de corte, m/min

D_f - diámetro de la fresadora, mm

n - frecuencia de rotación, rev/min

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D_f} \quad (2.4)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.2 y 2.3 en la 2.1, se obtiene la 2.5.

$$N_c = \frac{P \cdot 0,9 \cdot S_z \cdot b \cdot \pi \cdot D_f \cdot n}{6120 \cdot 1000} \quad (2.5)$$

Para que se pueda emplear la fresadora la potencia máxima de la misma debe ser mayor o igual a la potencia necesaria para el corte.

$$N_h = N_{mot} \cdot \eta \geq N_c \quad (2.6)$$

Donde:

N_h - potencia del husillo, kW

N_{mot} - potencia del motor, kW

η - rendimiento del motor

2.5.1 Tiempo de corte

$$T_m = \frac{L}{S_m} \cdot i \quad (2.7)$$

Donde:

T_m - tiempo de corte; min

L - longitud de maquinado, mm

S_m - avance por minuto de la herramienta o pieza, mm/min

i - número de pasadas

$$L = l + y + \Delta \quad (2.8)$$

Donde:

l - longitud de la pieza, mm

y - camino de la entrada, mm

Δ - camino libre de la herramienta, mm

Para el fresado simétrico,

$$y = \sqrt{t(D_f - t)} \quad (2.9)$$

Donde:

t - profundidad de corte, mm

$$T_m = \frac{\left[l + \sqrt{t(D_f - t)} + \Delta \right] \cdot i}{S_m} \quad (2.10)$$

Los datos para el cálculo se toman del pasaporte de la fresadora vertical 6M12L según Casillas, (1987).



$b = 5 \text{ mm}$	$t = 15 \text{ mm}$
$D_f = 100 \text{ mm}$	$S_m = 26,6 \text{ mm/min}$
$n = 125 \text{ rpm}$	$\Delta = 3 \text{ mm}$
$N_{mot} = 7 \text{ kW}$	$i = 1$
$\eta = 125 \text{ rev/min}$	

2.6. Análisis microestructural

Este análisis se realiza a una probeta preparada anteriormente para conocer su microestructura, la cual determina las propiedades microestructural del material de la probeta.

La microestructura se observa con la ayuda de un microscopio óptico empleando aumentos entre 100 y 2000X. Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM – 100, que está dotado de una cámara instalada el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe (2006), que refleja la micrografía en el computador. Para observar las probetas, se nivelaron en un dispositivo con plastilina (ASTM E 3 – 95; NC 10 – 55: 86 y NC 04 – 77: 86).

El examen microscópico proporciona información sobre la constitución del acero, pudiéndose determinar características tales como forma, tamaño y distribución de los granos, inclusiones y microestructura metalográfica. La microestructura puede reflejar la historia completa del tratamiento mecánico que ha sufrido el metal. La preparación defectuosa de las probetas puede arrancar las inclusiones importantes, destruir los bordes de grano, revenir un acero templado o en general, originar una estructura superficial distorsionada que no guarda ninguna relación con la superficie representativa y características del metal.

2.7. Ensayo de dureza aplicado a las muestras

Por medio de este método obtenemos características mecánicas importantes en forma rápida y no destructiva y permiten realizar en piezas ya elaboradas.

2.7.1. Método de dureza

Se determinó la dureza por el método Vickers, para este ensayo se utilizó un durómetro modelo PMT-3 N0168 (Made in URSS) diseñado por Jrashev y E.S. Berkovich, (1952). La superficie de la probeta se prepara de la misma manera que

para el análisis microestructural (desbaste y pulido). El número de dureza Vickers se determina por el tamaño de las huellas.

El diámetro medio de la huella se calcula mediante la ecuación 2.11.

$$\bar{d} = \frac{35}{1000} \cdot \frac{[(d_2 - d_1) + (d_4 - d_3)]}{2} \quad (2.11)$$

Donde:

\bar{d} - diámetro medio, mm

d_1, d_2, d_3, d_4 - diagonales de la huella, μm

Para calcular el número de dureza Vickers (VHN) se utiliza la fórmula 2.12.

$$VHN = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (2.12)$$

Donde:

VHN - dureza Vickers

P - peso, kgf

$$\overline{VHN} = \frac{\sum_{i=1}^n VHN_i}{n} \quad (2.13)$$

Donde:

\overline{VHN} - dureza promedio, HV

n - cantidad de huellas realizadas

2.8. Ensayo de desgaste abrasivo

El ensayo típico para el desgaste abrasivo es el llamado "roll paper", donde un cilindro con papel de lija en la superficie, con el que conociendo las condiciones y parámetros del ensayo tales como velocidad en rev/min, tipo de abrasivo, peso de la carga, se podrá conocer el comportamiento posterior del material controlando la pérdida de masa y el espesor en la probeta. Este ensayo realizado según la norma ASTM G65 – 81 también tiene una variante en la que se utiliza un cilindro o rodillo de goma y se va tirando un mineral abrasivo habitualmente sílice y controlando igualmente la pérdida de masa en la probeta.

El ensayo de desgaste abrasivo se realizó en condiciones secas utilizando un papel abrasivo con granos de óxido de silicio de grado 60 como sustancia abrasiva, además se consideró los tres tipos de parámetros básicos para el ensayo de

desgaste abrasivo, los cuales son: parámetros estructurales, operacionales y parámetros estructurales de interacción.

2.8.1. Parámetros estructurales para realizar ensayo de desgaste abrasivo

- Maquina de ensayo

Para realizar el ensayo de desgaste se adaptó la pulidora metalográfica del laboratorio de tecnología de los metales al tipo Pink on Disk como se muestra la figura 2.4. El papel lija se adosó en el disco inferior, luego las muestras se colocaron debajo del portamuestra que sirvió como el pink. Sobre el pink se colocó la carga a aplicar, a partir de los cuales fueron obtenidos los valores de desgaste.



Figura 2.4. Esquema para realizar el ensayo de desgaste en la pulidora metalográfica.

Los valores de desgaste, o tasa de desgaste, obtenidos con este tipo de máquina no pueden ser comparados entre sí indirectamente sin una verificación rigurosa y similares condiciones de ensayo.

Medidas por pesadas: en este caso se utilizó una balanza analítica con apreciación de 10^{-4} g, ubicada en el laboratorio de química. A pesar de ser un método relativamente simple, se tuvo cuidado al desmontar las piezas para evitar la contaminación al manipularlas, ya que los resultados son erróneos cuando se presenta transferencia de material.

Medida de longitud: se midió el tamaño de la muestras con el empleo de un pie de rey Mitutoyo, de fabricación japonesa con un error de precisión de $0,05 \mu\text{m}$. Se evitó obtener bordes irregulares, los cuales pudieran distorsionar u obtener medidas lo más precisa posible. Se realizaron mediciones antes y después del ensayo para controlar el peso de las muestras. Las normas ASTM consideran aceptables valores con un coeficiente de variación del orden del 15 % en mediciones de la longitud.

2.8.2. Parámetros operacionales

Los parámetros operacionales que caracterizaron las condiciones funcionales del tribosistema y que se consideraron durante el desarrollo del ensayo fueron el tipo de movimiento, considerado en nuestro ensayo el deslizante, la carga, la velocidad y la temperatura.

2.8.3. Parámetros de interacción

Se definen como parámetros de interacción al modo de contacto entre las dos superficies. El desgaste se mide en la forma del volumen perdido contra cualquier parámetro. Generalmente, se mide en forma indirecta por medio de pérdida de masa, medición lineal o de área del desgaste. En este trabajo, el desgaste se midió como la pérdida de masa contra el tiempo.

Para el ensayo de desgaste abrasivo se empleó el procedimiento como se relaciona a continuación:

- Primeramente, las probetas se limpiaron con alcohol y se dejaron secar para evitar errores en la medición de sus respectivos pesos.
- La balanza y máquina tribológica se limpiaron de todo residuo y contaminante de pruebas anteriores.

Para el caso del ensayo se emplea la siguiente metodología:

- Pegar el papel abrasivo al disco rotatorio con pegamento.
- Fijar la probeta en el portaprobeta.
- Encender la pulidora metalográfica y encender el cronómetro simultáneamente.
- Retirar la probeta de la máquina en un tiempo de dos minutos.
- Limpiar las probetas con agua y luego con alcohol absoluto para retirar los residuos y el abrasivo seguido de un secado por aproximadamente cuatro minutos.
- Pesarse cada probeta por lo mínimo tres veces para hallar el peso promedio. Si los valores son en forma descendentes, es posible que la probeta no esté completamente seca.
- Como las pruebas son por pérdida de masa acumulada, es necesario repetir el proceso, por lo tanto se tiene que colocar en la misma posición y con la misma dirección de deslizamiento.

El área nominal de contacto de las probetas se calcula por la ecuación 2.14.

$$A_n = l \cdot b \quad (2.14)$$



Donde:

A_n - área nominal de contacto, mm

l - longitud de la probeta, mm

b - ancho de la probeta, mm

Un factor importante en el estudio del desgaste abrasivo es el coeficiente de desgaste, el cual se define como la razón entre la dureza del abrasivo y la del material desgastado. La ecuación 2.16 expresa la relación entre la dureza del par tribológico. Cabe señalar que a partir del valor del coeficiente de desgaste igual a 0,6, el incremento de la dureza del abrasivo no provoca un incremento apreciable en el desgaste, el cual alcanza un valor constante.

$$k = \frac{H_a}{H_g} \quad (2.16)$$

Donde:

k - coeficiente de desgaste

H_a - dureza del abrasivo, N

H_g - dureza del material desgastado, N

Mediante la ecuación 2.17 se halla la presión nominal de contacto.

$$P_n = \frac{F_n}{A_n} \quad (2.17)$$

Donde:

P_n - presión nominal de contacto, N

F_n - fuerza nominal, kgf

La pérdida de peso de la probeta se halla por la diferencia entre el peso de la probeta antes y después del ensayo de desgaste.

$$m = m_i - m_f \quad (2.18)$$

Donde:

m - masa pérdida de la probeta, kg

m_i - masa inicial de la probeta, kg

m_f - masa final de la probeta, kg

La diferencia entre el espesor de la cara desgastada de la probeta antes y después del ensayo de desgaste se halla por la ecuación 2.19.



$$h = h_i - h_f \quad (2.19)$$

Donde:

h - espesor desgastado del material, mm

h_i - espesor inicial de la cara desgastada, mm

h_f - espesor final de la cara desgastada, mm

El desgaste lineal se calcula por la ecuación 2.20.

$$W_h = h \quad (2.20)$$

Donde:

W_h - desgaste lineal, mm

El recorrido de fricción se halla mediante la ecuación 2.21.

$$S_f = \frac{3HB \cdot W_h}{k \cdot P_n} \quad (2.21)$$

Donde:

S_f - recorrido de fricción, mm

HB - dureza Brinell del material desgastado, N

La intensidad del desgaste lineal se halla por la ecuación 2.22.

$$I_h = \frac{W_h}{S_f} \quad (2.22)$$

Donde:

I_h - intensidad del desgaste lineal

Otro parámetro que es necesario hallar durante los estudios del desgaste abrasivo es el desgaste gravimétrico, el cual se calcula por la ecuación 2.23.

$$W_g = m \quad (2.23)$$

Donde:

W_g - desgaste gravimétrico, kg

La intensidad del desgaste gravimétrico se calcula por la ecuación 2.24.

$$I_g = \frac{W_g}{S_f} \quad (2.24)$$

Donde:

I_g - intensidad de desgaste gravimétrico, kg/mm

La ecuación 2.25 ofrece la posibilidad de hallar el desgaste volumétrico a partir del desgaste lineal.

$$W_V = W_h \cdot A_n \quad (2.25)$$

Donde:

W_V - desgaste volumétrico, mm³

A partir de la ecuación 2.26, se calcula la intensidad del desgaste volumétrico.

$$I_V = \frac{W_V}{S_f \cdot A_n} \quad (2.26)$$

Donde:

I_V - intensidad del desgaste volumétrico

El grado de penetración del abrasivo permite determinar el estado de deformación de la superficie y se plantea en la ecuación 2.27.

$$D_p = R \cdot \left(\frac{\pi \cdot HV}{2F_n} \right)^{0,5} - \left(\frac{\pi \cdot HV}{2F_n} R^2 - 1 \right)^{0,5} \quad (2.27)$$

Donde:

D_p - grado de penetración del abrasivo, mm

R - radio de la aspereza del abrasivo, mm

HV - dureza de Vickers de la probeta, N

El microcorte se produce cuando $D_p > 0,27$.

