

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

Trabajo de Diploma

En opción al Título de Ingeniero Metalúrgico

*Título: Caracterización microestructural del material del cilindro
rotatorio del enfriador de mineral de la Empresa Comandante
Ernesto Che Guevara.*

Autor: Wilson Jovanny Echeverría Revelo

Tutora: Ing. Yunaydi Paumier Castañeda

Moa /2009

“Año del 50 Aniversario del Triunfo de la Revolución”



Declaración de Autoridad:

Yo: Wilson Jovanny Echeverría

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

Wilson Jovanny Echeverría

Ing. Yunaydi Paumier Castañeda



Pensamientos:

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

Che.

..... ¡Porque todos tenemos algo de indio!

Ama Killa .

Ama Llilla ..

Ama Shua ...

Movimiento Indígena.



Dedicatoria:

Dedico este trabajo a la obra de la Revolución Cubana que ha hecho posible que tantos jóvenes como yo hayan tenido la oportunidad de formarse como profesionales y como hombres de bien.

A mis padres Bolívar y Bilma, que han sido los máximos inspiradores en mi formación como profesional y como persona.

A mis hermanos Kristhian, Alex y Vivianita que tanto apoyo me han brindado.

A mi adorado hijo Santiago Jovanny para que le sirva de ejemplo en su vida y a mi esposa Jenny por todo el amor y la comprensión que me ha brindado.

A mis compañeros y amigos que han luchado a mi lado todo este tiempo y me han ayudado para alcanzar el éxito.

A mis demás familiares y amistades que con su ayuda me alentaron a continuar mis estudios.



Agradecimientos:

A Dios, por crear mi linda familia y permitirme ser parte de ella y por guiarme siempre por el buen camino.

A mis Padres, que ha puesto todo su amor y dedicación para ayudarme y apoyarme a alcanzar metas difíciles en la vida. Gracias por aconsejarme cada día y guardar para mí el mejor de los caminos a seguir, a mi familia que de una forma u otra lucharon tanto por ver este sueño hecho realidad.

A mi tutora la Ing. Yunaidis Paumier Castañeda., a los profesores del Laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM, de manera especial mi profundo agradecimiento al M.Sc. Tomás Fernández Columbié, así como también al Ing. Yodelkis Delgado, a la Ing. Dayanis Alcántara Borges, al M.Sc. Isnel Rodríguez González, al técnico Ramon Castillo Matos, los cuales han depositado su plena confianza en mí para la realización de este trabajo.

A todos mis profesores del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, en especial al Dr.C. Eulicer Fernández Maresma por su incondicional apoyo.

A mis amigos, compañeros de aula, a la Revolución Cubana y a nuestro invicto Comandante Fidel Castro Ruz, que nos ha dado la oportunidad a los estudiantes extranjeros de formarnos como buenos profesionales para el mañana.

A todos Muchas gracias.



Resumen.

El presente trabajo se realiza con el objetivo de caracterizar la microestructura del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" analizando el comportamiento microestructural del acero Ac - 20 Mn (Ac – 20 r Gost 977 - 77). La metodología empleada para este fin, es el estudio del Método de Elementos Finitos mediante el software COSMOS, 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.

Se analiza el desgaste y la temperatura como dos de las principales causas que provocan el deterioro del material identificando tramos del cilindro del enfriador de mineral para así determinar su microestructura y compararlas entre sí.

Palabras Claves: Enfriador, microestructura, dureza, desgaste.



Abstract.

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 Ac - 20 Mn (Ac – 20 r Gost 977 - 77). The methodology employed for this purpose is the study of the Finite Elements Method by means of the COSMOS 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.

The wear and tear and temperature are analyzed as two of the principal causes of the deterioration of the material, identifying the sections in the cylinder of the mineral cooler in order to determine its microstructure and compare them.

Keys words: cooler, microstructure, hardness, tear.



INDICE

INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	15
1.1 INTRODUCCIÓN	15
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ENFRIADORES DE MINERAL.....	19
1.3 DESGASTE	24
1.4 MATERIALES EMPLEADOS EN ENFRIADORES DE MINERAL	29
1.5 PROPIEDADES FÍSICAS, MECÁNICAS Y FUNCIONALES DEL ACERO AL MANGANESO	30
1.6 GENERALIDADES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	31
1.7 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO I.....	37
2 CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	39
2.1 INTRODUCCIÓN	39
2.2 ANÁLISIS DEL MATERIAL DEL CILINDRO ROTATORIO DE LOS ENFRIADORES DE MINERAL DE LA EMPRESA "COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA"	40
2.3 DISEÑO DEL EXPERIMENTO	43
2.4 MÁQUINAS Y EQUIPOS EMPLEADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN	44
2.5 PREPARACIÓN METALGRÁFICA DE LAS PROBETAS	46
2.6 CORTE DE LA PROBETA	50
2.7 MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA DE LAS PROBETAS.....	52
2.8 ENSAYO DE DUREZA APLICADO A LAS MUESTRAS	53
2.9 PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	57
2.10 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO II	58
3 CAPITULO III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS	60
3.1 INTRODUCCIÓN	60
3.2 ANÁLISIS DE LA ELABORACIÓN MECÁNICA DE LAS PROBETAS	60
3.3 ANÁLISIS DEL DESBASTE Y PULIDO PARA LA OBSERVACIÓN MICROGRÁFICA.....	64
4 VALORACIÓN ECONÓMICA.....	74
4.1 INDICACIONES PARA LA FORMACIÓN DE LOS PRECIOS EN LA CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL MATERIAL (CMM)	74
4.2 VALORACIÓN DEL IMPACTO MEDIO AMBIENTAL	77
CONCLUSIÓN	82



RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXOS	87



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.

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

A pesar de la gran variedad de factores que provocan como consecuencia el deterioro, como por ejemplo las condiciones de trabajo y explotación a que están sometidos los elementos de máquinas. Tienen particular significación en el aumento de la fiabilidad y el alargamiento de la vida útil de los elementos las propiedades mecánicas y tecnológicas que puedan tener dichos elementos.

El proceso de lixiviación carbonato – amoniacal en la fábrica "Comandante Ernesto Che Guevara" se caracteriza por ser un proceso donde el equipamiento tecnológico utilizado se distingue por su sencillez y la utilización de equipos conocidos (hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación). Favoreciendo la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización.



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.

En el Esquema Carbonato Amoniacal existen complejos sistemas que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas, algunos de esos están ubicados en la planta de Hornos de Reducción y son los enfriadores de mineral, quienes juegan un papel esencial dentro del proceso, pues en ellos se debe enfriar el mineral desde la temperatura ($t = 650-700\text{ }^{\circ}\text{C}$) a la salida del horno hasta la temperatura ($t = 200\text{ }^{\circ}\text{C}-250\text{ }^{\circ}\text{C}$) que sale del enfriador para pasar al proceso de Lixiviación y Lavado.

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 de mineral.

Estos enfriadores por su constante trabajo presentan cada cierto tiempo grietas en las terminaciones de los rines guías de los carros agitadores y desgaste en la pared interior del cuerpo por la fricción de los carros.

Se han realizado varios estudios sobre estos equipos de transferencia de calor, pero muy pocos se han centrado en realizar estudios de análisis metalográficos a los materiales con que se los fabrican siendo una variante importante la caracterización microestructural de estos materiales, estableciendo la relación existente entre su composición, estructura y propiedades de los mismos, de ahí la importancia de la presente investigación.

Con lo anteriormente referido, se declara lo siguiente:

Situación Problemática:

Los enfriadores de mineral en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" son utilizados con el fin de enfriar el mineral de níquel reducido proveniente de los hornos de reducción, para la posterior lixiviación, el mineral reducido es



introducido en el enfriador que gira en una piscina de agua transmitiendo a este gran parte del calor que lleva, debido a esto, existe un cambio brusco de temperatura, lo que trae consigo la aparición de grietas, así como el desgaste progresivo en su interior.

Problema:

Insuficiente conocimiento sobre el comportamiento microestructural del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" sometido a cambios bruscos de temperatura.

Objeto de estudio:

Microestructura del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Objetivo general:

Determinar el comportamiento microestructural del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Objetivos Específicos:

Caracterizar la microestructura del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Definir las causas que provocan el deterioro del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral laterítico.

Hipótesis:

Si se caracteriza la microestructura del material de los enfriadores de mineral en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", es posible determinar las causas de la ocurrencia de grietas, así como el desgaste progresivo en su interior.

Campo de acción: Material de los enfriadores de mineral en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Tareas:

Revisión bibliográfica y establecimiento del estado del arte.



Definición y obtención de las muestras.

Evaluación de la microestructura de las muestras tomadas a través de:

Análisis químico.

Microscopía óptica.

Ensayo de dureza.

Ensayo de microdureza.

Simulación en COSMOS.

Análisis y discusión de resultados.

Valoración económica.





CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1 Introducción

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

Establecer los fundamentos teóricos del proceso de enfriamiento del mineral como base para realizar la caracterización microestructural del material del cilindro rotatorio del enfriador en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa.

1.1.1 Trabajos precedentes

Una investigación científica de acuerdo con lo planteado por Aróstegui (1978), en cualquier área del conocimiento debe siempre estar sustentada por una investigación teórica y empírica, de ahí que sea necesario utilizar los métodos que caracterizan a cada una de ellas para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objeto, del planteamiento del problema, la hipótesis, los objetivos, y las tareas.

Para la realización de este trabajo se ha hecho una intensa búsqueda bibliográfica, se han consultado una serie de artículos, revistas y otros materiales, donde hemos podido comprobar que existe muy poco material relacionado con la temática a tratar. Esta búsqueda estuvo dirigida en dos líneas fundamentales como son: la información relacionada con el enfoque teórico - metodológico y los trabajos efectuados en cilindros rotatorios que se han realizado en los últimos años.



Respecto al primer elemento, resulta muy útil la revisión de los trabajos de Mesarovich (1996) que aborda la temática relacionada con la teoría general de los sistemas y la metodología de las investigaciones sistémicas.

Hurtado (1999) y Guzmán (2001) conceptualizan con claridad los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole al investigador su empleo para sustentar teóricamente la investigación. A pesar de que algunos términos y definiciones han evolucionado en el presente, su esencia se mantiene vigente.

Resulta muy importante la revisión de la tesis doctoral de Torres (2003), la cual a pesar de estar encaminada hacia otro tema específico del conocimiento, muestra un correcto diseño de la metodología de la investigación, siendo esta muy necesaria en la realización de este trabajo.

Incropera (2003), abordan 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.

Por su parte Houge (1978) establece los aspectos fundamentales de la transferencia de la materia y las leyes de conservación de la energía.

Con respecto al segundo elemento se han realizado estudios con profundidad de la mecánica de movimiento del material en cilindros rotatorios, Sverdlik y Gregoreu (1979), establecieron las peculiaridades del paso del movimiento de materiales en un tambor rotatorio.