Se presenta una deformación vico – elástico cuando $0,1 < D_p < 0,27$.

Se presenta una deformación plástica por rayado cuando $D_p \leq 0,09$.

2.9. Procedimiento estadístico

Los ensayos de desgaste se caracterizan por poseer un comportamiento muy sensible y una gran cantidad de variables. Por consiguiente, se hace necesario evaluar estadísticamente los resultados experimentales obtenidos para conocer su confiabilidad. Esta evaluación estadística se realiza comúnmente por medio de la desviación estándar y del coeficiente de variación de la pérdida de masa y se calculan por las ecuaciones 2.28 y 2.29 respectivamente.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - \left(\frac{\sum y_i}{n}\right)^2}{n-1}}$$

(2.28)

Donde:

 σ - desviación estándar y_i - valor de la observación \bar{y} - media aritmética n - número de observaciones

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2.29)$$

2.10. Procedimiento para la modelación por Método de Elementos Finitos

Al objeto de determinar las tensiones térmicas generadas en el acero AISI 1340 a diferentes diámetros se realizan cálculos mediante simulación numérica por elementos finitos. Para ello se ha utilizado el paquete de software ANSYS 12.1.

Para esta simulación se tuvo en cuenta:

1. Obtención del modelo geométrico
2. Aplicación de las condiciones de fronteras y de cargas
3. Mallado
4. Búsqueda de la solución (solver)
5. Realización del post procesamiento y obtención de las respuestas en el dominio de las tensiones, los esfuerzos y los desplazamientos en el Método de Elementos Finitos, es necesario definir los esfuerzos y los desplazamientos; para los esfuerzos (Zienkiewicz, 2000) el sistema fijo de coordenadas cartesianas se denota como x,y,z ó en forma indexada x1, x2, x3, de a misma manera los desplazamientos pueden ser denotados como u,v,w ó u1,u2,u3. Por ello es posible definir xi como las coordenadas y ui como los desplazamientos, siendo los rangos de 1, 2, 3. En la figura 2.5, se observa el comportamiento del mallado para las condiciones de trabajo del material del cilindro del enfriador de mineral laterítico.



ELEMENTS

MAT NUM

ANSYS

MAY 18 2013

11:31:51

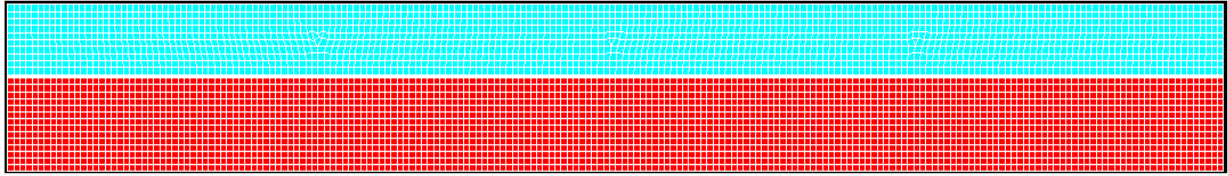


Figura 2.5. Comportamiento del mallado para las condiciones de trabajo.



2.11. Conclusiones del capítulo 2

- Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental, tecnologías, software y equipamiento novedosos que garantizan precisión y confiabilidad a los resultados.
- Las ecuaciones desarrolladas caracterizan el comportamiento del desgaste abrasivo en función del carácter de la fricción de los dos cuerpos en contacto y posibilitan la estimación de la dureza en el acero AISI 1340 tratado térmicamente cuando es sometido a este proceso.
- El estudio de la modelación por el método de Elementos Finitos mediante la simulación en el ANSYS 12.1 permite obtener una información detallada respecto a las tensiones provocadas por acción de la temperatura lo que permite establecer una relación con el comportamiento microestructural del material analizado.

CAPÍTULO 3

CAPITULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

Se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, se describe el comportamiento microestructural del acero AISI 1340, en las condiciones descritas en los experimentos. Así como se revela a partir del análisis metalográfico obtenido.

El objetivo de este capítulo es establecer el comportamiento microestructural, así como el procedimiento metodológico que caracteriza el desgaste abrasivo en el material de los enfriadores de mineral laterítico.

3.2. Observación con microscopía óptica

Fueron observadas las probetas en el centro, y en los bordes, de acuerdo con el diseño de observación expuesto en el capítulo 2, epígrafe 2.5, con rangos de aumento de 100x para cada probeta.

Se toma como base de comparación para el comportamiento del material de estudio la muestra determinada en el espectrómetro, epígrafe 2.2 del capítulo 2.

En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se pueden observar las microestructuras del borde y centro de las probetas a la entrada, centro y salida del enfriador.

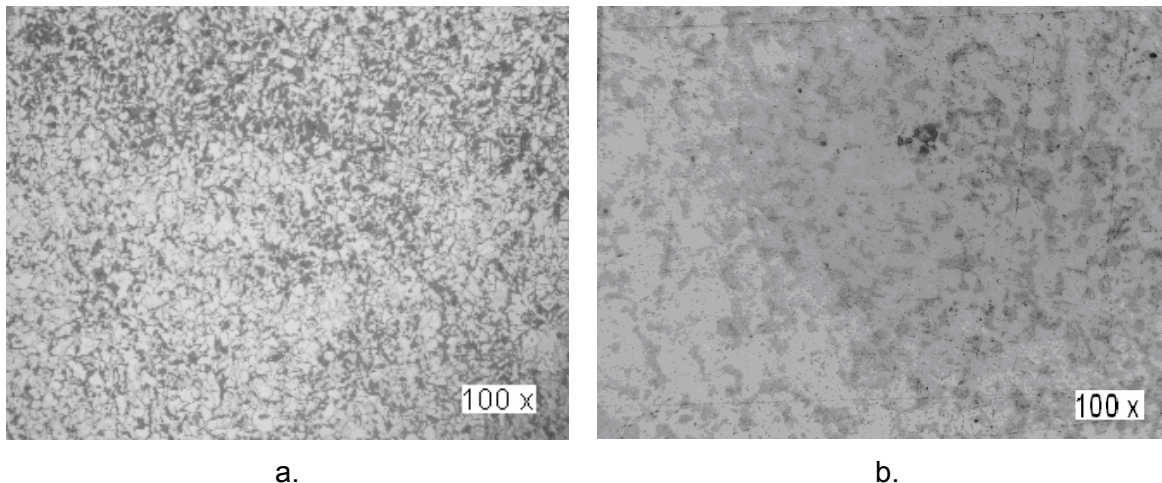


Figura 3.1. Microestructura de las probetas a la entrada del enfriador. Centro (a), borde (b).

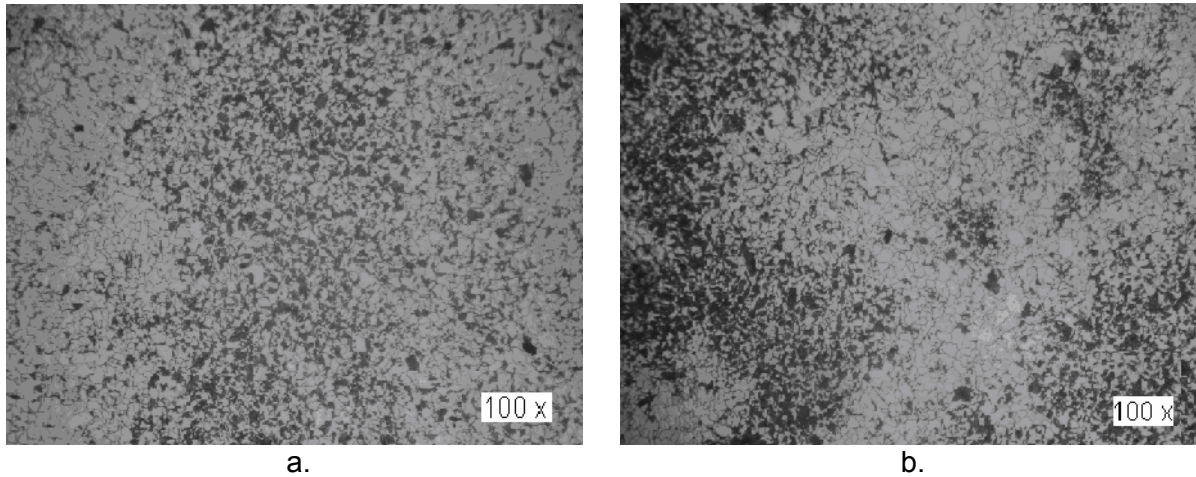


Figura 3.2. Microestructura de las probetas en el centro del enfriador. Borde (a), centro (b).

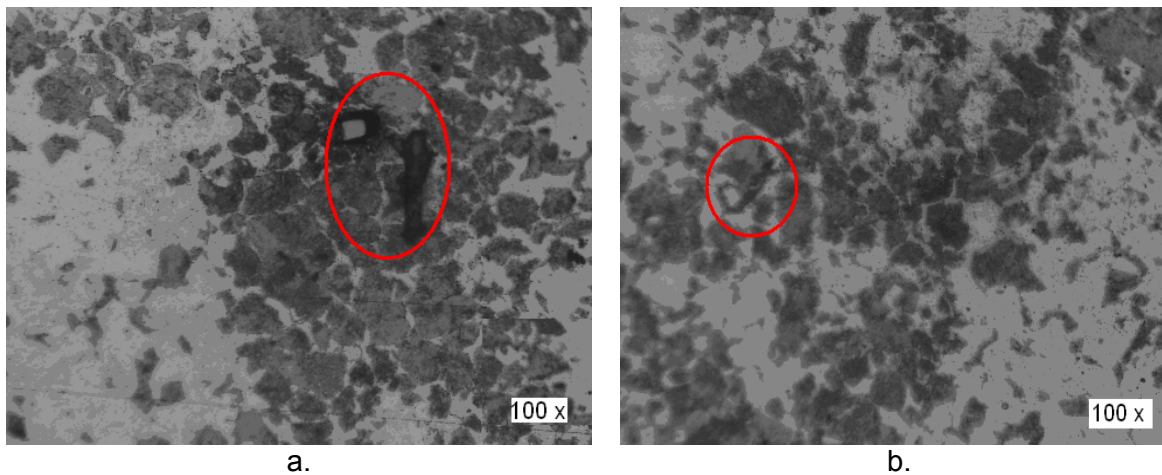


Figura 3.3. Microestructura de las probetas a la salida del enfriador. Borde (a), centro (b).

En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se observa una estructura ferrita – perlita, típico de los aceros al carbono.

En la muestra patrón del material del cilindro del enfriador, se observan los granos de perlita y ferrita de un tamaño mayor, en la figura 3.1 (a y b) a la entrada del cilindro los granos son más pequeños, esto está motivado por la presencia de las altas temperaturas y producto de la fricción del mineral.

La figura 3.2 (a y b) muestra una estructura semejante a la de la muestra de la entrada del cilindro, aunque se observan además los granos de un tamaño mayor, esto está motivado a que la temperatura de trabajo en esta parte del enfriador fluctúa entre 450 y 500 °C.

La estructura del material a la salida del cilindro (figura 3.3) ha originado pocos cambios, si se tiene en cuenta la muestra patrón se evidencia que los granos han

mantenido su tamaño, la temperatura de salida (200 °C), tiene poca o ninguna incidencia en las transformaciones de fase del acero. Además se puede observar que en ambas microestructuras hay afectaciones de incrustaciones metálicas, lo que presumiblemente ha sido provocado por dos elementos, el primero el mineral laterítico y otro elemento pudiera ser el accionamiento de los rastrillos raspadores sobre el material del cilindro.

3.3. Análisis de la dureza

Las probetas se sometieron a un ensayo de dureza Vickers, el cual se realizó con una masa de 50 g durante quince segundos. En cada muestra se marcaron tres huellas, la primera en un borde, la segunda en el centro y la tercera en el otro borde de la probeta. Los resultados experimentales obtenidos se exponen en el anexo 1.

Los valores de las diagonales se sustituyen en la ecuación 2.11 para hallar los diámetros medios y estos últimos se sustituyen en la ecuación 2.12 para hallar la dureza Vickers de las 3 huellas. Los valores de dureza Vickers se sustituyen en la ecuación 2.13 para hallar la dureza Vickers promedio. Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Dureza promedio de las probetas.

Dureza Vickers (HV)		
Muestras de la entrada		
E1	E2	E3
1 79,7	1 65,6	1 58,9
Muestras del centro		
M1	M2	M3
81,9	86,6	88,9
Muestras de la salida		
S1	S2	S3
84,6	85,5	84,1

Como se observa en la tabla 3.1, se han relacionado los valores de dureza para cada una de las muestras del material del cilindro, las muestras de entrada (E1, E2 y E3), las muestras del centro (M1, M2 y M3) y las muestras de salida (S1, S2 y S3), se puede apreciar una variabilidad de las durezas en correspondencia con la ubicación de las probetas, en las muestras correspondientes a la entrada del enfriador presentan una dureza de hasta 168,1 HV, la misma decrece hasta 85,8 HV en la muestra del centro y 84,7 HV en la muestra de salida, la medición de las



durezas es consistente con los resultados obtenidos en las microestructuras observadas.

Lo anterior demuestra que actualmente la temperatura establecida para el funcionamiento del cilindro enfriador de mineral (650 – 700 °C) está por encima de lo que establece los rangos de trabajo, además otro elemento con el que puede estar asociado el incremento de la dureza es al fenómeno de acritud.

La medición de la dureza es consistente con los resultados obtenidos en las microestructuras observadas, lo que evidencia que el material del cilindro producto a las altas temperaturas y al desgaste por fricción han endurecido, ha existido una deformación ocasionado por el proceso de trabajo y quizás por una entrada de temperatura por encima de la establecida para la entrada del mineral, no siendo así con las muestras de la salida, las mismas tienen la tendencia de mantener la misma dureza y la misma microestructura.

3.4. Análisis del proceso de desgaste abrasivo

Cada probeta se sometió al ensayo de desgaste durante dos minutos y se midió la masa y el espesor de la cara desgastada antes y después del ensayo de desgaste con una balanza analítica y con un pie de rey manual respectivamente. Este procedimiento se repitió seis veces.

A partir de estos resultados, se realizaron los cálculos de pérdida de masa para las muestras de entrada (E1, E2 y E3), las muestras del centro (M1, M2 y M3) y las muestras de salida (S1, S2 y S3), sustituyendo los valores de la masa antes y después del desgaste en la ecuación 2.13 se puede apreciar que las muestras correspondientes a la entrada del enfriador presentan menores pérdidas de masa que las muestras del centro y salida del cilindro (las muestras de entrada varían entre 0,3018 g y 0,0804 g, las muestras del centro varían entre 0,0277 g y 0,4370 g; y las muestras de la salida entre 0,0692 g y 0,4655 g), anexos 2, 3 y 4.

Se halló la diferencia entre el espesor de la cara desgastada inicial y final sustituyendo los resultados experimentales en la ecuación 2.14. Se puede observar que existe una variabilidad de cambio de espesor entre las muestras de entrada (E1, E2 y E3), las muestras del centro (M1, M2 y M3) y las muestras de salida (S1, S2 y S3), (las muestras de entrada varían entre 0,01 mm y 0,08 mm, las muestras del

centro varían entre 0,10 mm y 0,25 mm; y las muestras de la salida (entre 0,10 mm y 0,24 mm), anexos 5, 6 y 7.

Se puede apreciar de los resultados experimentales obtenidos que las probetas tomadas del centro y de la salida del enfriador presentan mayor pérdida de masa y variación de espesor que las probetas tomadas de la entrada del enfriador. Esto señala que las probetas de la entrada son más duras y resistentes al desgaste abrasivo que las del centro y de la salida, lo que puede atribuirse a la elevada temperatura a la entrada del enfriador.

El contenido de los anexos 2, 3, 4, 5, 6 y 7 se representan gráficamente en las figuras 3.7 y 3.8.

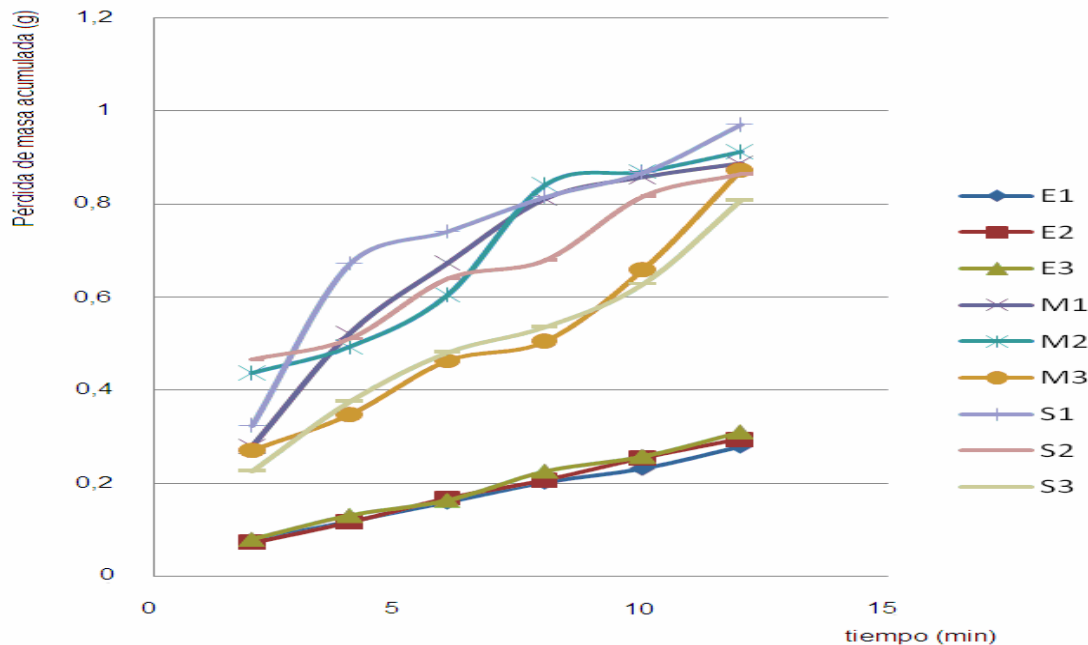


Figura 3.7. Gráfica de la pérdida de masa en función del tiempo de desgaste.

A partir de la figura 3.7, se puede afirmar que la pérdida de masa en las probetas M1, M2, M3, S1, S2 y S3 es mayor que en las probetas E1, E2 y E3 debido a que en el tramo de la entrada del enfriador existe mayor dureza y esto hace que el material en este tramo presente mayor resistencia a ser penetrado.

También, se puede comentar que la dureza y resistencia al desgaste abrasivo de las probetas M1, M2, M3, S1, S2 y S3 tienen similitud, por lo que presentan microestructuras sin cambios, ya que en estas partes del cilindro rotatorio las temperaturas no exceden el límite de transformación de fase en el diagrama hierro – carbono (727°C).

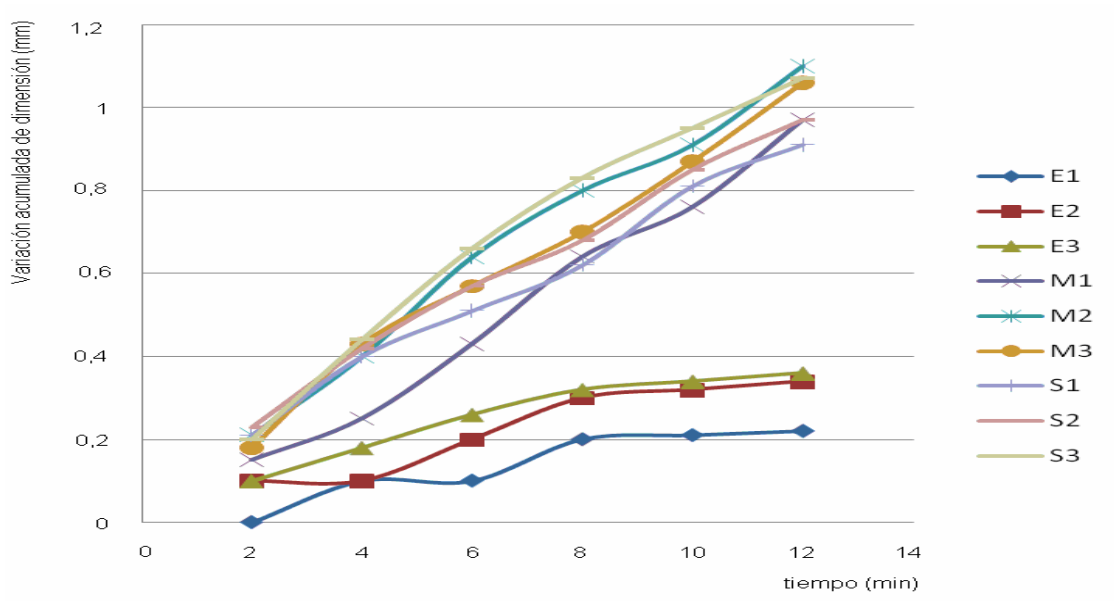


Figura 3.8. Gráfica de la variación del espesor de la cara desgastada en función del tiempo de desgaste.

Se aprecia en la figura 3.8 la tasa de desgaste gravimétrico es mayor en las probetas del centro y salida del enfriador que en las de la entrada, todas las muestras obtenidas mantienen una tendencia lineal de ir incrementando su valor en la misma medida que se ha realizado el desgaste, para todos los casos analizados la tangente del ángulo de inclinación es igual a la tasa de desgaste gravimétrico.

Para determinar el espesor del material desgastado para las probetas de la entrada, del centro y de la salida del enfriador, se sustituyen los valores de las dimensiones de las probetas antes y después del ensayo de desgaste (reflejados en los anexos 5, 6 y 7) en la ecuación 2.14.

3.4.1. Análisis del desgaste a la entrada del enfriador

A la entrada del enfriador de mineral E1 tiene una longitud (l) igual a 16,38 mm y un ancho (b) igual a 15,36 mm; para el caso de E2 l es igual a 14,74 mm y b es igual a 14,66 mm; y para E3 l es igual a 14,74 mm y b es igual a 15,42 mm. Considerando la ecuación 2.14 obtenemos que el área nominal de contacto (A_n) de E1 es $251,6 \text{ mm}^2$, de E2 es $216,09 \text{ mm}^2$ y de E3 es $227,29 \text{ mm}^2$.

A partir de la tabla 3.1, la dureza Vickers de E1 es igual a 179,65 HV y 171,0 HV, de E2 es igual a 165,58 HV y 158,0 HV y de E3 es igual a 158,86 HV y 151,1 HV respectivamente. Utilizando la ecuación 2.16 determinamos el coeficiente de desgaste (k), el cual es 11,83 para E1, 12,84 para E2 y 13,38 para E3.



Con el empleo de la ecuación 2.17 para una fuerza nominal de 500 kgf, determinamos la presión nominal de contacto (P_n) que es igual a 0,0199 MPa; 0,0231 MPa y 0,022 MPa para E1, E2 y E3 respectivamente.

A partir del anexo 5 se tiene que para E1 el espesor inicial de la cara desgastada (h_i) es igual a 11,5 mm y el espesor final (h_f) es igual a 11,28 mm; para E2 h_i es igual a 11,5 mm y h_f es igual a 11,16 mm y para E3 h_i es de 11,4 mm y h_f es de 11,04 mm. Utilizando la ecuación 2.19 obtenemos el espesor desgastado del material (h), es igual a 0,22 mm; 0,34 mm y 0,36 mm para E1, E2 y E3 respectivamente. El desgaste lineal (W_h) obtenido por la ecuación 2.20 es igual a 0,22 mm; 0,34 mm y 0,36 mm para E1, E2 y E3 respectivamente.