Gran interés le dedican Boateng y Barr (1996), al comportamiento de un flujo granular en el plano transversal de un cilindro rotatorio parcialmente lleno, ellos realizaron un estudio con el objetivo de comprender y probar las capacidades predictivas del comportamiento reológico de materiales en cilindros rotatorios. En este caso fueron analizadas 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 y otros colaboradores (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.

Sai y otros (1992) reportaron 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) propusieron 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 validaron el modelo usando los datos reportados por los autores anteriormente mencionados, esta validación fue basado en una corrida experimental para la velocidad del sólido alimentado así como también para velocidad de rotación e inclinación del cilindro.

Fue de mucho interés el trabajo realizado por Correa (2000), quien realizo 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.

Columbié (2001) estableció el modelo matemático para el control integral del proceso de calcinación del Carbonato Básico de Níquel en el horno tubular rotatorio, quedando este conformado por 9 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que describen el comportamiento dinámico del objeto, determinó la



dirección del proceso definiéndose como criterio de calidad y el mantenimiento del perfil térmico del horno aportando ecuaciones importantes para el análisis de los procesos de transferencia de calor de gran complejidad.

Góngora (2004) realizó la Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento del mineral reducido en cilindros rotatorios de la planta Hornos de Reducción perteneciente a la empresa "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.

Leyva (2006) realizó el rediseño y fabricación del Cooler en la Fábrica René Ramos Latour de Nicaro obteniendo grandes resultados en el ámbito económico para la industria del níquel cubano puesto que desde que fueron nacionalizadas las empresas niquelíferas y comenzó el bloqueo económico por parte de los Estados Unidos, la Fábrica se vio en la necesidad de fabricar estos equipos que solo era proveído por el campo capitalista. Por lo que se 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 permitió obtener un equipo altamente productivo con la calidad exigida por el cliente lográndose cumplir los objetivos planteados para su fabricación.

De todo lo expresado resulta evidente que la consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática en estudio. En su mayoría aborda elementos aislados respecto a la caracterización microestructural en cilindros rotatorios el cual se encuentra poco estudiado desde los puntos de vista aquí tratados. Lo que impone la necesidad de realizar una investigación que contribuya como aporte a la bibliografía para futuros estudios que perciban alcanzar una



mayor eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral reducido, lo cual representará una incursión novedosa en este campo para las industrias cubanas del níquel con tecnología carbonato amoniacal.

1.2 Clasificación de los enfriadores de mineral

En la industria metalúrgica se realizan diversos procesos en los cuales en las materias primas, como resultado de la interacción química, dan lugar a profundas transformaciones acompañadas con el cambio de estado de agregación, de su estructura interna y de la composición de los materiales a lo que forman parte de estos últimos toda una serie de operaciones en dependencia de las leyes básicas que definen la velocidad del proceso, se distinguen las operaciones basadas en la transmisión de calor. A estas operaciones se refieren: el calentamiento, enfriamiento, evaporación y condensación, dentro de las cuales el enfriamiento de materiales cumple un papel importante ya que permite alcanzar regímenes de temperatura adecuados para su posterior tratamiento en la cadena metalúrgica.

Existen una variedad de enfriadores en función del proceso que se esté realizando, entre los cuales se distinguen la industria del cemento, la industria siderurgia y de manera principal la metalurgia no ferrosa.

En la industria del cemento tenemos los Enfriadores de clinker cuyo objetivo principal es enfriar el material que sale del horno. Estos se dividen en rotatorios y de parrillas.

El Enfriador rotatorio es un cilindro de plancha de acero y sus dimensiones (diámetro y largo) están en dependencia de la producción del horno.

Los enfriadores de tipo parrilla consisten en una parrilla inclinada sobre la cual el clinker incandescente que sale del horno es enfriado. Se componen de placas yuxtapuestas animadas de un movimiento de vaivén, obligando al clinker a dirigirse hacia la salida, donde se realiza la molienda mediante el uso del molino de martillos.

En la industria siderurgia como es el caso de la producción del acero tenemos los Enfriadores de los pellets de mineral de hierro, entre los más destacados podemos



citar los de la firma AUMUND utilizados en Venezuela cuyo fin es garantizar la producción de acero de alta calidad.

En la industria del níquel como es el caso del complejo minero Punta Gorda en Cuba. La empresa Comandante Ernesto Che Guevara cuenta con los enfriadores de mineral (coolers) a la salida de la planta de Reducción.

Para la realización de nuestro trabajo comenzaremos por describir las instalaciones donde funcionan estos enfriadores de mineral.

1.2.1 Descripción de la instalación de estudio

Después que el mineral sale de los hornos es transportado por el tambor rotatorio hasta el enfriador, luego es descargado en el enfriador rotatorio, el cual tiene como función enfriar el mineral reducido que sale del horno hasta una temperatura por debajo de 200°C para luego enviarlo al proceso de Lixiviación. Este enfriador está diseñado para enfriar el mineral reducido que contiene Níquel y una parte de hierro oxidado con vapor en el proceso de tratamiento del mineral niquelífero por el método amoniacal en las siguientes condiciones de trabajo (Tabla1).

Tabla 1. Parámetros de trabajo del Enfriador.

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

El material enfriado es un mineral que contiene una granulometría de 200 mesh ($0,074\text{mm}$) 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.

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.

1.2.2 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 figura 1:



Figura. 1 Instalación destinada para el proceso de enfriamiento.

1.2.2.1 Funciones del enfriador

El enfriador de mineral tiene tres funciones: transportar, mezclar y enfriar el mineral.

Transportar: en el interior del enfriador existe una estructura donde se enganchan los rastrillos pendulares que transportan el mineral que se va enfriando.



Mezclar: 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.

Enfriar: es 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. Disminuye la temperatura del mineral de (750 a 200°C) en la descarga.

El mineral llega a través del transportador rotatorio al enfriador, éste está seccionado en tres partes en el cual al caer el mineral es pasado por cada sección del mismo con la ayuda de los carros raspadores y paletas los cuales se encargan también de remover el mineral y raspar la superficie interior del enfriador evitando que el mineral se adhiera e interfiera en el proceso de transferencia o intercambio de calor entre el mineral y el enfriador, cada sección del mismo posee un separador circular en todo el diámetro del equipo que posibilita el tiempo de retención necesario para que el mineral se enfríe adecuadamente.

En el enfriador ocurre el estancamiento del mineral principalmente en los primeros metros del tambor, de 3 a 5 aproximadamente según cálculos de Correa (2000) y lo observado por el personal de mantenimiento de la planta al ser detenido el equipo para su reparación. Este estancamiento de mineral en la parte central de su masa se debe a la existencia de una zona muerta o vana, esta zona provoca una alta resistencia a la transferencia de calor por conducción.

Debido a los grandes volúmenes a manejar en la actualidad, es muy poco probable que los dispositivos mecánicos internos puedan mover al mineral debido a su peso, y actuarán como dispositivos estáticos o aproximadamente estáticos. Teóricamente los carros deberían mantenerse a una altura constante en la cual equilibrará su peso con las fuerzas tendientes a elevarlo, debido a que la masa de mineral no es totalmente homogénea, este en realidad debe oscilar alrededor de la posición de equilibrio.



La posición del dispositivo dependerá de su peso, de la distancia al eje del enfriador, de su geometría, de la velocidad del tambor y de los volúmenes de producción.

Desde el punto de vista termoenergético en este proceso están presentes los tres modos de transmisión del calor (Conducción, Convección y Radiación) y los mismos influyen de la forma siguiente:

El mineral es descargado en el enfriador con una temperatura entre 650 y 700 °C y el mismo transfiere calor a la superficie interior del tambor por conducción, convección y radiación, predominando considerablemente la transferencia de calor por conducción debido al contacto sólido-sólido, en este caso mineral-enfriador, también se transfiere calor por convección debido a la presencia de gases productos de la combustión que acompañan el mineral hasta el interior del cilindro, pero este modo de transmisión del calor puede ser despreciado porque solo se manifiesta cuando se forman burbujas o poros dentro de la masa de mineral, hecho este que no es frecuente en este proceso.

Desde la masa de mineral a la pared superior del equipo se transfiere el calor por radiación debido a la temperatura del mineral en el interior del enfriador. En el espesor del enfriador ($\delta = 16\text{mm}$), o sea de la pared interior a la superficie exterior el flujo de calor se transfiere por conducción; teniendo en cuenta para el posterior análisis que es mayor la influencia de la transferencia de calor por conducción en la parte que está en contacto el mineral con el tambor.

Una vez transferido el flujo de calor hasta la superficie exterior del enfriador, este intercambia calor con el agua de la piscina que se encuentra por encima de 30 °C, dando lugar al calentamiento progresivo de la misma hasta valores entre 70 y 76 °C, este proceso de intercambio de calor ocurre por convección y en el mismo se le comunica velocidad al fluido lo cual provoca la convección forzada.

En la superficie no sumergida del tambor el calor se transfiere al medio ambiente por ebullición y evaporación de la película de agua y para este caso teniendo en cuenta que la variación de la temperatura en los extremos de la superficie de ebullición es de aproximadamente 1 °C se puede considerar con bastante



aproximación que la evaporación de la película de agua ocurre a temperatura constante en el sentido radial del cilindro.

La transferencia de calor por convección entre el enfriador y el medio ambiente es muy pequeña debido a la poca diferencia de temperaturas entre ambos, esto es resultado del efecto primario que tiene la transferencia de calor por conducción, por convección y en menor medida por ebullición. En todos los casos el flujo de calor depende de la variación de la temperatura en el sentido longitudinal del enfriador.

Como se puede apreciar el enfriador de mineral es un objeto de estudio interesante ya que a consecuencia del intercambio de calor al que este se somete trae consigo el fenómeno de desgaste mediante la pérdida gradual de materia de la superficie del cilindro producida involuntariamente por acciones mecánicas, particularmente por el rozamiento y el calor que son causas inmediatas del desgaste y la formación de grietas y al posterior deterioro del material causando una disminución de la producción y su posible parada por mantenimiento. En virtud de estos argumentos el estudio de los enfriadores es objeto de gran interés ya que cuenta con un gran número de parámetros de entrada y de salida los cuales se encuentran en una compleja interdependencia.

1.3 Desgaste

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

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



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

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

1.3.1 Modo de acción de los distintos tipos de desgaste

Existen tres tipos de desgaste, los cuales no suelen presentarse de forma aislada, sino conjuntamente y aún en etapas sucesivas, dependiendo de las condiciones de trabajo a que está sometida la pieza. Govantes, 1986. La acción conjunta de los distintos tipos de desgaste conduce a la destrucción del estado superficial del material o la pieza.

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

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



superficie puede llegar a ser elevado o mantenerse dentro de los límites captados en dependencia de la resistencia del metal a choques térmicos.

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

Ahora bien, si las cargas son importantes con fricción, durante el deslizamiento se produce arrastre y acumulación de material delante de las asperezas, aumentando las áreas de contacto, las microsoldaduras son muy densas y se acumulan esfuerzos crecientes hasta el deterioro total de la superficie, sin regeneración posible, haciendo inservible la pieza. En el caso de sobrecargas y fricción pura, la elevación de la temperatura en la zona de contacto producida por todas estas resistencias mecánicas, alcanza valores que pueden producir transformaciones estructurales deseables o no, y cuyo efecto sobre el desgaste, puede ser importante. Si se logra en el proceso de fricción una estructura de martensita con un 5 -10 % de austenita retenida, el desgaste será pequeño.