Se determinó por la ecuación 2.21, que el recorrido de fricción (S_f) para E1 es igual a 4 800,21 mm, para E2 es igual a 5 426,07 mm y para E3 es de 5 544,91 mm.

Al sustituir los valores de W_h y S_f en la ecuación 2.22, obtenemos que la intensidad del desgaste lineal (I_h) para E1 es $4,58 \cdot 10^{-5}$, para E2 es $6,27 \cdot 10^{-5}$ y para E3 es $6,49 \cdot 10^{-5}$.

Para E1 la masa inicial de la probeta es igual a 21,627 g y la masa final de la probeta es igual a 21,348 g, para E2 la masa inicial de la probeta es igual a 18,442 g y la masa final de la probeta es igual a 18,147 g, para E3 la masa inicial de la probeta es igual a 19,097 g y la masa final de la probeta es igual a 18,787 g. Sustituyendo la ecuación 2.18 en la 2.23 se determinó que el desgaste gravimétrico (W_g) para E1 es igual a 0,00028 kg, para E2 es igual a 0,000295 kg y para E3 es igual a 0,00031 kg (ver anexo 2).

Con los valores de W_g y S_f en la ecuación 2.24, obtenemos que la intensidad de desgaste gravimétrico (I_g) es de $5,82 \cdot 10^{-8}$ kg/mm; $5,44 \cdot 10^{-8}$ kg/mm y $5,59 \cdot 10^{-8}$ kg/mm para E1, E2 y E3 respectivamente.

A partir de los valores del desgaste lineal y el área nominal de contacto en la ecuación 2.25, se obtuvo que el desgaste volumétrico (W_v) para E1 es de $55,35 \text{ mm}^3$; para E2 es igual a $73,47 \text{ mm}^3$ y para E3 es de $81,82 \text{ mm}^3$.

Al sustituir los valores de W_v , S_f y A_n en la ecuación 2.26, se obtuvo la intensidad del desgaste volumétrico (I_v), para E1 es de $4,58 \cdot 10^{-5}$; para E2 es igual a $6,26 \cdot 10^{-5}$ y para E3 es de $6,49 \cdot 10^{-5}$.

El grado de penetración del abrasivo (D_p) se calculó por la ecuación 2.27. A partir de la tabla XXIV del Manual de Rectificadora, se obtiene que el radio de las partículas del papel abrasivo de grado 60 que se empleó en el ensayo de desgaste abrasivo es de 0,125 – 0,15 mm, por lo que D_p para E1 es 0,0533; para E2 es 0,0556 y para E3 es de 0,0568.

El grado de penetración es menor que 0,09, esto significa que el mecanismo del desgaste que se manifiesta es una deformación plástica por rayado. Cabe afirmar que este mecanismo de desgaste se presenta cuando la carga actuante no excede la carga máxima permisible por el material.

3.4.2. Análisis del desgaste en el centro del enfriador

En el centro del enfriador de mineral M1 tiene una longitud (l) igual a 16,52 mm y un ancho (b) igual a 15,24 mm; para el caso de M2 l es igual a 16,32 mm y b es igual a 15,34 mm; y para M3 l es igual a 15,92 mm y b es igual a 15,52 mm. Considerando la ecuación 2.14 obtenemos que el área nominal de contacto (A_n) de M1 es 251,76 mm², de M2 es 250,35 mm² y de M3 es 247,08 mm².

A partir de la tabla 3.1, la dureza Vickers de M1 es igual a 81,85 HV y 77,9 HV, de M2 es igual a 86,56 HV y 82,7 HV y de M3 es igual a 88,87 HV y 84,5 HV respectivamente. Con la ecuación 2.16 se determinó el coeficiente de desgaste (k), el cual es de 25,97 para M1, de 24,55 para M2 y de 23,92 para M3.

Por la ecuación 2.17 se determinó que para una fuerza nominal de 500 kgf, la presión nominal de contacto (P_n) es igual a 0,0199 MPa; 0,02 MPa y 0,0202 MPa para M1, M2 y M3 respectivamente.

Para M1 el espesor inicial de la cara desgastada (h_i) es igual a 12,7 mm y el espesor final (h_f) es igual a 11,73 mm; para M2 h_i es igual a 13,3 mm y h_f es igual a 12,2 mm y para M3 h_i es de 12,9 mm y h_f es de 11,84 mm. Utilizando la ecuación 2.19 obtenemos el espesor desgastado del material (h), es igual a 0,97 mm; 1,1 mm y 1,06 mm para M1, M2 y M3 respectivamente.



El desgaste lineal (W_h) obtenido por la ecuación 2.20 es igual a 0,97 mm; 1,2 mm y 1,06 mm para M1, M2 y M3 respectivamente (ver anexo 6).

Con los valores de la dureza del material desgastado (30 MPa), el desgaste lineal, la presión nominal de contacto y coeficiente de desgaste se determinó, por la ecuación 2.21, que el recorrido de fricción (S_f) para M1 es igual a 4 396,07 mm, para M2 es igual a 5 564,9 mm y para M3 es de 5 552,33 mm.

Al sustituir los valores de W_h y S_f en la ecuación 2.22, se obtuvo que la intensidad del desgaste lineal (I_h) para M1 es $2,21 \cdot 10^{-4}$, para M2 es $1,98 \cdot 10^{-4}$ y para M3 es $1,91 \cdot 10^{-4}$.

Para M1 la masa inicial de la probeta es igual a 14,478 g y la masa final de la probeta es igual a 13,591 g, para M2 la masa inicial de la probeta es igual a 15,510 g y la masa final de la probeta es igual a 18,147 g, para M3 la masa inicial de la probeta es igual a 14,776 g y la masa final de la probeta es igual a 13,903 g. Sustituyendo la ecuación 2.18 en la 2.23 determinamos que el desgaste gravimétrico (W_g) para M1 es igual a 0,000887 kg, para M2 es igual a 0,000912 kg y para M3 es igual a 0,000873 kg (ver anexo 3).

Al sustituir los valores de W_g y S_f en la ecuación 2.24, obtenemos que la intensidad de desgaste gravimétrico (I_g) es de $2,02 \cdot 10^{-4}$ kg/mm; $1,64 \cdot 10^{-7}$ kg/mm y $1,57 \cdot 10^{-7}$ kg/mm para M1, M2 y M3 respectivamente.

Sustituyendo los valores del desgaste lineal y el área nominal de contacto en la ecuación 2.25, obtenemos que el desgaste volumétrico (W_v) para M1 es de 244,21 mm³; para M2 es igual a 275,38 mm³ y para M3 es de 261,9 mm³.

Sustituyendo los valores de W_v , S_f y A_n en la ecuación 2.26, obtenemos la intensidad del desgaste volumétrico (I_v), para M1 es de $2,21 \cdot 10^{-4}$; para M2 es igual a $1,98 \cdot 10^{-4}$ y para M3 es de $1,91 \cdot 10^{-4}$.

El grado de penetración del abrasivo (D_p) para este caso es de 0,125 – 0,15 mm, por lo que D_p para M1 es 0,0794; para M2 es 0,0771 y para M3 es de 0,0761.

El grado de penetración es menor que 0,09, esto significa que el mecanismo del desgaste que se manifiesta es una deformación plástica por rayado.

3.4.3. Análisis del desgaste a la salida del enfriador

En la salida del enfriador de mineral S1 tiene una longitud (l) igual a 14,58 mm y un ancho (b) igual a 13,5 mm; para el caso de S2, l es igual a 14,84 mm y b es igual a 14,38 mm; y para S3, l es igual a 14,52 mm y b es igual a 13,4 mm. Considerando la ecuación 2.14 obtenemos que el área nominal de contacto (A_n) de S1 es 196,83 mm², de S2 es 250,35 mm² y de S3 es 194,57 mm².

A partir de la tabla 3.1, la dureza Vickers de S1 es igual a 84,57 HV y 80,75 HV, de S2 es igual a 85,5 HV y 81,7 HV y de S3 es igual a 84,11 HV y 75,05 HV respectivamente. Utilizando la ecuación 2.16 determinamos el coeficiente de desgaste (k), el cual es 25,13 para S1; 25,27 para S2 y 23,92 para S3.

Empleando la ecuación 2.17 para una fuerza nominal de 500 kgf, determinamos la presión nominal de contacto (P_n) que es igual a 0,0254 MPa; 0,0234 MPa y 0,0257 MPa para S1, S2 y S3 respectivamente.

Para S1 el espesor inicial de la cara desgastada (h_i) es igual a 14,52 mm y el espesor final (h_f) es igual a 13,4 mm; para S2 h_i es igual a 12,9 mm y h_f es igual a 11,93 mm y para S3 h_i es de 12,9 mm y h_f es de 11,84 mm. Por la ecuación 2.19 obtenemos el espesor desgastado del material (h), es igual a 0,91 mm; 0,97 mm y 1,07 mm para S1, S2 y S3 respectivamente. El desgaste lineal (W_h) obtenido por la ecuación 2.20 es igual a 0,91 mm; 0,97 mm y 1,07 mm para S1, S2 y S3 respectivamente (ver el anexo 7).

Con los valores de la dureza del material desgastado (30 MPa), el desgaste lineal, la presión nominal de contacto y coeficiente de desgaste determinamos, con el empleo de la ecuación 2.21, que el recorrido de fricción (S_f) para S1 es igual a 3 453,27 mm, para S2 es igual a 4 081,87 mm y para S3 es de 3 710,2 mm.

Sustituyendo los valores de W_h y S_f en la ecuación 2.22, obtenemos que la intensidad del desgaste lineal (I_h) para S1 es $2,64 \cdot 10^{-4}$, para S2 es $2,38 \cdot 10^{-4}$ y para S3 es $2,88 \cdot 10^{-4}$.

Para S1 la masa inicial de la probeta es igual a 21,583 g y la masa final de la probeta es igual a 20,612 g, para S2 la masa inicial de la probeta es igual a 21,264 g y la masa final de la probeta es igual a 20,399 g, para S3 la masa inicial de la probeta es igual a 22,260 g y la masa final de la probeta es igual a 21,451 g. Sustituyendo la ecuación 2.18 en la 2.23 determinamos que el desgaste gravimétrico (W_g) para S1 es igual a 0,00097 kg, para S2 es igual a 0,000865 kg y para S3 es igual a 0,000809 kg (ver anexo 4).

Sustituyendo los valores de W_g y S_f en la ecuación 2.24, obtenemos que la intensidad de desgaste gravimétrico (I_g) es de $2,81 \cdot 10^{-7}$ kg/mm; $1,57 \cdot 10^{-7}$ kg/mm y $2,18 \cdot 10^{-7}$ kg/mm para S1, S2 y S3 respectivamente.

Con los valores del desgaste lineal y el área nominal de contacto en la ecuación 2.25, obtenemos que el desgaste volumétrico (W_v) para S1 es de $179,12 \text{ mm}^3$; para S2 es igual a $207,0 \text{ mm}^3$ y para S3 es de $208,19 \text{ mm}^3$.

Sustituyendo los valores de W_v , S_f y A_n en la ecuación 2.26, obtenemos la intensidad del desgaste volumétrico (I_v), para S1 es de $2,64 \cdot 10^{-4}$; para S2 es igual a $2,38 \cdot 10^{-4}$ y para S3 es de $2,88 \cdot 10^{-4}$.

El grado de penetración del abrasivo (D_p) determinado para estas muestras es de $0,125 - 0,15 \text{ mm}$, por lo que D_p para S1 es 0,0781; para S2 es 0,0776 y para S3 es de 0,0783.

El grado de penetración es menor que 0,09, esto significa que el mecanismo del desgaste que se manifiesta es una deformación plástica por rayado.

Los resultados de los cálculos del ensayo de desgaste se resumen en el anexo 8. Muestran que tanto el desgaste lineal, gravimétrico y volumétrico como las intensidades de desgaste son menores en la entrada del cilindro del enfriador que en el medio y la salida.

Este comportamiento es debido al endurecimiento de la entrada del cilindro como consecuencia de las altas temperaturas de entrada del mineral reducido que en ocasiones superan la temperatura eutectoide del acero, a la alta velocidad de enfriamiento que provoca el templeado de la entrada del cilindro y a la fricción entre el



mineral y las paredes internas del cilindro del enfriador. Por otra parte, el centro y la salida del cilindro del enfriador no se endurecen porque la temperatura del mineral al pasar por estos tramos es inferior a la temperatura eutectoide.

La mayor pérdida de masa y variación del espesor de la cara desgastada en las probetas del centro y la salida del enfriador señala que la estructura del enfriador en estos tramos debe de ser diferente que en la entrada, afirmando lo dicho anteriormente.

En los tres tramos del cilindro del enfriador se manifiesta el mecanismo de desgaste de deformación plástica por rayado.

En muchas combinaciones de materiales, el desgaste para cargas muy elevadas deja de ser constante y puede aumentar linealmente con la carga (presión), o puede presentar abruptamente cualquier aumento para algunas cargas críticas. Esto puede ser explicado por la rotura o formación de capas de óxido o bien la introducción de nuevos mecanismos de desgaste inducidos por el contacto, el daño ocurre cerca de la superficie del material por el trabajo en frío, con formación de dislocaciones; si posteriormente se trabaja sobre la superficie, ocurre el desprendimiento de material pero esto será por el mecanismo de microfractura, debido al endurecimiento de la superficie, lo que ha sido reportado por Sagaró (2007); Alcántara *et al.* (2008a y 2008b) y Rodríguez (2009).

El mecanismo de desgaste abrasivo, es principalmente por el desplazamiento del material, por la deformación plástica y por desprendimiento de material que se considera como rayado o acanalamiento; por otra parte, también se presenta el desprendimiento de viruta fracturada. Otra consideración importante que se obtiene de estos resultados, es que existe un comportamiento estrictamente lineal entre la dureza y la resistencia a la abrasión de los materiales empleados.

3.5. Análisis estadístico

Los cálculos estadísticos se realizaron por medio de los softwares Statgraphics Plus Versión 5.1 y Microsoft Excel 2007. Los datos se ingresaron en los softwares y se obtuvieron los resultados. Las tablas 3.2, 3.3 y 3.4 reflejan los resultados estadísticos realizados sobre la pérdida de masa de la probeta durante el ensayo de desgaste abrasivo.

Tabla 3.2. Resultados estadístico de la pérdida de masa de las probetas del tramo entrada

Probeta	E1	E2	E3
Δm media	0,047	0,049	0,052
Desviación estándar	0,016	0,013	0,019
R^2 (%)	99,78	99,89	99,45
R^2 ajustado (%)	99,73	99,86	99,32
Error estándar de estimación	0,004	0,003	0,007
Error absoluto medio	0,002	0,002	0,005
Estadístico de Durbin - Watson	2,974	2,677	3,703
P - valor	0,01	0,01	0,01

Dado los valores obtenidos de la desviación estándar para las tres probetas según la tabla 3.2, los resultados del ensayo de desgaste abrasivo de las probetas E1, E2 y E3 muestran poca variación de su valor medio.

Dado que el p-valor en la tabla 3.2 es inferior a 0,05 para las 3 probetas, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95 % y hay indicio de una posible correlación serial.

Tabla 3.3. Resultados estadísticos de la pérdida de masa de las probetas del tramo medio.

Probeta	M1	M2	M3
Δm media	0,148	0,152	0,145
Desviación estándar	0,101	0,159	0,086
R^2 (%)	90,32	93,24	94,95
R^2 ajustado (%)	87,90	91,55	93,69
Error estándar de estimación	0,082	0,060	0,055
Error absoluto medio	0,059	0,041	0,035
Estadístico de Durbin - Watson	1,124	2,060	1,503
P-valor	0,03	0,03	0,03

Dado los valores obtenidos de la desviación estándar para las tres probetas según la tabla 3.3, los resultados del ensayo de desgaste abrasivo de las probetas M1, M2 y M3 muestran poca variación de su valor medio.

Dado que el p-valor de las tres probetas en la tabla 3.3 es inferior a 0,05; existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95 % y hay indicio de una posible correlación serial.

Tabla 3.4. Resultados estadísticos de la pérdida de masa de las probetas del tramo salida.

Probeta	S1	S2	S3
Δm media	0,162	0,144	0,135
Desviación estándar	0,136	0,163	0,063
R^2 (%)	85,84	97,88	97,52
R^2 ajustado (%)	82,30	97,36	96,90
Error estándar de estimación	0,095	0,026	0,036
Error absoluto medio	0,067	0,020	0,028
Estadístico de Durbin - Watson	1,752	3,586	2,011
P - valor	0,04	0,02	0,02

Según los valores obtenidos de la desviación estándar para las tres probetas según la tabla 3.4, los resultados del ensayo de desgaste abrasivo de las probetas S1, S2 y S3 muestran poca variación de su valor medio.

Dado que el p – valor de las tres probetas en la tabla 3.4 es inferior a 0,05; existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95 % y hay indicio de una posible correlación serial.

3.6. Análisis por el Método de Elementos Finitos

Utilizando ANSYS 12.1 se procede al análisis del material del enfriador de mineral laterítico por el MEF a partir de considerar la temperatura a la que está sometido dicho equipo durante el proceso de enfriamiento como la condición de frontera más influyente. Este tipo de análisis permite evaluar las deformaciones del objeto de estudio en las superficies internas y externas y localizar zonas altamente solicitadas o zonas de baja sollicitación.

Se analizó el comportamiento en un tramo de 5 m en la entrada del enfriador, considerando que en esta longitud la distribución de la temperatura (700 °C) y el intercambio térmico es mayor, si se tiene en cuenta que en la medida que el mineral es transportado a todo lo largo del material del cilindro esta va disminuyendo hasta 200 °C.

En la figura 3.9 se observa el comportamiento del material en correspondencia con la temperatura.

En esta figura la temperatura a la entrada del cilindro se representa en función de la escala graficada, donde los puntos rojos indican las tensiones máximas presentes en el proceso de zona de transferencia de calor, teniendo en cuenta el máximo de temperatura (700 °C), no debía existir cambios en la estructura del material, sin embargo hay presencia de estos puntos producto de las altas temperatura, la cual puede ser mayor que la recomendada para el funcionamiento del equipo. Es en estas localizaciones donde se generan las mayores concentraciones de tensiones térmicas que provocan la disminución del tamaño de los granos en la estructura del material con ello el incremento de la dureza.

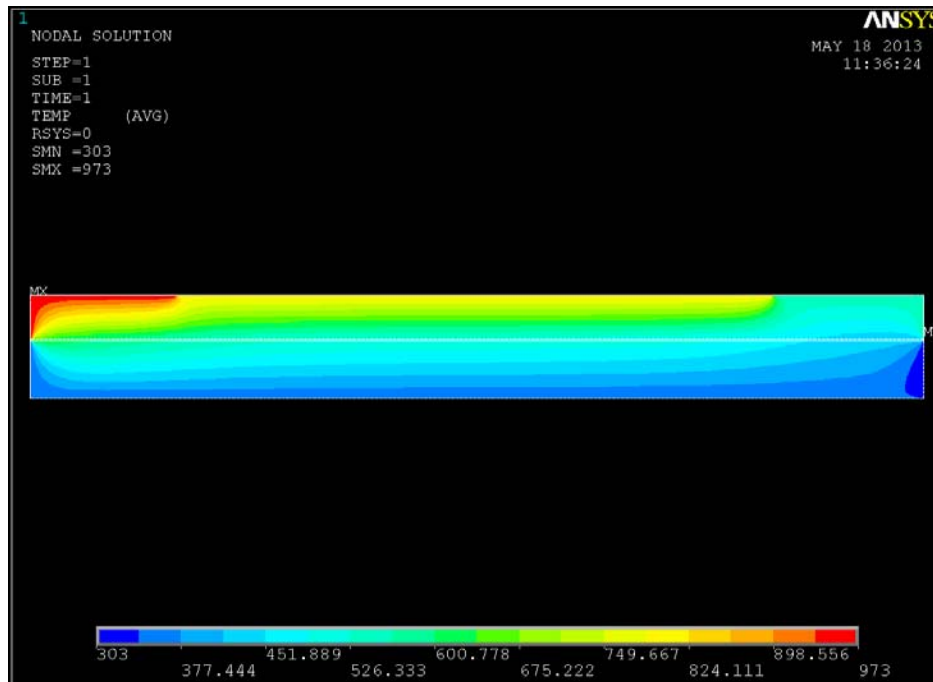


Figura 3.9. Comportamiento del material en relación con la temperatura longitudinalmente.

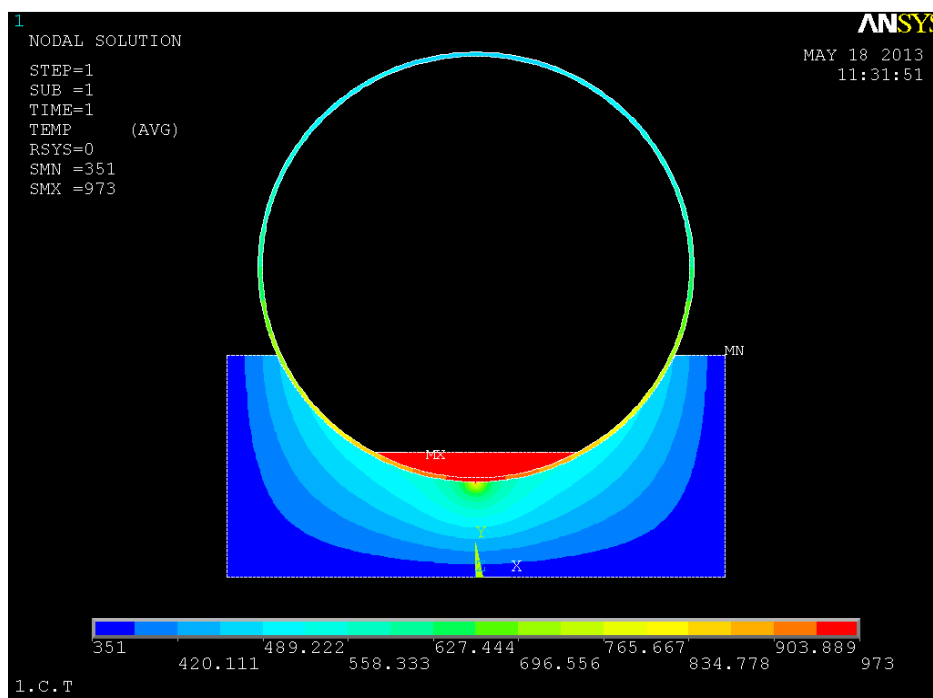


Figura 3.10. Distribución de la temperatura del material transversalmente.

Se observa una distribución de la temperatura transversalmente en el enfriador, se muestra que el llenado del mismo por el material ocupa aproximadamente un 9 % de su área. La temperatura en esta sección de entrada del mineral tiene un comportamiento que tiende a ser simétrico, es decir en a ambos lados del enfriador se mantiene un gradiente térmico similar producto a que la velocidad de rotación del cilindro es muy baja (9 rev/min).

Según los análisis realizados: análisis microestructural, ensayos de dureza, ensayos de desgaste abrasivo, simulación por el Método de Elementos Finitos, análisis estadísticos, los resultados obtenidos en cada uno de ellos demuestran que actualmente el material del cual está fabricado el cilindro rotatorio, trabaja con temperaturas superiores a 700 °C, lo que provoca cambios en su estructura interna, afectaciones en su retículo cristalino y por las condiciones de trabajo, tendrá menor durabilidad para el cual fue diseñado, cumpliéndose la hipótesis de nuestro trabajo.

3.7. Valoración económica

Los gastos incurridos por la investigación se pueden dividir en gastos de materiales, salarios de los operadores de máquinas y en gastos de energía. Conociendo el precio de los materiales utilizados durante la investigación, la duración de las operaciones de máquinas, la tarifa horaria de los operadores de las máquinas, la potencia consumida en los equipos utilizados y la tarifa eléctrica, se puede realizar una valoración económica de la investigación.

Tabla 3.5. Gastos de materiales y fuerza de trabajo.