Lo anterior puede provocar el efecto de endurecimiento debido a las tensiones normales y tangenciales que se crean, esto se traduce como un aumento de la acritud en las subcapas del material. (Verdeja, 1996). Cuando la deformación alcanza un valor crítico por encima del límite de acritud, el material se rompe por fractura frágil. Durante este proceso las tensiones de cizalladura, producen deslizamiento en el interior de los granos cristalinos o ruptura de los mismos, y crean tensiones de cizalladura que alcanzan un valor máximo en algún punto, apareciendo deformaciones permanentes o fracturas, punto a partir del cual se inicia el fallo del material. Han sido varias las vías utilizadas para combatir el



desgaste abrasivo y frenar las pérdidas que el mismo ocasiona. La resistencia al desgaste se consigue con una alta dureza superficial. (Clauser, 1985).

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

Plantea Caubet, 1971, 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 Bold, 1991, si la dureza del abrasivo es muy superior a la dureza de la superficie fraccionada, el desgaste es fuerte. Si por lo contrario es más blando la velocidad de desgaste es lenta. Se debe tener en cuenta que si la dureza de ambos es similar, el más leve cambio de una de ellas puede aumentar considerablemente el desgaste.

1.3.2 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.

W. N. Kaszezejew y W. M. Glazkow, al investigar el desgaste de los metales en una corriente de granos abrasivos, confirmaron que existe una estrecha relación entre la resistencia al desgaste y las fuerzas de los enlaces en la red cristalina de los metales.

En todos los materiales existen 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.



1.4 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, 1973, 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 °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.

1.5 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 1.1, se puede observar las propiedades química estándar del acero aleado al bajo manganeso.

Tabla 1.1. 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.

1.6 Generalidades del Método de Elementos Finitos

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.

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 ciclos, 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 1.2)



Figura 1.2. 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.

1.6.1 Análisis tenso-deformacional mediante la simulación

Para estudiar el comportamiento de las cualidades superficiales de las piezas tratadas en la Deformación Plástica Superficial por Rodillo son muy útiles las técnicas de diseño de experimentos, permiten darle solución y explicación científica efectiva y económica a los problemas objeto de análisis.

La utilización del diseño de un modelo experimental se fundamenta (Hernández, 1997) entre otros aspectos, en cuatro reglas básicas:

Disminuir el número de corridas experimentales necesarias.

Cambiar el valor de los factores de acuerdo con reglas.

Utilizar en el procesamiento métodos matemáticos normalizados.

Poseer una estrategia de trabajo por etapas.

La gran evolución de los métodos informáticos tanto en su aspecto de hardware como software, ha permitido perfeccionar el estudio de diversos fenómenos.

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 complejos, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

Con la simulación se puede obtener la resolución numérica de las ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno estudiado con el uso de un ordenador. Por lo tanto, se puede asumir que la simulación es tan exacta como tantas sean las ecuaciones de partida y la capacidad de los ordenadores para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización (Ingham y Moreland, 1993).

En lo referido al cálculo estructural, el método de simulación puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos. El principio del método consiste en la reducción del problema con infinitos grados de libertad, en un problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos del objeto.

Las incógnitas dejan de ser funciones matemáticas del problema cuando pasan a ser los valores de dichas funciones en un número infinito de puntos. Así pues, se supone que el comportamiento mecánico de cada parte o elemento en los que se subdivide el objeto, queda definido por un número finito de parámetros asociados a los puntos que en dicho momento se unen al resto de los elementos de su entorno. (Alfaro, 2001).

En el caso específico del análisis tenso-deformacional de elementos sometidos a la acción de cargas dinámicas, el método permite la determinación de los componentes y la determinación del estado deformacional en ciertos puntos característicos. Este tipo de análisis permite acotar la deformación del objeto de estudio y localizar zonas altamente solicitadas o zonas de baja sollicitación.

Esta presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico permite la resolución del problema, donde los coeficientes se calculan automáticamente por el ordenador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento. Sin embargo queda en manos del usuario decir hasta qué punto la discretización utilizada en el modelo representa adecuadamente el modelo de la estructura.



Plantea Alfaro (2001), que un programa de simulación es una pieza compleja de software en la que confluyen numerosas operaciones. Por este motivo suelen estar divididos en subsecciones, cada una de las cuales efectúan una operación determinada. Sin embargo, el tema no se limita al puro cálculo. La preparación de los datos y el análisis de los resultados numéricos que aparecen como producto del cálculo, son tareas arduas que actualmente se tiende e integra a su propio software. Así pues, un paquete de cálculo de simulación consta de un procesador, en el cual se incluyen todas las ayudas a la preparación de los datos y que generan los archivos de resultados, y un postprocesados que facilita el análisis e interpretación de los resultados, generalmente en forma de gráfica mediante trazado de curvas, gráficos tridimensionales, tablas.

1.6.2 Base del Método de los Elemento Finitos

En el cálculo estructural, el método de elementos finitos (MEF) puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos. El principio del método consiste la reducción del problema con infinitos grados de libertad, en un problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos (nodos). Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas del problema cuando, pasan a ser los valores de dichas funciones en un número infinito de puntos. En realidad no se trata de nada nuevo. El cálculo de estructuras se efectúa también restringiendo el análisis corrimientos de los nudos de unión. La diferencia estriba en que el análisis del continuo, la segmentación en elementos y la correcta posición de los modos es, hasta cierto punto, arbitrario.

Así pues en el M.E.F. se supone que el comportamiento mecánico de cada parte o elemento, en los que se subdivide queda definido por un número finito de parámetros (grados de libertad) asociados al los puntos que en dicho momento se une al resto de los elementos de su entorno (modos). Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo, todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los modos a través de una adecuada función de interpolación.



Como puede apreciarse, en el método de los elementos finitos son casi esenciales los conceptos de "discretización" o acción de transformar la realidad de la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado y de "interpolación", o acción de aproximar los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos. Por lo tanto el M.E.F. es aproximado desde múltiples perspectivas y se caracteriza por:

- a) Discretización.
- b) Interpolación.
- c) Utilización de métodos numéricos.

Esta presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico permite la resolución del problema. Los diversos coeficientes del modelo son automáticamente calculados por el ordenador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento. Sin embargo queda en manos del usuario decir hasta qué punto la discretización utilizada en el modelo representa adecuadamente el modelo de la estructura.

1.7 Conclusiones del Capítulo I

Las bibliografías consultadas, aportan información sobre el valor de propiedades físicas, mecánicas y funcionales del acero al manganeso; pero son escasas las referencias a modelos teóricos o experimentales, y en ninguno de ellos se muestran las regularidades del comportamiento de dichas propiedades 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 ya que en su mayoría aborda elementos aislados al tema de estudio.

Según el análisis de la bibliografía se puede concluir que el fenómeno de desgaste es perjudicial para el funcionamiento de una máquina, este desgaste del material del cilindro utilizado en el enfriador del mineral laterítico, está dada por la corrosión, adhesión, abrasión y por la fatiga superficial a la que está sometido el



mismo, a las cargas variables de trabajo, y al trabajo continuo del equipo (fatiga), fenómenos que si se minimizan su efectos, se puede alcanzar una vida útil más prolongada.

El método de elementos finitos aplicado a un sistema mediante un modelo, permite realizar la simulación de un sistema, o parte de dicho sistema, así, mediante la combinación de la computadora digital y software profesionales se ha conformado la simulación digital que es una herramienta poderosa capaz de solucionar sistemas compuestos por numerosas variables, ecuaciones y parámetros de equipos, la aplicación de estas técnicas las podemos desarrollar con programas tales como: ANSYS, COSMOS, MATLAB, entre otros.



2 CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

Los diferentes tipos de aceros poseen diferentes propiedades en dependencia de su composición química y las propiedades que se les hayan atribuido mediante tratamiento térmico u otro tipo de tratado. El material del cilindro del enfriador de mineral, a pesar de poseer cierto desgaste y deformación en correspondencia con lo planteado en el capítulo anterior. A través del empleo de técnicas microestructurales, así como la realización de ensayos de microdureza que permita establecer la relación composición-estructura-propiedades de la aleación y sus efectos sobre la ocurrencia de roturas y el tipo de falla que se manifiesta en los mismos.

En este capítulo se plantea como objetivo:

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 de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

2.1.1 Generalidades del proceso

Para lograr el establecimiento y la aplicabilidad de un procedimiento general, no solo basta con la elección del material y su valoración física, química y estructural. También se requiere tener en cuenta la teoría de la toma de decisiones y el flujo de información asociado a los cálculos ingenieriles y criterios tecnológicos en lo referente al comportamiento microestructural de materiales.

De las conclusiones del capítulo I, se desprende la necesidad de formular e introducir dicho procedimiento con vistas a lograr resultados confiables que estén avalados científicamente, ya que en las bibliografías revisadas no se encontraron métodos de proceder declarados para abordar el estudio y la obtención de la microestructura del material de los enfriadores.



Se establece el diseño del plan experimental y se describen las normas y procedimientos del proceso de experimentación. Al mismo tiempo se fundamentan las propiedades a investigar y se establecen los parámetros que caracterizan el comportamiento microestructural del material del cilindro del enfriador de mineral.

2.2 Análisis del material del cilindro rotatorio de los enfriadores de mineral de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"

Para los experimentos realizados se utilizó un acero de un contenido medio de carbono, el acero al manganeso Ac - 20 Mn (Ac – 20 r Gost 977 - 77) que es el componente principal del material de los enfriadores de mineral, puede ser rectificado y tratado térmicamente.

El análisis químico se realizó empleando un Espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón en el Laboratorio del Taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel, Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche", Moa.