Material	Costos		
	CUP	CUC	
Acero AISI 1340	----	67,5	
Lija	----	72,0	
Total	----	139,5	
Operario	Tiempo efectivo (h)	Tarifa (CUP/h)	CUP
Fresador	0,3	2,74	0,82
Téc. laboratorio	20,0	2,74	54,8
Total			55,62

Salario básico $S_b = 55,62$ CUP

Salario complementario $S_c = S_b \cdot 0,1 = 5,56$ CUP

Aporte a la seguridad social $S_s = (S_c + S_b) \cdot 0,09 = 5,51$ CUP

Tabla 3.6. Gastos energéticos.

Máquina	Duración de trabajo (h)	Potencia consumida (kW)	Energía consumida (kWh)	Tarifa (CUP/kWh)	Costo (CUP)
Fresadora	0,3	2,43	0,729	0,044	0,03
Microscopio	3,0	0,075	0,225	0,044	0,01
Microdurómetro	1,8	0,02	0,036	0,044	0,02
Pulidora	9,0	3,75	33,75	0,044	1,49
Total					1,55



Costo total = costo de materiales + salario básico + salario complementario + aporte a la seguridad social + costo de energía eléctrica

Costo total = 68, 24 CUP y 139, 5 CUC.

El costo total de la investigación tiene un componente en CUC y otro componente en CUP como demuestran los resultados económicos.

3.8. Impacto ambiental

El desarrollo sostenible de la humanidad constituye una constante preocupación para la sociedad. En tal sentido, al precisar la cantidad de material, las operaciones tecnológicas y el valor de los consumibles, se logra minimizar la cantidad de recursos y destinar solamente aquellos que resultan indispensables para el proceso.

Esto contribuye al necesario aprovechamiento racional de los recursos materiales y humanos y al optimizar la tecnología, se disminuye la emisión de gases tóxicos al ambiente, los tiempos operacionales con la consiguiente exposición de los operarios a las altas temperaturas, radiaciones y los gases, así como el consumo de energía del equipamiento.

El conocimiento de la salud del medio ambiente es un factor esencial para la protección que cada hombre debe establecer sobre su entorno. El desarrollo impetuoso de las fuerzas productivas ha implicado el incremento de los riesgos de contaminación atmosférica, de la misma manera el desarrollo vertiginoso de la industria ha creado desechos, que durante un tiempo se pensó que se podrían depositar en basureros, bien en tierra o en mar sin causar ningún perjuicio. En la actualidad comprendemos que estas acumulaciones no son más que el legado que preparamos para el futuro, que no tienen culpa alguna de la inmadurez del hombre para prever lo que podría pasar si continuáramos contaminando el entorno.

El proceso de caracterización de los impactos ambientales es de gran importancia, pues posibilita la comprensión de la dimensión exacta del análisis desarrollado, determinando como repercuten sobre el medio ambiente cada uno de los impactos ambientales que tienen lugar en el objeto. En la tabla 3.5 se muestran los impactos ambientales del proceso de enfriamiento de mineral.



Tabla 3.7. Identificación de los impactos ambientales del proceso de enfriamiento.

Acciones o actividades	Factores ambientales	Impactos ambientales
Derrame de mineral	Económico	Pérdidas por concepto económico
Derrame de agua		
Escape de gases contaminantes	Aire	Disminución de la calidad del aire
	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
	Económico	Pérdidas por concepto de evaporación del amoniaco
Emisiones de polvo	Hombre	Aumento de enfermedades respiratorias
Emisiones de ruido continuo		Pérdidas de la sensibilidad auditiva



3.9. Conclusiones del capítulo 3

- Las probetas de la entrada del enfriador presentan una dureza elevada con respecto a las del centro y salida.
- El desgaste lineal, gravimétrico y volumétrico, son mayores en el centro y salida del cilindro del enfriador respecto a la entrada, lo que señala que la resistencia al desgaste abrasivo del material es mayor en la entrada que en el centro y el la salida.
- El grado de penetración en los tres tramos es menor que 0,09 y significa que el mecanismo del desgaste que se manifiesta es una deformación plástica por rayado.
- El p – valor de las probetas es inferior a 0,05 lo que significa que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95 % y hay indicio de una posible correlación serial.



Conclusiones generales

- Se determinó el comportamiento microestructural del material del enfriador de mineral, quedando demostrado que existen cambios en el tamaño de los granos en dependencia de la variación de temperatura.
- El ensayo de dureza demostró que a la entrada del cilindro el material presenta una dureza de 168,1 HV siendo mayor que en el centro y en la salida que es de 85,8 HV y 84,7 HV respectivamente.
- Mediante la simulación en el ANSYS 12.1 se demostró que existen mayores concentraciones de tensiones térmicas en el área media del cilindro que es el área ocupada por el mineral, la distribución de las temperaturas muestran las variaciones de las tensiones tanto para la entrada, centro y salida del enfriador siendo mayores en la entrada del mismo.
- Los gastos incurridos por la investigación, divididos en gastos de materiales, salarios de los operadores de máquinas y en gastos de energía tiene un componente de 139,5 CUC y otro de 68, 24 CUP.



Recomendaciones

- Profundizar en la investigación con el uso de otros métodos de análisis metalográficos (DRX, EDAB) para así alcanzar una caracterización completa del objeto de estudio.
- Realizar la búsqueda de una aleación que garantice mayor vida útil bajo las condiciones actuales de trabajo.
- Proponer a la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", el control del flujo tecnológico en este equipo que según los resultados de nuestro trabajo, está por encima de la que se establece por proceso tecnológico.

BIBLIOGRAFÍA



Bibliografía

1. Abdalla, M. 2005. Unsteady numerical simulation of double diffusive convection heat transfer in a pulsating horizontal heating annulus. *Heat Mass Transfer*, 9p.
2. Adler, P H; et al. Strain Hardening of Hadfield Manganese Steel. *Mettallurgical and Materials Transactions. A. Volume 17 A. October 1986. p 1725*
3. Alcántara, D.; Fernández, T.; Rodríguez, I., Comportamiento de las capas deformadas por rodadura en los equipos de laboreo minero. 21 (01) 26 – 32, 2008. www.uni.edu.ni/Nexo. Consultado el 4 de julio 2008.
4. Alepuz, H. 1977. Mejora en el proceso de enfriamiento de mineral reducido con el enfriamiento actual. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 38p. Informe técnico.
5. Allen, C.; Sheen, M.; Williams, J.; Pugsley, V., The wear of ultra fine WC-Co hard metals. *Wear*. 250 (125) 604 – 610, 2001.
6. Alonso, C. 1973. Características del movimiento del mineral reducido caliente dentro de los enfriadores de mineral. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 27p. Informe técnico.
7. Alfaro, W., Simulación de procesos. En: <http://www.monografias.com/trabajos/>. 2001.
8. Álvarez A.R. 2008. Evaluación del proceso transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindro horizontales rotatorios el la empresa "Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma. Moa.
9. Álvarez, G. Tribología. Fricción, Desgaste y Lubricación. Universidad Central de Las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica. Capítulo IV. 1999.
10. Archard, J., Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*. 24, 981 – 8, 1953.
11. Arena, A. 2009. Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la Empresa "Comandante René Ramos Latour". Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
12. Arostegui, J. La Investigación Histórica: Teoría y Método, Critica, Barcelona, 2001, pp. 74 - 98, BEDARIDA, François, Op. Cit., p.19
13. ASTM 1992, ASM Handbook Vol. 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM International. USA



14. Ball, A., "On the Importance of Work Hardening in the Design of Wear Resistant Materials", *Wear* 91, 1983, p. 201.
15. Bilmes, P.D. *Microscopía óptica y electrónica de aceros al carbono*. Monografía. La Habana. 2001.
16. Blau, P., *Lubrication and Wear Technology, Glossary of Terms in ASM Handbook*. Vol. 18 Friction, printed in USA, 1992, p. 942.
17. Boateng, A. A.; Barr, P.V. Granular flow behaviour in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, January 10, 1997 vol. 330 pp. 233-249.
18. Bold, PE, *Wear* 1991; v XIV (N 2): 307-317.
19. Callister, W., *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Editorial Reverté, 1999.
20. Caubet, J.J. (1971). "Teoría y Práctica Industrial del rozamiento". España.
21. Carlos, J. León, L. M. Mesa, D. H. Toro, A. Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo en recubrimientos duros para aplicaciones en la industria minera. *Scientia et Technica* Año X. 25 (1): 149 – 154. 2004.
22. Clauser. H. R. *Diccionario de materiales y procesos de ingeniería*. Editorial Labor S.A. Barcelona. 1985.
23. Columbié Navarro, A., J. Rodríguez Gamboa, D. Guzmán del Río y J.I. Sevilla Rodríguez (2000): "Modelo matemático del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio", *Minería y Geología*, 17 (2): 47-53.
24. Correa, N. Balance energético en el enfriador de mineral en la planta de Hornos de reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Ramón, Gonzáles Marrero. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2000. 43p.
25. Courtney, T., *Mechanical Behaviour of Materials*, 2nd. Ed., McGraw-Hill Companies, Inc., Singapore, 2000, p. 733.
26. CUBA. NC 04 – 61. Ensayos de materiales. Determinación del tamaño de los granos en metales no ferrosos. p 8.
27. Chacín, F., *Diseño y análisis de experimentos I*. Ed. FEPUVA – UCV. Caracas, Venezuela. 2000. p 388.



28. Chacón, R. 1982. Las posibles causas que están incidiendo sobre el enfriamiento deficiente del mineral dentro de los cooler. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 21p. Informe técnico.
29. De Valle, R.E. 2008. Programación de modelo matemático para la evaluación del proceso de transferencia de calor en cilindros horizontales rotatorios para el enfriamiento de mineral laterítico reducido. Góngora, E. Tesis de grado. ISMM. Moa.
30. Deuis, R.; Subramian, C., Three-body abrasive wear of composite coatings in dry and wet environments, *Wear* 214, 1998, pg. 112-130.
31. Díaz, L. Desgaste en los pasadores de esteras de los tractores KOMATSU D85P-21. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis de Ingeniería]. 2008. p 71.
32. Echeverría, W. J. 2009. Caracterización microestructural del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis de Ingeniería]. p 93
33. Evans, A.; Gulden, M.; Rosenblatt, M., *Proceedings of the Royal Society London. Ser. A* 361 (1978) p 343.
34. Feng, Z.; Ball, A., The erosion of four materials using seven erodents – towards an understanding. *Wear*. Vol. 233 – 235, 1999, pp. 674 – 684.
35. Fernández, T. Comportamiento de las variaciones mecánicas superficiales mediante la Deformación Plástica por rodadura. [Tesis de maestría]. Moa: ISMM, 2007. p 65.
36. Fleischer, F. *Tribología y Fiabilidad*. Mandeburgo .1985.
37. GANGARA, C. 1980. Enfriamiento del mineral reducido mediante la adición directa de agua atomizada en el enfriador rotatorio de Nicaro. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 32p. Informe técnico.
38. Gatti, I. P. Sena, A. Bonczók, A. Candia, A. Resistencia al desgaste de las aleaciones Al - Zn y Zn - Al diluídas. En: II Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales. Posadas, Argentina, 16 – 17 Octubre, 1 – 6. 2008.
39. Gatzanis, E., The abrasion and abrasion - corrosion properties of 9 % chromium steel, *Wear* 165, 1993, pp 213 – 220.
40. Greaves, R. H. Wrighton, H. *Metalografía microscópica práctica*. Ediciones Urmo, Bilbao. 1966. p 229.