Tabla. 2.1. Composición química del acero Ac - 20 Mn

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Al %	Co %	Cu %
0.25	0.48	1.26	0.026	0.025	0.05	0.02	0.02	0.023	0.01	0.07
Ti %	V %	W %	Pb %	Sn %	As %	Ce %	B %	Zn %	Fe %	
0.0743	0.01	0.02	0.002	0.01	0.008	<0.005	<0.0010	0.004	97.69	

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

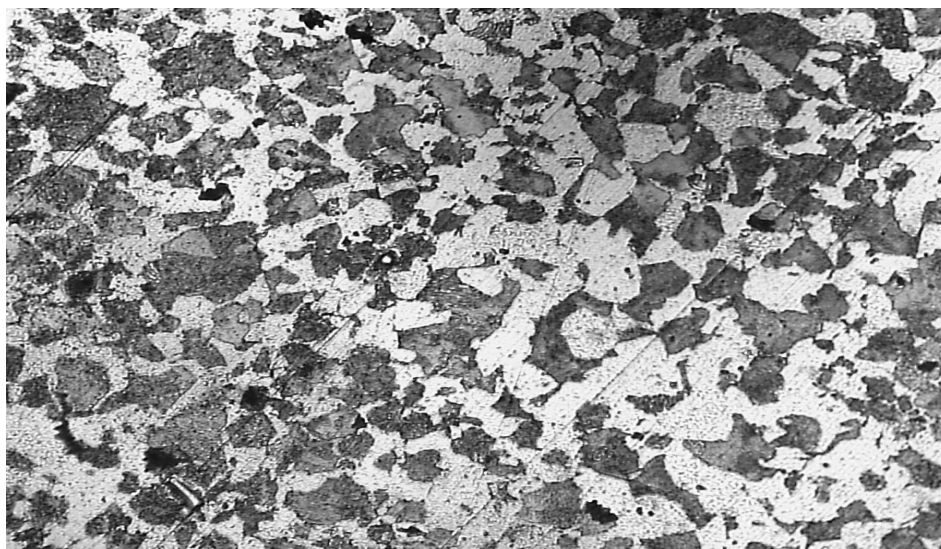


Figura 2.1. Estructura metalográfica ferrito-perlítica del acero AISI 1340 (100X)

2.2.1 Análisis microestructural

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100 (Figura 2.1.1) ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, este está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas.

Las Especificaciones técnicas del microscopio se resumen en la tabla 2.1.2.

Tabla 2.1.2. Parámetros de funcionamiento del microscopio metalúrgico invertido.

Sistema óptico	Sistema óptico infinito
Tubo de mirada	Tubo trinocular libre de compensación inclinado a 30, distancia intrapupilar: 48-75mm.
Relación de división	20% para una mirada binocular y 80% para mirada de video y fotomicrografía.
Mirada ocular:	Punto alto, mirada ocular de campo extra ancho con (100X/20).
Objetivo:	Plan acromático objetivo: 4,10X,80X.
Foco:	Foco coaxial, rustico y fino, movimiento grosero de ataque: 37,7 mm refracción.
Por rotación, trazo	0,2mm



fino.	
Escenario	Área: 100-250 mm.
Regla mecánica:	: x/y control coaxial a la derecha, rango de movimiento: 120 (ancho) X 78 (longitud) mm.
Kohler:	Lámpara halógena: 6V30N, intensidad continuamente ajustable.
Filtro:	Azul, Amarillo, verde y violeta.

En la figura 2.1.1, se observa la imagen del microscopio empleado en la observación de las muestras.



Figura 2.1.1. Microscopio Óptico NOVEL modelo NIM-100.

2.2.2 Análisis de fase por el diagrama hierro carbono

Para facilitar la comprensión de todas las transformaciones que se producen en los cristales de hierro técnico se emplea el diagrama hierro-carbono (Figura 2.2.), el cual permite determinar las transformaciones de fases del hierro en dependencia de la temperatura de tratamiento al que es sometido.

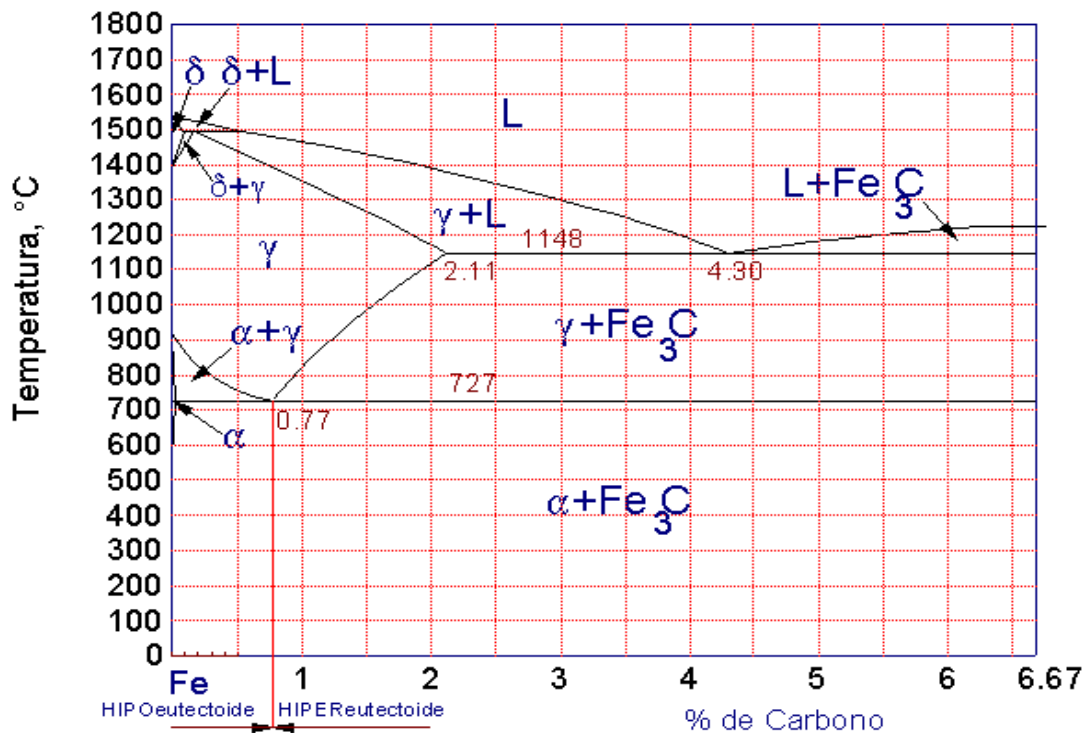


Figura 2. 2. Diagrama hierro-carbono.

La adición de elementos de aleación al hierro influye en las temperaturas a que se producen las transformaciones alotrópicas. Entre estos elementos, el más importante es el carbono.

El diagrama hierro carbono, aún cuando teóricamente representa unas condiciones de metaestables, se puede considerar que condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lentas representa cambios de equilibrio.

2.3 Diseño del experimento

2.3.1 Propuesta del modelo del diseño experimental

Para confirmar la hipótesis científica iniciaremos por la toma de muestras, las cuales se obtuvieron del cilindro rotatorio de los enfriadores de mineral de la empresa Cdte. Ernesto Che Guevara (Figura 2.3.).

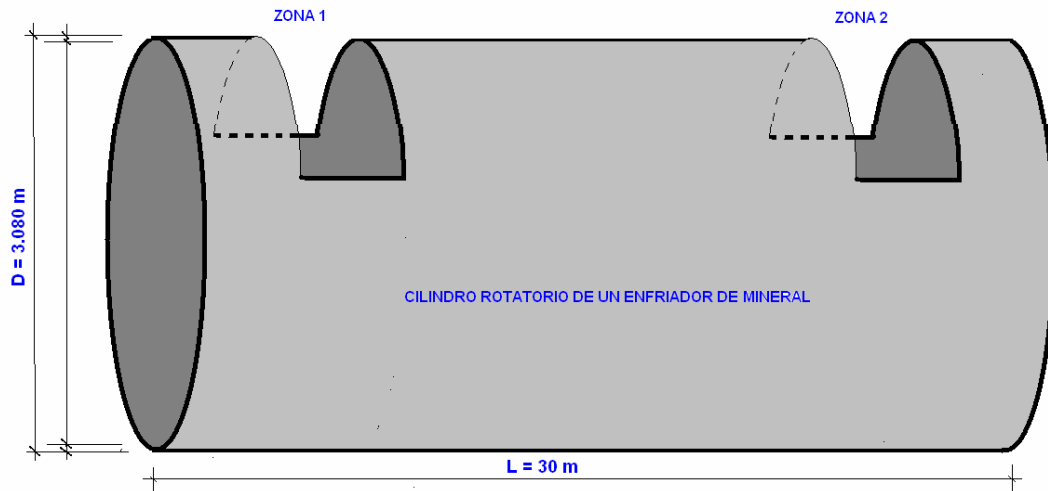


Figura 2.3. Esquema representativo de la toma de muestras en el cilindro rotatorio de los enfriadores de mineral.

Se realizaron dos cortes en la sección del cilindro, uno en el tramo de entrada del enfriador y otro en el tramo de salida del enfriador, la obtención de los mismos se realizó a través del proceso de oxicorte. Las dimensiones de las muestras obtenidas son: L = 300 mm X 300 mm. Según la Norma ASTM E 92.

Al obtener las muestras con estas dimensiones, se previó las altas temperaturas que genera el proceso, tratando en todo lo posible afectaciones secundarias producto de la transferencia del calor hacia la zona objeto de estudio (centro de las muestras).

2.4 Máquinas y equipos empleados en la experimentación

2.4.1 Herramienta de corte

Para seleccionar la herramienta de corte se debe tener presente la magnitud del trabajo a realizar, tipo de trabajo, así como las características de la pieza a elaborar (laminada, fundida, forjada), profundidad de corte, velocidad de corte, avance. Estos parámetros relacionados definirán los ángulos principales de la fresa a emplear.

Parámetros geométricos de la fresa

Diámetro de la fresa: $D_f = 70 \text{ mm}$

$\alpha = 15^\circ$

Número de dientes: $Z = 40$ mm

2.4.2 Características de la fresadora

Es una máquina-herramienta donde el movimiento de corte, que es circular, corresponde a la herramienta Fresadora, estas máquinas poseen su movimiento principal en la herramienta. En la figura 2.4 se detallan las características principales de la fresadora 6 H 12 Γ.

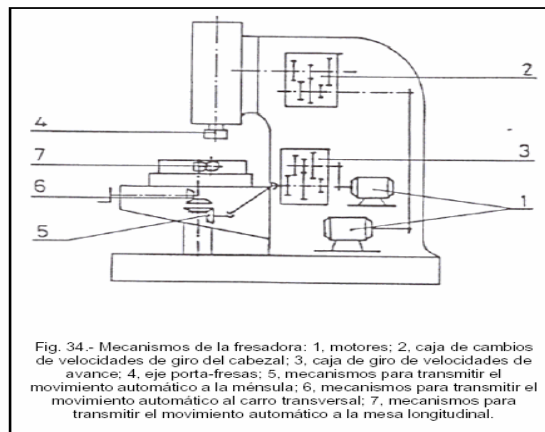
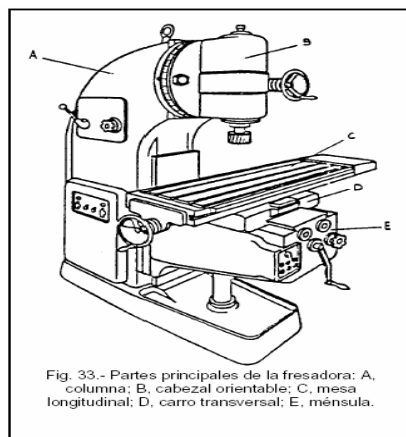


Figura II.4. Representación de la fresadora 6 H 12 Γ

La pieza, que posee el movimiento de avance, se puede desplazar en varios sentidos, siguiendo diversas trayectorias, lo que le permite obtener piezas de las más variadas formas geométricas, como:

- ✓ Piezas poliprismáticas.
- ✓ Piezas ranuradas y taladradas.
- ✓ Ruedas dentadas.
- ✓ Levas helicoidales y espiroidales.