41. Govantes, G. Y G. Rodríguez. 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.
42. Góngora, E. 2004. Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios de la planta hornos de reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Tesis de maestría. ISMMANJ, Moa, Cuba. 80p.
43. Góngora, E. 2007. Modelo Matemático Multivariable para un Proceso de Enfriamiento Industrial de Sólidos en Cilindros Rotatorios Horizontales. Minería y Geología, 7p.
44. Góngora, L, E. 2009. Coeficientes de transferencia de calor en enfriadores de mineral laterítico a escala piloto. Minería y Geología v.25 n.3.
45. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983
46. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983
47. Guliaev, A P. Metalografía 2 ED REV Y AUM, Rusia, Mir, 1978
48. Gulden E., Rosenblatt M.E., Proc. R. Soc. Lond., Ser. A361 (1978) 343.
49. Gutiérrez, F.; De la Vara, R., Análisis y Diseño de Experimentos, Mc Garw Hill, 1^a edición. México. 2003. pp 237 – 264.
50. Guzmán, A. (2001) Prólogo del libro Computación y Programación Moderna. Guillermo Levine, autor. Pearson Education, Addison-Wesley. 609 páginas. ISBN 968-444-485-0
51. Hein, L.; Shewmon, P., Effects of hardness on solids particles erosion mechanisms in AISI 1060 steel. Wear 89,291 – 302. 1983.
52. Hendry, J.; Rudd, D.; Seader, J., Synthesis in the design of chemical processes, AIChE J. 19 (1) 13 – 17, 1973.
53. Herrera, E; Gallardo, J. Algunos casos prácticos de fallos metálicos relacionados con el desgaste. Revista de Metalurgia CENIM. Madrid, 22 (4), 1986.
54. Houge, O; M, Watson; R. A. Ragatz. Principios de los procesos químicos. T.I. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1978.
55. Hutchings, I., Solid Particle Erosive Wear Testing, ASM Handbook, Vol. 8 Mechanical Testing and Evaluation, 2000, pp. 728 – 751.



56. Hurtado, I Y Toro, J (1999). Paradigmas y Métodos de Investigación en tiempos de cambio. Episteme Consultores y Asociados. Carabobo, Venezuela.
57. Incropera, F. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Tercera edición. La Habana. Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II. III.
58. Ingham, T. y E. Moreland: The Influence of Time-dependent Plasticity on elastic-plastic fracture toughness. En: ASTM STP 803, Vol. I. 1983.
59. Janos, B.; Lugscheider.; E.; Remer, P., Effect of thermal aging on the erosion resistance of air plasma sprayed zirconia thermal barrier coating. Surface and Coatings Technology. Vol. 113, 1999, pp. 278 – 285.
60. KEY TO STEEL. Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>
61. Khakhar, D. V.; McCarthy, J. J.; Ottino, J. M. Radial segregation of granular mixtures in rotating cylinders. Physics of Fluid, December 1997 vol. 9 pp.3600-3614.
62. Kragelski, I., Friction and Wear. Butterworth, London 1978.
63. Kragelski, I.; Kombatov, V., Fundamentos de los cálculos de fricción y desgaste, Mashinoestroyeniye, Moscú. 1982.
64. Lamparter, P., Crystallite sizes and micro strains from x - ray diffraction line profile analysis. 40 (11) 145 – 150, 2000.
65. Lawn, B.; Evans, A.; Marshal, D., Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System. Journal of the American Ceramic Society. Vol. 63, No. 9 – 10, 1979, pp. 574 – 581.
66. Leyva, D.Y. 2010. Influencia de la temperatura del mineral laterítico reducido en el índice de extractable en el tanque de contacto. Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
67. Leyva Torres R., Pérez Ochoa E., Céspedes Torres F. Rediseño y Fabricación de Cooler. 2006. FORUM DE CIENCIA Y TÉCNICA.
68. Londrez, M. J. 2007. Modelación y simulación del proceso de enfriamiento del mineral reducido en cilindros horizontales rotatorios por el método de elementos finitos. M.Sc. Ever Góngora Leyva (tutor). Tesis en opción al título de Ing. Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 86 h.



69. López, E. J. 2004. Estudio experimental del desgaste abrasivo en aceros AISI 8620, D – 2 Y H – 13 con y sin tratamiento superficial. Instituto Politécnico Nacional. México D. F. [Tesis de Maestría]. p 105.
70. MANGANESE CENTRE. Manganese in powder metallurgy alloys. Manganese Centre. Paris. p 1998. 53.
71. Manual de Rectificadora. Editorial Pueblo y Educación, La Habana. 1985. p 218.
72. Martínez, F; Martínez, H. Adaptación de máquinas pulidoras para ensayos de desgaste abrasivo. Revista Construcción de Maquinaria. N01. 1981. p 47-55.
73. Martínez, J. Martínez, F. Teoría y práctica de rozamiento. Ministerio de Educación Superior, La Habana, 1986. p 246.
74. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Versión 1.1. 1996.
75. Matos C.D. 2007. Evaluación de la influencia del agua de enfriamiento en el proceso de transferencia de calor del mineral laterítico reducido cilindros horizontales en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Moa.
76. MATOS, C. D. 2012. Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en Cilindros horizontales rotatorios. Tesis de Maestría. Pág. 68.
77. Medina, A. 1995. Propuestas de modificación del carro raspador del enfriador de mineral de Nicaro. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 11p. Informe técnico.
78. Mesarovich, M. Fundamento de la teoría general de los sistemas. Moscú: Mir, 1996. p 422-436.
79. Ortiz, F. A. 2010. Estimación de la temperatura del mineral reducido durante el proceso de enfriamiento por el método de elementos finitos. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa [Tesis de Ingeniería]. p 83.
80. Osorio, G. 2009. Evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara". Trabajo de diploma. Moa ISMM.
81. Perron, J. and R. T. Bui, "Fours rotatifs: Modele dynamique du mouvement du lit", Can. J. Chem. Eng. 72, 16-25 (1994).



82. Rodríguez, M. J. A. 2011. Proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Trabajo de Diploma. Departamento de Metalurgia. Pág. 55
83. Rodríguez, R. 1978. Análisis de la influencia de la adición de vapor de agua sobre el enfriamiento de mineral reducido en el proceso de Nicaro. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 10p. Informe técnico.
84. Rodríguez, R. 1970. Investigación de la modelación matemática del horno de Calcinación. Vol. No.2. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 24p. Informe técnico.
85. Rosell, R. 1986. Las posibles causas que están incidiendo sobre el enfriamiento deficiente del mineral dentro de los cooler. Nicaro: empresa "Comandante René Ramos Latour", 15p. Informe técnico.
86. Sagaró, R.; Gómez, J.; Espinosa, L.; Carvajal, H., Rodríguez, C., Mecanismo de desgaste de materiales metálicos para martillos de molinos debido a la acción de partículas erosivas. Tecnología Química Vol. XXVII (2) 41 - 47, 2007.
87. Santana, P.O. 2009. Evaluación técnico – económica del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales rotatorios en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
88. Sai, P. S.T., G. D. Surender and A. D. Damodaran, "Prediction of axial velocity profiles and solid hold-Up in a rotary klin", Can. J. Chem. Eng. 70, 438-44 (1992).
89. Shrager, G. R. 2004. Modeling of the Viscous Flow with a Free Surface inside a Rotating Horizontal Cylinder. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, Vol. 39, No. 3, pp. 283–289.
90. Shipway, P.; Hutchings, I., Measurement of coating durability by solid particle erosion Surface and Coatings Technology. Vol. 71, 1995, pp. 1 – 8.
91. Spencer, R.Y. 2009. Identificación del proceso de enfriamiento del mineral en el proceso CARON, con ayuda de Redes Neuronales Artificiales Góngora, E. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa.



92. Sotto, Y. 2007. Influencia de los elementos mecánicos del enfriador horizontal en el proceso de transferencia de calor del mineral reducido en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Góngora, E. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa.
93. Sverdlik G. I. Gregoreu G. G. Peculiaridades del paso del movimiento de materiales en un tambor rotatorio a un régimen de cataratas. Revista Ts.M. 1979. No.1. p 9-12.
94. Subramanyan, D K; et al. Austenitic Manganese Steel. ASTM. Specialty Steel and Heat Resistant Alloys. ASTM Handbook. USA. 1999. p 822-840.
95. Tabera, Y; R. 2006. Estudio del comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor en el proceso de enfriamiento del mineral laterítico a escala piloto. Góngora, E; Retirado, Y. Tesis de grado. ISMM. Moa. 61p.
96. Tylczak, J., Abrasive wear in ASM Handbook, Vol. 18 Friction, Lubrication and Wear Technology, printed in USA, 1992, p. 942.
97. Torres, E. Influencia del Cr y el Ni en las propiedades mecánicas y funcionales de los depósitos de soldadura de acero austenítico al alto manganeso. Tesis en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Universidad de Matanzas "Martha Abreu". 2002.
98. Torres, P. Revisión comentada acerca del estado del arte de la investigación sobre eficacia escolar en Iberoamérica. Caso Cuba. En: La investigación sobre eficacia escolar en Iberoamérica. Editorial Carrera 7ª Ltda. Bogotá. (2003).
99. Valle, M. 2000a. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa (1). Tecnología Química Vol. XX, No. 1, pp. 70-77.
100. Valle, M. 2000b. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa (2). Tecnología Química Vol. XX, No. 2, pp. 10-15.
101. Varela, A. Presentación de Metalurgia Física II. Acero Hadfield. Octubre de 2003. Disponible en el World Wide Web. <http://www.metallography.com/bboard/forum.html>
102. Varela, A. García, A. Artiaga, R. Mier, J. L. Barbadillo, F. Comportamiento tribológico de un acero austenítico al manganeso usado en revestimientos de molinos de carbón. En: VIII Congreso Español de Propiedades Mecánicas de Sólidos. La Coruña, España. 2002. p 375 – 383.



103. Vaughan, R.; Ball, A., *Hard Mater.* 2 (3 – 4) 1991 257 – 269.
104. Verdeja, L y González R. El desgaste de materiales en el crisol de horno alto: Conceptos generales. *Revista de minas.* Madrid, 1996. Volumen (13 y 14) 16
105. Wada, S.; Ritter, J., *Erosion of Ceramic Materials* 71 Trans Tech Publications, Zurich, 1992.
106. Wang, J., Effect of Martensite and Austenite on Grinding Media Wear, *Wear* 122, 1998, págs. 285 - 299.
107. Westerberg, A., A Review of Process Synthesis, en *Computer Applications to Chemical Engineering*, R.G. Squires and G.V. Reklaitis (eds), ACS Symposium Series, 1980.
108. Wiederhorn, S.; Lawn, R., Strength Degradation of Glass Impacted with Sharp Particles: I, Annealed Surfaces. *Journal of the American Ceramic Society.* Vol. 62, 1979, pp. 66 – 70.
109. Wirojanupatump, P., Abrasion of mild steel in wet and dry conditions with the rubber and steel wheel abrasion apparatus, *Wear* 239 (2000) 91 – 101.
110. Xiaodong, D. Guodong, S. Yifei, W. Jianfeng, W. Haoyu, Y. 2009: Abrasion Behavior of High Manganese Steel Under Low Impact Energy and Corrosive Conditions. *Advances in Tribology.* 2009 (685648): 1 – 5.
111. Zum-Gahr, K., Formation of Wear Debris by the Abrasion of Ductile Metals, *Wear* 74, 1982, pp 353 – 373.
112. 2011. Tribología. [en línea]<<http://en.wikipedia.org/wiki/Tribometer>>. [consulta: 12 marzo 2011]
113. 2011. Tribometer. [en línea]<<http://es.wikipedia.org/wiki/Tribolog%C3%ADa>>. [consulta: 20 febrero 2011]
114. 2011. Wear. [en línea]<<http://en.wikipedia.org/wiki/Wear>>. [consulta: 12 marzo 2011]
115. 2011. Mangalloy. [en línea]<<http://en.wikipedia.org/wiki/Mangalloy>>. [consulta: 20 febrero 2011]



Listado de símbolos

E1 -	probeta 1 de la entrada del enfriador de mineral
E2 -	probeta 2 de la entrada del enfriador de mineral
E3 -	probeta 3 de la entrada del enfriador de mineral
M1 -	probeta 1 del medio del enfriador de mineral
M2 -	probeta 2 del medio del enfriador de mineral
M3 -	probeta 3 del medio del enfriador de mineral
S1 -	probeta 1 de la salida del enfriador de mineral
S2 -	probeta 2 de la salida del enfriador de mineral
S3 -	probeta 3 de la salida del enfriador de mineral
N_c -	potencia de corte, kW
P_z -	presión, MPa
V_c -	velocidad de corte
b -	ancho de fresado, mm
P -	presión específica, MPa
S_z -	avance por diente, mm/diente
V_c -	velocidad de corte, m/min
D_f -	diámetro de la fresadora, mm
n -	frecuencia de rotación, rev/min
N_h -	potencia del husillo, kW
N_{mot} -	potencia del motor, kW
η -	rendimiento del motor
T_m -	tiempo de corte; min
L -	longitud de maquinado, mm
S_m -	avance por minuto de la herramienta o pieza, mm/min
i -	número de pasadas
l -	longitud de la pieza, mm
y -	camino de la entrada, mm
Δ -	camino libre de la herramienta, mm



t	profundidad de corte, mm
\bar{d}	diámetro medio, mm
d_1, d_2, d_3, d_4	diagonales de la huella, μm
P	peso, kgf
\overline{VHN}	microdureza promedio, N
n	cantidad de huellas realizadas
A_n	área nominal de contacto, mm
l	longitud de la probeta, mm
b	ancho de la probeta, mm
D	valor de dureza en escala Mohs
VHN	valor de dureza en escala Vickers, HV
k	coeficiente de desgaste
H_a	dureza del abrasivo, N
H_g	dureza del material desgastado, N
P_n	presión nominal de contacto, N
F_n	fuerza nominal, kgf
m	masa pérdida de la probeta, kg
m_i	masa inicial de la probeta, kg
m_f	masa final de la probeta, kg
h	espesor desgastado del material, mm
h_i	espesor inicial de la cara desgastada, mm
h_f	espesor final de la cara desgastada, mm
W_h	desgaste lineal, mm.
S_f	recorrido de fricción, mm
HB	dureza Brinell del material desgastado, N
I_h	intensidad del desgaste lineal
W_g	desgaste gravimétrico, kg
I_g	intensidad de desgaste gravimétrico, kg/mm



W_v -	desgaste volumétrico, mm^3
I_v -	intensidad del desgaste volumétrico
D_p -	grado de penetración del abrasivo, mm
R -	radio de la aspereza del abrasivo, mm
HV -	dureza Vickers de la probeta
σ -	desviación estándar
y_i -	valor de la observación
\bar{y} -	media aritmética
n -	número de observaciones



Publicación relacionada con el tema, realizada por el autor

Paumier Y. Alcántara, D.; Fernández, T.; Rodríguez, I., Comportamiento microestructural del acero AISI 1340 en el cilindro del enfriador de mineral laterítico. *Revista Geología Minería*. 29 (1) 77 – 86, 2013.

Evento en el que presentó los resultados en los últimos años

Caracterización microestructural del material de los enfriadores de mineral de la Empresa "Cde. Ernesto Che Guevara". CINAREM´2011. Noviembre 2011.

ANEXOS



Anexo 1. Diagonales obtenidos del ensayo de microdureza para una carga de 50 g aplicada a las probetas.

Probeta	Huella	d ₁ (µm)	d ₂ (µm)	d ₃ (µm)	d ₄ (µm)
E1	1	3,86	4,35	3,69	4,44
	2	3,81	4,54	3,85	4,58
	3	3,96	4,65	4,33	4,87
E2	1	3,80	4,53	3,78	4,47
	2	3,67	4,37	3,30	3,98
	3	3,35	3,95	3,44	4,11
E3	1	3,00	3,75	3,25	3,92
	2	3,67	4,34	3,45	4,03
	3	3,05	3,85	3,05	3,76
M1	1	3,97	4,87	4,12	5,12
	2	4,25	5,30	4,30	5,20
	3	4,49	5,55	4,34	5,20
M2	1	4,46	5,45	4,37	5,36
	2	4,35	5,35	4,35	5,24
	3	4,36	5,24	4,29	5,17
M3	1	4,33	5,27	4,31	5,19
	2	4,37	5,23	4,45	5,41
	3	4,34	5,39	4,32	5,17
S1	1	4,37	5,44	4,29	5,18
	2	4,36	5,21	4,34	5,25
	3	4,31	5,26	4,21	5,24
S2	1	4,42	5,36	4,30	5,26
	2	4,37	5,37	4,45	5,38
	3	4,31	5,20	4,26	5,19
S3	1	4,33	5,44	4,34	5,25
	2	4,27	5,16	4,29	5,20
	3	4,57	5,50	4,55	5,51



Anexo 2. Masa de las probetas a la entrada del enfriador después del ensayo de desgaste.

Tiempo (min)	Masa (g)	Pérdida de masa (g)	Pérdida de masa acumulada (g)
E1			
0	21, 6274	----	----
2	21, 5496	0, 0778	0, 0778
4	21, 5092	0, 0404	0, 1182
6	21, 4678	0, 0414	0, 1596
8	21, 4250	0, 0428	0, 2024
10	21, 3955	0, 0295	0, 2319
12	21, 3478	0, 0477	0, 2796
E2			
0	18, 4423	----	----
2	18, 3694	0, 0729	0, 0729
4	18, 3252	0, 0442	0, 1171
6	18, 2738	0, 0514	0, 1685
8	18, 2351	0, 0387	0, 2072
10	18, 1877	0, 0474	0, 2546
12	18, 1473	0, 0404	0, 2950
E3			
0	19, 0969	----	----
2	19, 0165	0, 0804	0, 0804
4	18, 9653	0, 0512	0, 1316
6	18, 9333	0, 0320	0, 1636
8	18, 8710	0, 0623	0, 2259
10	18, 8392	0, 0318	0, 2577
12	18, 7867	0, 0525	0, 3102



Anexo 3. Masa de las probetas del centro del enfriador después del ensayo de desgaste.

Tiempo (min)	Masa (g)	Pérdida de masa (g)	Pérdida de masa acumulada (g)
M1			
0	14,4778	----	----
2	14,1988	0,2790	0,2790
4	13,9554	0,2435	0,5225
6	13,8048	0,1506	0,6731
8	13,6662	0,1386	0,8117
10	13,6200	0,0462	0,8579
12	13,5905	0,0295	0,8874
M2			
0	15,5104	----	----
2	15,0734	0,4370	0,4370
4	15,0168	0,0566	0,4936
6	14,9058	0,1110	0,6046
8	14,6688	0,2370	0,8416
10	14,6412	0,0276	0,8692
12	14,5982	0,0430	0,9122
M3			
0	14,7756	----	----
2	14,5056	0,2700	0,2700
4	14,4288	0,0768	0,3468
6	14,3130	0,1158	0,4626
8	14,2713	0,0417	0,5043
10	14,1167	0,1546	0,6589
12	13,9031	0,2136	0,8725



Anexo 4. Masa de las probetas a la salida del enfriador después del ensayo de desgaste.

Tiempo (min)	Masa (g)	Pérdida de masa (g)	Pérdida de masa acumulada (g)
S1			
0	21, 5830	----	----
2	21, 2595	0, 3235	0, 3235
4	20, 9115	0, 3480	0, 6715
6	20, 8423	0, 0692	0, 7407
8	20, 7679	0, 0744	0, 8151
10	20, 7156	0, 0524	0, 8675
12	20, 6128	0, 1028	0, 9703
S2			
0	21, 2644	----	----
2	20, 7989	0, 4655	0, 4655
4	20, 7540	0, 0449	0, 5104
6	20, 6249	0, 1292	0, 6396
8	20, 5850	0, 0399	0, 6795
10	20, 4475	0, 1375	0, 8170
12	20, 3994	0, 0481	0, 8651
S3			
0	22, 2602	----	----
2	22, 0338	0, 2264	0, 2264
4	21, 8838	0, 1500	0, 3764
6	21, 7788	0, 1050	0, 4814
8	21, 7238	0, 0551	0, 5365
10	21, 6313	0, 0925	0, 6289
12	21, 4513	0, 1800	0, 8089



Anexo 5. Dimensiones de las probetas de la entrada del enfriador antes y después del ensayo de desgaste.

Tiempo (min)	Espesor (mm)	Cambio de espesor (mm)	Cambio de espesor acumulado (mm)
E1			
0	14,00	----	----
2	13,79	0,21	0,21
4	13,60	0,19	0,40
6	13,49	0,11	0,51
8	13,38	0,11	0,62
10	13,19	0,19	0,81
12	13,09	0,10	0,91
E2			
0	12,90	----	----
2	12,67	0,23	0,23
4	12,48	0,19	0,42
6	12,33	0,15	0,57
8	12,22	0,11	0,68
10	12,05	0,17	0,85
12	11,93	0,12	0,97
E3			
0	14,70	----	----
2	14,50	0,20	0,20
4	14,26	0,24	0,44
6	14,04	0,22	0,66
8	13,87	0,17	0,83
10	13,75	0,12	0,95
12	13,63	0,12	1,07

Anexo 6. Dimensiones de las probetas del centro del enfriador antes y después del ensayo.

Tiempo (min)	Espesor (mm)	Cambio de espesor (mm)	Cambio de espesor acumulado (mm)
M1			
0	12,70	----	----
2	12,55	0,15	0,15
4	12,45	0,10	0,25
6	12,27	0,18	0,43
8	12,06	0,21	0,64
10	11,94	0,12	0,76
12	11,73	0,21	0,97
M2			
0	13,30	----	----
2	13,09	0,21	0,21
4	12,90	0,19	0,40
6	12,66	0,24	0,64
8	12,50	0,16	0,80
10	12,39	0,11	0,91
12	12,20	0,19	1,10
M3			
0	12,90	----	----
2	12,72	0,18	0,18
4	12,47	0,25	0,43
6	12,33	0,14	0,57
8	12,20	0,13	0,70
10	12,03	0,17	0,87
12	11,84	0,19	1,06



Anexo 7. Dimensiones de las probetas de la salida del enfriador antes y después del ensayo.

Tiempo (min)	Espesor (mm)	Cambio de espesor (mm)	Cambio de espesor acumulado (mm)
S1			
0	11, 50	----	----
2	11, 50	0	0
4	11, 40	0, 10	0, 10
6	11, 40	0	0, 10
8	11, 30	0, 10	0, 20
10	11, 29	0, 01	0, 21
12	11, 28	0, 01	0, 22
S2			
0	11, 50	----	----
2	11, 40	0, 10	0, 10
4	11, 40	0	0, 10
6	11, 30	0, 10	0, 20
8	11, 20	0, 10	0, 30
10	11, 18	0, 02	0, 32
12	11, 16	0, 02	0, 34
S3			
0	11, 40	----	----
2	11, 30	0, 10	0, 10
4	11, 22	0, 08	0, 18
6	11, 14	0, 08	0, 26
8	11, 08	0, 06	0, 32
10	11, 06	0, 02	0, 34
12	11, 04	0, 02	0, 36



Anexo 8. Tabla 3.9: Resultados de los cálculos de desgaste.

Probeta	W_h (mm)	I_h	W_g (kg)	I_g (kg/mm)	W_v (mm ³)	I_v	k	D_p
E1	0, 22	0, 000045	0, 00028	$5,82 \cdot 10^{-8}$	55, 35	0, 000045	11, 83	0, 053
E2	0, 34	0, 000063	0, 00030	$5,44 \cdot 10^{-8}$	73, 47	0, 000063	12, 84	0, 056
E3	0, 36	0, 000065	0, 00031	$5,59 \cdot 10^{-8}$	81, 82	0, 000065	13, 38	0, 057
M1	0, 97	0, 000220	0, 00089	$2,02 \cdot 10^{-7}$	244, 21	0, 000220	25, 97	0, 079
M2	1, 10	0, 000200	0, 00091	$1,64 \cdot 10^{-7}$	275, 38	0, 000200	24, 55	0, 077
M3	1, 06	0, 000190	0, 00087	$1,57 \cdot 10^{-7}$	261, 90	0, 000190	23, 92	0, 076
S1	0, 91	0, 000260	0, 00097	$2,81 \cdot 10^{-7}$	179, 12	0, 000260	25, 13	0, 078
S2	0, 97	0, 000240	0, 00087	$2,12 \cdot 10^{-7}$	207	0, 000240	24, 86	0, 078
S3	1, 07	0, 000290	0, 00081	$2,18 \cdot 10^{-7}$	208, 19	0, 000290	25, 27	0, 078