La fresadora, como máquina-herramienta, se compone de:

❖ Órganos másicos:

- ✓ Caja de cambios de velocidades de giro del husillo.
- ✓ Cabezal



❖ **Mecanismos:**

- ✓ Caja de cambios de velocidades de avance de la mesa.
- ✓ Carro portamesa.
- ✓ La ménsula Motor.
- ✓ Bancada.
- ✓ Ménsula.
- ✓ Eje de transmisión de avances.

2.4.2.1 Características principales de la fresadora

Fresadora vertical modelo.		6 M 12 Γ
Superficie útil de mesa.		320 x 1250 mm.
Potencia del motor.		Nm = 7 kW.
Rendimiento de la fresadora.		$\eta = 0,8$.
Frecuencia de rotación del husillo (r/min).		100
Avances longitudinales y transversales de la mesa(mm/rev) :25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250.		
Avances verticales de la mesa (mm/min): 8; 10,5; 13,3; 16,6; 21; 26,6; 33,3; 41,6; 53,3; 66,6; 83,3; 105; 133,3; 166,6; 210; 266,6; 333,3; 400.		

2.5 Preparación metalográfica de las probetas

2.5.1 Generalidades

La metalografía microscópica estudia las características estructurales y de constitución de los productos metalúrgicos con la ayuda del microscopio metalográfico, para relacionarlos con sus propiedades físicas y mecánicas. La parte más importante de la metalografía es el examen microscópico de una probeta pulida y atacada empleando aumentos que, con el microscopio óptico, oscilan entre 100 y 2000X.

El examen microscópico proporcionan información sobre la constitución del metal o aleación, pudiéndose determinar características tales como forma, tamaño y



distribución de granos, inclusiones y microestructura metalográfica en general. 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, reventar un acero templado o en general, originar una estructura superficial distorsionada que no guarda ninguna relación con la superficie representativa y características del metal.

Las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma NC 10-56:86 y ASTM E3-95.

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

2.5.1.1 Selección de la muestra

La localización de la parte que ha de ser examinada es de gran importancia, ya que ha de lograrse una probeta representativa del material a examinar. Las probetas seleccionadas deben ser características del metal estudiado y servir para el fin a que se dirige tal estudio seleccionando adecuadamente la región de la zona que pueda dar el máximo de información para realizar con éxito el estudio propuesto.

El tamaño adecuado de la probeta debe ser tal que pueda sostenerse con la mano durante su preparación.

2.5.1.2 Corte de la probeta

Puede realizarse con seguetas, cortadora de cinta o disco abrasivo, oxiacetileno, teniendo la precaución de evitar el calentamiento que puede ocasionar alteraciones estructurales.



2.5.1.3 Montaje de la probeta

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

2.5.1.4 Desbaste

Es la operación siguiente al corte y al montaje de la probeta y se efectúa en una debastadora de cinta rotativa o sobre papeles abrasivos de diferentes grados, colocados sobre discos giratorios.

Al pasar de un abrasivo a otro, debe girarse la probeta 90 grados y desbastar hasta que se borren por completo las huellas del abrasivo anterior, teniendo siempre el cuidado de lavar la probeta con agua abundante. Se aconseja pasar la probeta por toda la serie de abrasivos: 150, 220, 280, 320, 400, 500, y 600, pues eliminar algún abrasivo retarda la operación en vez de acelerarla.

Una presión excesiva sobre el papel abrasivo puede causar rayas profundas y difíciles de eliminar posteriormente, además se provoca una distorsión intensa sobre el metal de la superficie, alterando el aspecto de la estructura. Esta distorsión no se puede evitar completamente pero puede reducirse mediante técnicas adecuadas de desbaste y pulido.

Conviene emplear un papel abrasivo nuevo para cada probeta, los papeles usados se emplean para finalidades específicas porque sus partículas abrasivas desgastadas tienden a producir distorsión del metal superficial.

También debe tenerse en cuenta que la superficie opuesta de la probeta debe ser paralela para facilitar el soporte en el microscopio.

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

➤ Características de la máquina de pulir



Voltaje:250 V

Corriente:2.5 Amp

Número de revoluciones:300-1000 rev/min

Potencia del motor:5 HP

2.5.1.5 Pulido

Tiene por objeto, eliminar las rayas finas producidas en la última operación de desbaste y conseguir una superficie sin rayas y con alto pulimento a espejo.

El éxito del pulido y el tiempo empleado en la operación, depende en gran parte del cuidado con que se haya realizado el desbaste. Si una probeta tiene rayas profundas que no se han eliminado en las últimas operaciones de desbaste, no podrán ser eliminadas durante el pulido con pérdida de tiempo y trabajo.

La forma de realizar el pulido es, apoyando la cara desbastada de la probeta sobre un paño embebido con una suspensión del abrasivo y fijado a un disco que gira accionado por un motor.

Como paños pueden emplearse el paño de billar, el raso, la seda, el terciopelo, y otros que corresponden a nombres comerciales como Selvit, Gamal, Kansas, Microcloth. Como abrasivo puede usarse una suspensión acuosa de alúmina, óxido de cromo, óxido de hierro, óxido de magnesio, o para materiales muy duros una suspensión de polvo de diamante en aceite mineral. El tamaño de la partícula abrasiva en suspensión oscila entre 100 y algunas décimas de micrón.

La presión a aplicar sobre la probeta, depende de la dureza de la aleación y debe disminuirse a medida que avanza el pulido, deberá ser tal que se logre hacer desaparecer en unos pocos minutos las rayas del último papel abrasivo (600) cuidando de no excederse en la presión por el peligro de desgarramiento del paño.

Debe lavarse la probeta en un chorro de agua caliente, secar con ayuda de un secador, sin tocar la cara pulida, enjuagarla con alcohol y secarla finalmente con aire seco o caliente. Observar en el microscopio a 100 aumentos; si persisten las rayas provenientes del desbaste en el último papel abrasivo, continuar con el



pulido en la forma ya descrita todo el tiempo que sea necesario para que estas desaparezcan.

La combinación adecuada de estas variables, permitirá alcanzar un adecuado pulido, aunque difícilmente se logre evitar algo de distorsión; para eliminar esta última no queda otro recurso que el de ataque y pulido alternados.

2.5.1.6 Observación microscópica

Permite reconocer la presencia de inclusiones no metálicas como sulfuros, silicatos, aluminatos, óxidos, microporosidades, microgrietas, y grafito.

Antes de atacar la probeta debe desengrasarse con alcohol y secarse con aire frío o caliente.

2.5.1.7 Ataque

Para el ataque, se toma la probeta con la pinza y se sumerge con la cara pulida hacia abajo en el reactivo de ataque contenido en el cristizador. Se extrae, se lava con alcohol, se seca y se observa al microscopio, se registra el campo observado a diferentes aumentos. Se vuelve a pulir y se repite la operación descrita anteriormente manteniendo sucesivamente la probeta sumergida durante 2, 10, 20, 40, y 80 segundos, registrando el campo observado después de cada ataque. Mediante el ataque es posible poner de manifiesto el tamaño, forma y distribución del grano (fases o microconstituyentes), las heterogeneidades en la estructura y las segregaciones.

2.6 Corte de la probeta

➤ Parámetros para el cálculo

Diámetro de la fresa.	.	.	.	.	.	Df = 70 mm
Número de dientes.	.	.	.	.	.	Z = 40 mm
Sigma de rotura del acero.	.	.	.	.	.	$\sigma_r = 65 \text{ kgf/mm}^2$
Velocidad de la herramienta.	.	.	.	.	.	100 rev/min
Durabilidad de la fresa.	.	.	.	.	.	T = 180 min

Esesor de la pieza.	.	.	.	.	.	h =18 mm
Ancho de la fresa.	.	.	.	.	.	B = 4 mm
Avance longitudinal.	.	.	.	.	.	Sm = 63 rmm/rev

Determinacion de la velocidad de corte

Se define como velocidad de corte la velocidad lineal de la periferia de una herramienta acoplada a una máquina herramienta o la velocidad lineal del diámetro mayor que esté en contacto con la herramienta en la pieza que se esté mecanizando en una máquina herramienta. Su elección viene determinada por el material de la herramienta, el tipo de material a mecanizar y las características de la máquina. Una alta velocidad de corte permite realizar el mecanizado en menos tiempo, pero acelera el desgaste de la herramienta.

La velocidad de corte se expresa en m/min. La velocidad adecuada de corte depende de varios factores y en ningún caso se debe superar la que aconsejan los fabricantes de las herramientas. Casillas, 1987

$$V_c = \frac{\pi D f n}{1000}; \quad (2.1)$$

donde:

Vc: Velocidad de corte; m/min;

D: Diámetro de la fresa; mm;

N: Número de revolución; rev/min;

1 000: Factor de conversión de metro a milímetro.

Potencia de Corte efectiva

Es la potencia necesaria para realizar la operación en la máquina seleccionada, la potencia de corte no debe superar la potencia del husillo de la máquina.

$$N_c = \frac{PZV_c}{6120}; \quad (2.2)$$

donde:



➤ **Para el tramo de la salida del enfriador:**

Muestra 1:

1ec –Para el centro de la probeta.

1eb –Para el borde de la probeta.

Muestra 3:

3 ec –Para el centro de la probeta.

3 eb –Para el borde de la probeta.

Muestra 2:

2 ec –Para el centro de la probeta.

2 eb –Para el borde de la probeta.

Considerando que la validación de las normas y procedimientos y el nivel de acreditación de los laboratorios y equipamiento que se utilizaron para desarrollar las mediciones que permitan alcanzar una alta precisión con muy pocas posibilidades de que se introdujeran errores sistemáticos, se decidió utilizar las cinco muestras seleccionadas garantizando la confiabilidad de los resultados.

Paralelamente antes de la realización del proceso tecnológico, se realizara un control previo de dureza y microdureza a las probetas de análisis.

2.8 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.

2.8.1 Método de dureza

El método elegido para realizar el ensayo fue por Dureza Rockwell en un Durometro modelo SOELAN. B. URSS -198. El mismo en el que se calcula la dureza en base a la profundidad de penetración y la carga total no se aplica en forma continua. Hay una carga inicial y otra adicional (varía según las condiciones de ensayo).

El valor se obtiene en directa del dial del indicador. La dureza está dada por el incremento de penetración debido a la acción de la carga adicional y una vez suprimida ésta. En la figura 2.5 se muestra el durómetro empleado en la medición de la dureza HRB.



Figura 2.5. Durómetro Brinell (Laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM Moa.)

2.8.2 Características del ensayo

En la superficie del metal ensayado se hace penetrar una pirámide de diamante con el ángulo igual a 120° o una bola templada de acero de 1.59 mm de diámetro.

La bola y la pirámide se hunden en la probeta ensayada aplicando consecutivamente la carga preliminar F_0 y la básica F_1 . La carga total es:

$$F = F_0 + F_1$$

La carga preliminar F_0 es igual, en todos los casos, a 98 N, mientras que la básica F_1 y la total F constituyen:

- Durante la indentación de la bola de acero (escala B)
- Durante la indentación del prisma de diamante (escala A)

Nota: (Por la escala A se miden materiales muy duros, así como probetas finas).

La dureza Rockwell se expresa en unidades convencionales, en dependencia de las condiciones de ensayo ésta se designa HRA, HRB (en correspondencia con la denominación de la escala). La dureza se determina por la profundidad de la huella h . El ensayo se efectúa fácil y rápidamente en un tiempo (de 30 a 60 s). El valor de la dureza de Brinell y Vickers se determinara por medio de tablas especiales.

Para determinar la dureza de Rockwell con bola (HRB) utilizamos el penetrador de bola de acero de 1,588 mm aplicado una carga de 98 N obteniéndose 3 lecturas



de medida de puntos seleccionados aleatoriamente en la superficie de las probetas (Tabla 2.2):

Tabla 2.2. Resultados del ensayo de Dureza Rockwell (HRB).

PARAMETROS:	Carga (N) F = 98 N	Tiempo (s) T = 15 s	
Dureza Rockwell :	HRB ₁	HRB ₂	HRB ₃
Muestra 1 Entrada.	HRB _{BS}	HRB _{BC}	HRB _{Bi}
Muestra 2 Entrada.	HRB _{BS}	HRB _{BC}	HRB _{Bi}
Muestra 1 Salida.	HRB _{BS}	HRB _{BC}	HRB _{Bi}
Muestra 2 Salida.	HRB _{BS}	HRB _{BC}	HRB _{Bi}
Muestra 3 Salida.	HRB _{BS}	HRB _{BC}	HRB _{Bi}

Para determinar la dureza de Brinell (HB) y la dureza de Vickers (HV) utilizamos la tabla de conversión directa modelo UTP Schneissmaterial GmbH SCo.kg. Para lo cual utilizamos el valor obtenido del ensayo de dureza Rockwell (HRB)= 90 reflejando los siguientes valores para las otras escalas:

Para la Dureza de Brinell: HB = 190.

Para la Dureza de Vickers: HV = 181.

2.8.3 Ensayo de microdureza aplicado a las muestras

El ensayo de microdureza se aplica para la determinación de la dureza de volúmenes microscópicamente pequeños de metal. La microdureza se determina en aparato especial que consta de un mecanismo de carga con punta de diamante y de un microscopio metalográfico. Para el ensayo se utilizó un microscopio modelo: PMT-3 N0168 (MADE IN URSS) diseñado por Jrashev y E.S. Berkovich (1952), del Laboratorio de microscopia de menas del ISMM Moa (Figura II.6). La superficie de la probeta se prepara de la misma manera que para el análisis



microestructural (desbaste y pulido). El número de dureza H se determina por el tamaño de las huellas igualmente que la dureza Vickers.

Para calcular la microdureza (VHN) se utilizara la formula:

$$VHN = 1.58 * \frac{P}{d^2} \left[\frac{kgf}{mm^2} \right] \quad (2.5)$$

donde:

1.58: Constante;

P: peso (kg).

Diámetro medio: $\bar{d}$ (mm)

$$\bar{d} = \frac{(d_1 + d_2) + (d_3 + d_4)}{2} \quad (2.5.1.)$$

Microdureza promedio: $\overline{VHN}$

$$\overline{VHN} = \frac{VHN_1 + VHN_2}{2} \left[\frac{kgf}{mm^2} \right] \quad (2.5.2)$$



Figura.2.6. Microscopio utilizado para el ensayo de microdureza.

Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de analisis se realizó dos ensayos, el primero para una carga de 10 g y el segundo para una carga de 20 g, donde se midió los diámetros de la huella de la punta de diamante penetrada en



un tiempo de 15 segundos, las medidas se tomaron para dos puntos de prueba seleccionados aleatoriamente en la superficie de las probetas.

2.8.3.1 Determinación de la microdureza VNH de las probetas

De acuerdo a la ecuación 2.5 del epígrafe 2.7.3 CAPII, para el primer ensayo se obtienen los siguientes resultados (Tabla 2.3). Para el segundo ensayo de microdureza, se mantuvieron los mismos parámetros del primer ensayo salvo un cambio en el valor de la carga el cual fue de 20 g. Los resultados de los ensayos de microdureza aparecen reflejados en los anexos 1, 2 del presente trabajo.

2.9 Procedimiento para la modelación por Método de Elementos Finitos

Al objeto de determinar las tensiones generadas en las barras de acero 45 a diferentes diámetros se realizan cálculos mediante simulación numérica por elementos finitos. Para ello se ha utilizado el paquete de software ANSYS V.10. El modelo empleado considera el contacto con fricción entre una barra de sección circular y un rodillo considerando el área de contacto del mismo en forma de esfera de radio ($R = 2 \text{ mm}$). 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 x_1, x_2, x_3 , de la misma manera los desplazamientos pueden ser denotados como u, v, w ó u_1, u_2, u_3 . Por ello es posible definir x_i como las coordenadas y u_i 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.

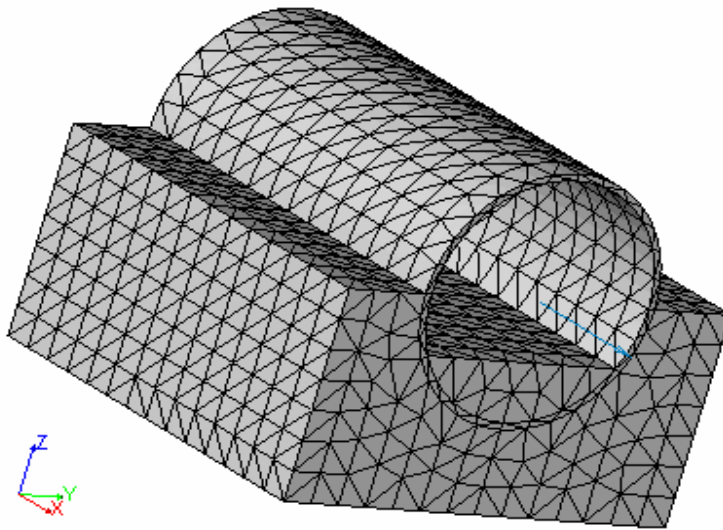


Figura 2.5 .comportamiento del mallado para las condiciones de trabajo.

2.10 Conclusiones del capítulo II

- ❖ Se ha fundamentado las propiedades a investigar a partir de la necesidad de la descripción y caracterización del objeto de estudio para definir sus principales regularidades a través del empleo de métodos científicos de investigación estructurados metodológicamente con un enfoque dialéctico, sistémico y controlado que posibilitan la ejecución ordenada del proceso investigativo.
- ❖ La realización de los ensayos anteriormente señalados permite obtener una información detallada acerca de la composición química, la dureza, microdureza, así como también permite establecer el comportamiento microestructural del material analizado.
- ❖ El estudio de la modelación por el método de Elementos Finitos mediante la simulación en el COSMOS 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.



- ❖ Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental, tecnologías y equipamiento que garantizan la precisión y fiabilidad de los resultados.



3 CAPITULO III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

En este capítulo se exponen los resultados derivados del trabajo experimental, y a partir de los mismos, se describe el comportamiento microestructural del acero Ac - 20 Mn (Ac - 20 r Gost 977 - 77), en las condiciones descritas en los experimentos. Así como se revela a partir del análisis metalográfico, obtenidos.

El objetivo del capítulo es:

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

3.2 Análisis de la elaboración mecánica de las probetas

3.2.1 Corte

El corte de las probetas se llevo a cabo con una fresadora vertical modelo 6 H 12 Γ a una longitud de 15mm X15 mm, con abundante refrigeración, con el objetivo de lograr una superficie con la menor cantidad posible de rugosidad. Todo esto tomando en cuenta que el acero 20 Γ es un material de buena maquinabilidad y permite un buen acabado superficial.

➤ **Calculo de la Velocidad de corte**

A partir de $n_r = 100$ rev/min y $D_f = 70$ mm, ambos valores prefijados por las características del material a maquinar y la ecuacion 2.1 se tiene que:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_f \cdot n}{1000};$$

$$V_c = \frac{3,14 \cdot 70 \cdot 100}{1000}$$

$$V_c = 21,98 \text{ m/min}$$

La velocidad obtenida permite establecer un periodo de vida más prolongado de la herramienta y ahorrar recursos materiales ya que es en función del número de revoluciones en el que se puede alcanzar la efectividad del corte.

3.2.2 Análisis de la potencia de corte

Potencia necesaria que requiere o necesita la máquina herramienta para vencer las fuerzas que se oponen en las operaciones a realizar. Sustituyendo en 2.2

$$N_c = \frac{PZ.V_c}{6120}$$

$$N_c = \frac{36.21,98}{6120}$$

$$N_c = \frac{791,28}{6120}$$

$$N_c = 0,13 \text{ kW}$$

- Avance por dientes. (S_z)

Se prefija entre 0,18 – 0,22 mm/diente, generalmente se adopta $S_z = 0,2$ mm/diente.

- La fuerza de corte que se ejerce en la pieza (P_z) se determina por la formula:

$$P_z = P \cdot F \quad (a)$$

donde:

P: presión específica;

F: área.

$$F = a.b \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (b)$$

donde:

$$a = 0.9 \cdot Sz \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (c)$$

b= ancho de fresado



a. = 0,9.Sz (Nota: El avance por diente de la maquina: Sz oscila de 0,18-0,22)

Para el cálculo se tomo como Sz = 0,2

Así, de acuerdo con (c) tenemos:

a. = 0,18

Por lo tanto remplazando en (b):

$$F = 0,72\text{mm}^2$$

Por lo tanto remplazando este valor en (a) tenemos:

$$Pz = 36 \text{ KgF/mm}^2$$

➤ Potencia del husillo. Sustituyendo en 2.3

$$N_h = N_{mot} \cdot \eta$$

$$N_h = 7.0, 8$$

$$N_h = 5,6 \text{ kW}$$

➤ Tiempo de muestra.

$$T_m = \frac{L}{n \cdot S} \cdot i \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1a)$$

$$L = l + y + \Delta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2a)$$

$$y = \sqrt{t(\Delta - 3)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3a)$$

donde:

l: largo de la pieza que se trabaja;

y: es la magnitud (el camino) de la entrada (mm);

Δ : magnitud de la salida o carrera libre de la herramienta.

De (2a) se tiene que:

$$L = (15 + 0 + 3)$$

$$L = 18 \text{ mm}$$



A partir de $\Delta = 3$ por la ecuación (3a) se tiene que: $y = 0$

Remplazando valores en (1a) tenemos:

$$T_m = \frac{18}{63} \cdot 5 = (1,14.5)$$

$$T_m = 5,7 \approx 6 \text{ min}$$

➤ Tiempo de corte en la plancha:

Para obtener el tiempo que se emplea durante la operación de cilindrado exterior y sustituyendo en la ecuación 2,4, se obtiene que:

$$T_m = \frac{L}{n \cdot s} \cdot i \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1b)$$

$$L = l + y + \Delta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2b)$$

$$y = \sqrt{l(\Delta - 3)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3b)$$

De (2b) se tiene que

$$L = (30 + 0 + 3)$$

$$L = 33 \text{ mm}$$

A partir de $\Delta = 3$ por la ecuación (3b) se tiene que: $y = 0$

Remplazando valores en (1b) tenemos:

$$T_m = 1,04 \text{ min}$$

➤ El tiempo auxiliar empleado es = 30 min.

➤ El tiempo total es: 37 min.

En la Figura III.1 se observa la dimensión de las probetas utilizadas para el análisis metalográfico, estas se prepararon según la norma ASTM E 3-95.

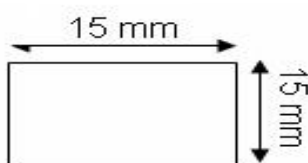




Figura III.1 Esquema de las probetas del experimento.

La velocidad de corte o el camino a recorrer por el filo de la cuchilla respecto a la superficie maquinada de la pieza en unidad de tiempo es de 21,98 m/min, la potencia de corte es de 0,13kW, y la potencia del husillo es de 5,6 kW, esto permite establecer que se puede realizar en una sola pasada en un tiempo de 6 min.

3.3 Análisis del desbaste y pulido para la observación micrográfica

Teniendo en cuenta las características de las probetas en cuanto al espesor de las mismas, el montaje en un dispositivo de fibra previamente maquinado, con el objetivo de lograr la mayor uniformidad posible el desbaste y pulido.

En el desbaste primeramente se obtuvo una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de la maquina pulidora y papeles abrasivos del tipo No. 180, 400 y 600 (ISO 9001), variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina, montando la lija sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90^0 al pasar de un pliegue a otro que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior. Al concluir de pasar el papel abrasivo mas fino se realizó la operación conocida como pulido fino, en el que se empleó la pasta abrasiva conocida comercialmente como "Pasta GOI" añadida sobre discos provistos de paños o motas, hasta que se logre una superficie pulida.

Por último las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL (Ubicada en el laboratorio de Ciencia de los materiales del ISMM), para lograr el acabado final, en ella se utilizó un paño de fieltro grueso usado como sustancia abrasiva de óxido de cromo.

3.3.1 Análisis del lavado y del desgrasado

Una vez pulida las probetas se lavaron con agua destilada, y secada con papel de filtro y finalmente se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono eliminando todo vestigio de grasa y pastas de pulir.



3.3.2 Análisis del ataque químico

Se realizó con el objetivo de resaltar la estructura metalográfica del acero Ac - 20 Mn (Ac – 20 r Gost 977 - 77), (Según ASTM E-262-Practice A). Para este ataque químico se utilizó Ácido nítrico según la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Descripción y composición del reactivo de ataque.

Reactivos de ataque para examen microscópico			
Reactivo de ataque	Composición		Usos
Ácido Nítrico (Nital)	Ácido Nítrico	5cc	Aceros y hierros
	Alcohol etílico	95 cc	

Se empleó como reactivo de ataque el Ácido Nítrico porque este resalta los diversos constituyentes estructurales y el contorno de los granos del acero Ac - 20 Mn (Ac – 20 r Gost 977 - 77), y 1340, según AISI-ASTM, pone en manifiesto las uniones de los granos de ferrita, la perlita se ennegrece y la cementita se mantiene blanca.

3.3.3 Análisis por el Método de Elementos Finitos

Para analizar el caso específico del análisis tenso-deformacional del material del cilindro del enfriador de mineral sometido a la acción de cargas dinámicas (altas temperaturas y desgaste abrasivo), se empleó el Software COSMOS, este método permitió la determinación de los componentes y del estado deformacional en ciertos puntos característicos. Este tipo de análisis permite acotar la deformación del objeto de estudio y localizar zonas altamente solicitadas o zonas de baja sollicitación.

En la figura 3.2 se observa el comportamiento del material en correspondencia con la temperatura.

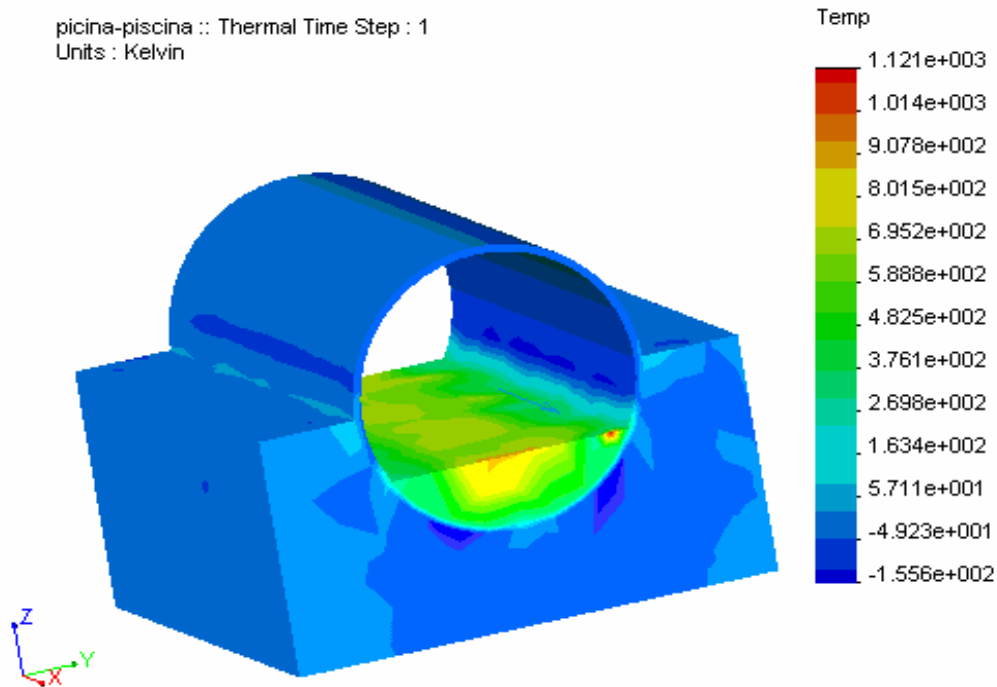


Figura 3.2. Comportamiento del material en relación con la temperatura

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 transferencia de calor, teniendo en cuenta las transformaciones alotrópicas del hierro y 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.

Se realizó la simulación teniendo en cuenta el flujo de temperatura, con el objetivo de evaluar la misma en toda la sección del cilindro del enfriador. La figura 3.3 representa el comportamiento durante este proceso.

picina-piscina :: Thermal Time Step : 2
Units : W/m^2

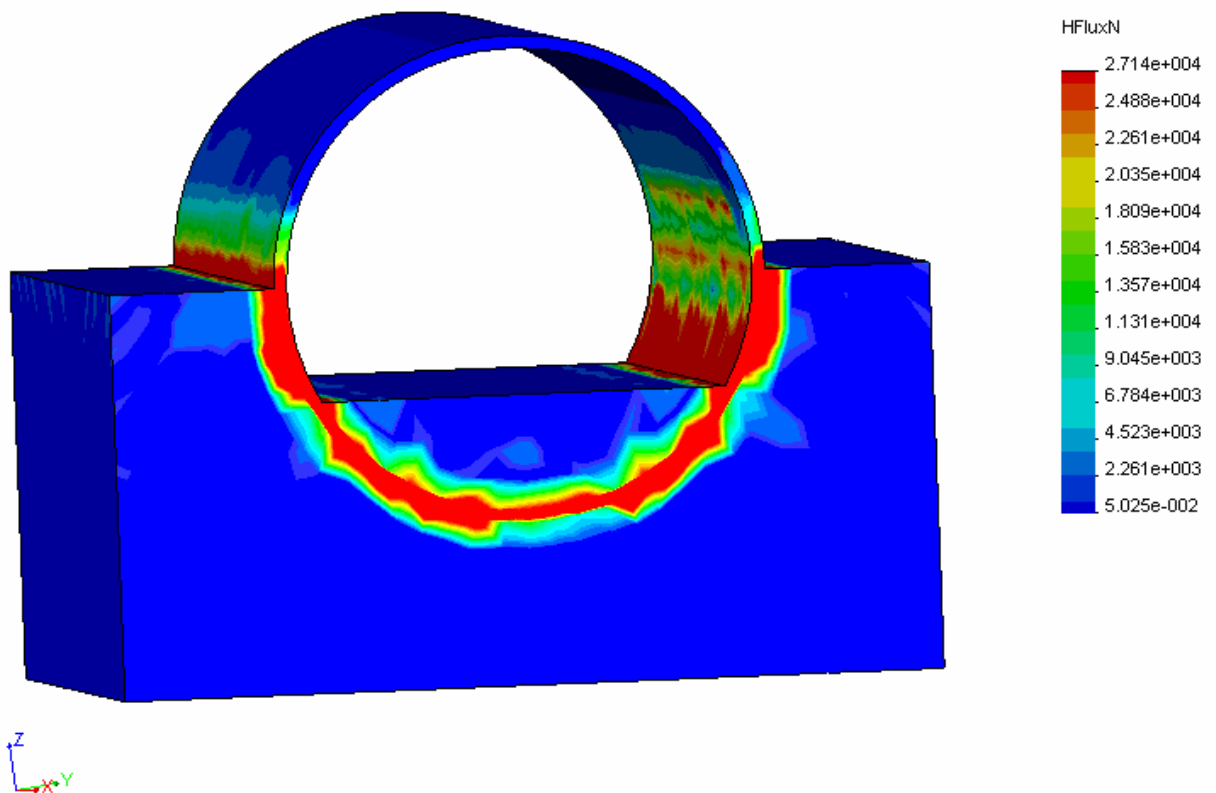


Figura 3.3 Comportamiento del flujo de calor en el material del cilindro.

Se observa una distribución de tensiones en el área media del cilindro, esto está dado porque el llenado del mismo por el material ocupa aproximadamente un 9 % de su área, al no haber mineral laterítico en esta sección la temperatura por el concepto de la disipación del calor se distribuye hacia las paredes menos ocupadas en el equipo.

Se analiza el material teniendo en cuenta el gradiente de temperatura, en la figura 3.3 se observa la distribución de la misma en la sección de la entrada del cilindro.

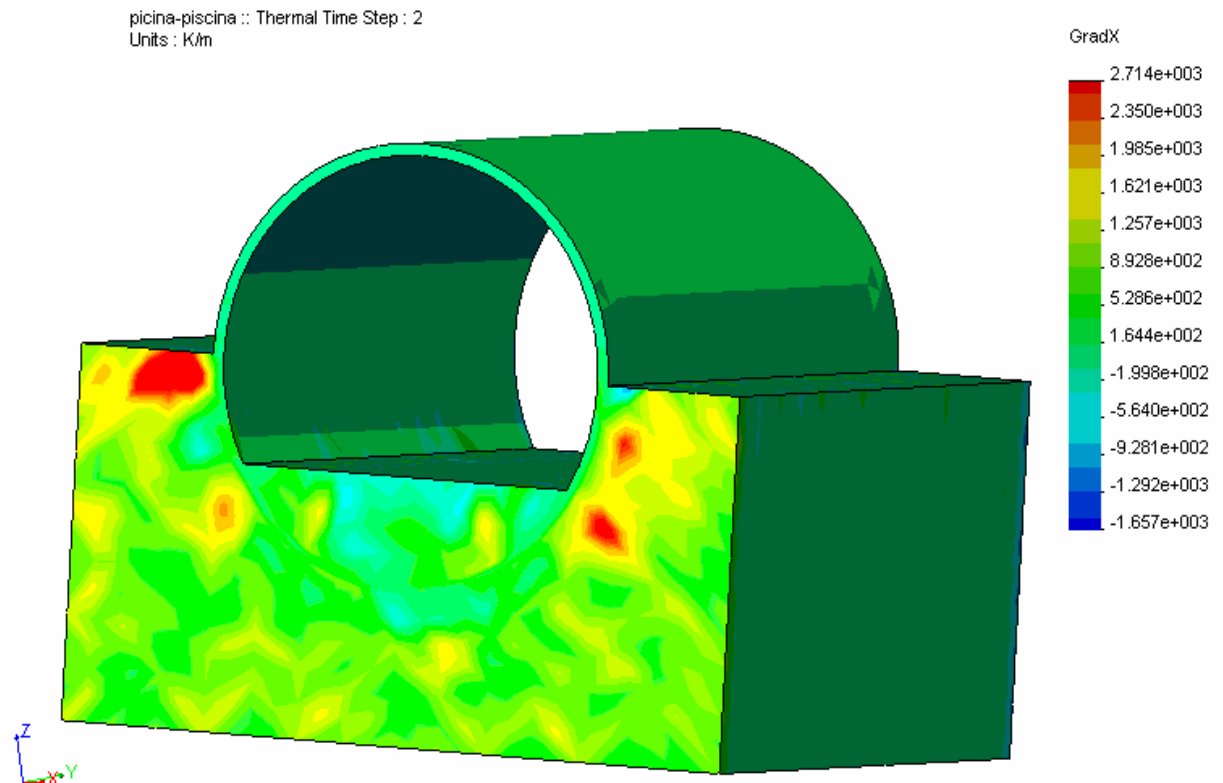


Figura 3.4 Comportamiento del gradiente en el eje X (K/m) en el material del cilindro.

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 250 °C

3.3.4 Observación con microscopia óptica

Para la observación se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100 (Inverted metallurgical microscope), ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, este está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. La observación se realiza empleando distintas combinaciones de objetivo y ocular para obtener las imágenes más precisas.

Para colocar las probetas en el microscopio se montaron en un dispositivo con plastilina que permitió una nivelación adecuada de estas.

El análisis metalográfico consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en probetas de acero Ac - 20 Mn (Ac - 20 r Gost 977 - 77), y 1340 según AISI-ASTM.

Fueron observadas las probetas en el centro, y en los bordes, de acuerdo con el diseño de observación expuesto en el capítulo anterior en el epígrafe 2.7, con rangos de aumento de 100X y 300X para cada probeta.

Se toma como base de comparación para el comportamiento del material de estudio la muestra determinada en el Espectrómetro, epígrafe 2.2.1 del capítulo II.

Se analizara el comportamiento de las probetas en correspondencia con el diseño de experimento propuesto. En las figuras 3.2 y 3.3 se pueden observar las muestras de las microestructuras del borde y centro de la probeta a la entrada del enfriador.

➤ **Muestra de las probetas a la entrada del enfriador**

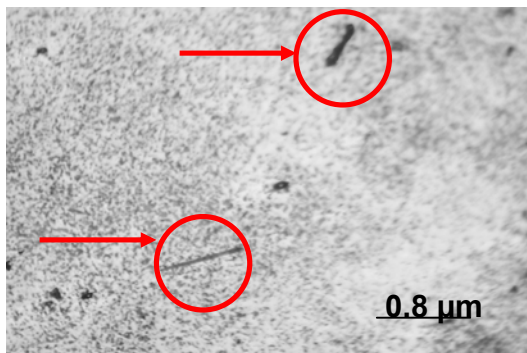


Figura 3.4 Muestra del borde de la probeta
a 800 X (muestra 1 Eb)

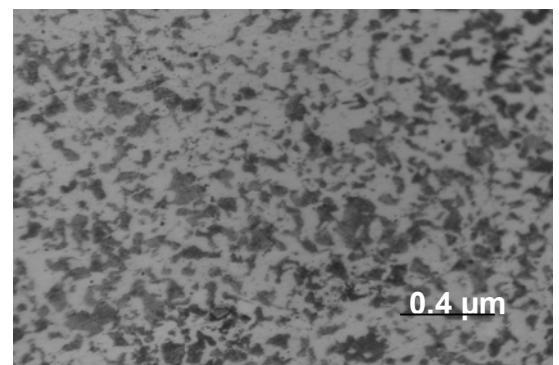


Figura 3.5 Muestra del centro de la probeta
a 400 X (muestra 1 Ec)

A partir del análisis de la simulación, teniendo en cuenta la temperatura de entrada como factor fundamental, se pudo observar que este influye grandemente en los cambios estructurales del material, en el epígrafe 2.2. del capítulo II se tiene en cuenta una muestra patrón del material del cilindro sin tratamiento, donde se observan los granos de perlita y ferrita de un tamaño mayor, en la muestra 1Eb del borde de la probeta los granos son más pequeños esto está motivado por la presencia de las altas temperaturas y producto de la fricción del mineral, demostrando que existen temperaturas por encima de 727 °C, casi una estructura

martensítica, típica de estos aceros después de ser sometidos a un tratamiento térmico, además también se puede observar que en la misma hay presencia de inclusiones metálicas, típica de la presencia del desgaste abrasivo. En la figura 1Ec del centro de la probeta se observa que los cambios en la estructura son menores, puede estar motivado por el espesor del material (16 mm), el cual minimiza la incidencia de la misma sobre el material.

➤ **Muestra de las probetas a la salida del enfriador**

Se valoró la incidencia del material a la salida del enfriador del mineral para evaluar el comportamiento microestructural del mismo y si la temperatura tenía mayor incidencia en este punto. En las figuras 3.6 y 3.7 se puede observar la microestructura del material.

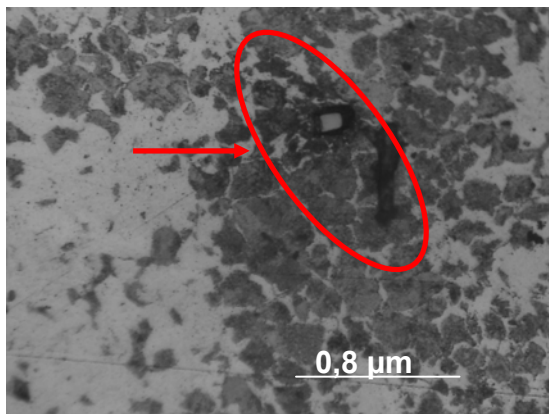


Figura 3.6 Muestra del borde de la probeta
a 800 X (muestra 2 Sb)

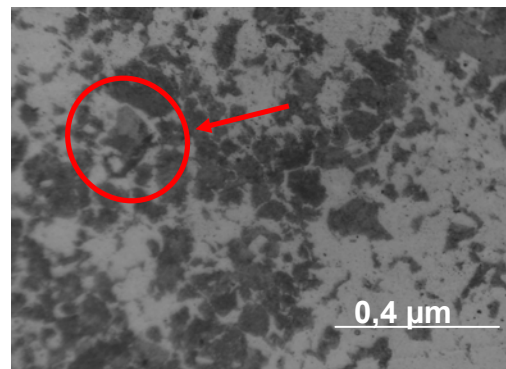


Figura 3.7 Muestra del centro de la probeta
a 400 X (muestra 1 Sb)

En las figuras de la salida, se pudo observar poco cambios en la estructura del material, este conserva prácticamente la misma disposición en la red cristalina, los granos han mantenido su tamaño, la temperatura ha afectado muy poco este comportamiento, sin embargo, se denota en que ambas muestras presentan afectaciones de incrustaciones metálicas, típicas del desgaste abrasivo.

3.3.5 Análisis de los ensayos de dureza y microdureza

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos del comportamiento microestructural, las muestras fueron sometidas a dos tipos de ensayos, las muestras de la entrada



del enfriador por presentar cambios microestructurales se comprobaron por método de dureza HVN, donde los resultados aparecen reflejados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados de los ensayos de microdureza en las muestras de entrada para 10 kg de carga, en el centro y borde de las mismas.

Muestra 1 Entrada.	VHN _{1B}	195	VHN _{2C}	132
Muestra 2 Entrada.	VHN _{1B}	268	VHN _{1C}	267
Muestra 1 Salida.	VHN _{1B}	80	VHN _{1C}	65
Muestra 2 Salida.	VHN _{1B}	68	VHN _{1C}	68
Muestra 3 Salida.	VHN _{1B}	70	VHN _{1C}	92

Se comprobó también la microdureza, pero con cargas de 20 kg, en la tabla 3.3, se recogen los valores del tipo de ensayo.

Tabla 3.3. Ensayo de microdureza para 20 kg.

Muestra 1 Entrada.	VHN _{1B}	236	VHN _{2C}	289
Muestra 2 Entrada.	VHN _{1B}	289	VHN _{1C}	269
Muestra 1 Salida.	VHN _{1B}	114	VHN _{1C}	94
Muestra 2 Salida.	VHN _{1B}	82	VHN _{1C}	109
Muestra 3 Salida.	VHN _{1B}	102	VHN _{1C}	82

En las mediciones efectuados para diferentes cargas, el análisis de las microdurezas, según comprobaciones, se determina que las muestras de la entrada examinada presentan dureza elevada, corroborándose una vez más que el material del cilindro producto a las altas temperaturas y al desgaste por fricción han endurecido, ha existido un tratamiento térmico 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.

Las muestras también fueron sometidas a ensayos de dureza Rockwell B (HRB) y se determinó también por este método la correspondencia de las durezas del ensayo efectuado por el método HVN. En la tabla 3.4 se plasman los resultados del ensayo de dureza por el método HRB.

Tabla. 3.4. Resultados obtenidos en el método de dureza HRB.

Parámetros:	Carga (N) F = 98 N	Tiempo (s) T = 15 s	
Dureza Rockwell	HRB ₁	HRB ₂	HRB ₃
Muestra 1 Entrada	92	90	90
Muestra 2 Entrada	94	92	92
Muestra 1 Salida	65	63	65
Muestra 2 Salida	64	64	64
Muestra 3 Salida	65	63	65

Se graficó el comportamiento de las durezas HVN, para cargas de 10 kg y 20 kg, los resultados de ambos gráficos aparecen se observan en las figuras 3.8 y 3.9 respectivamente.

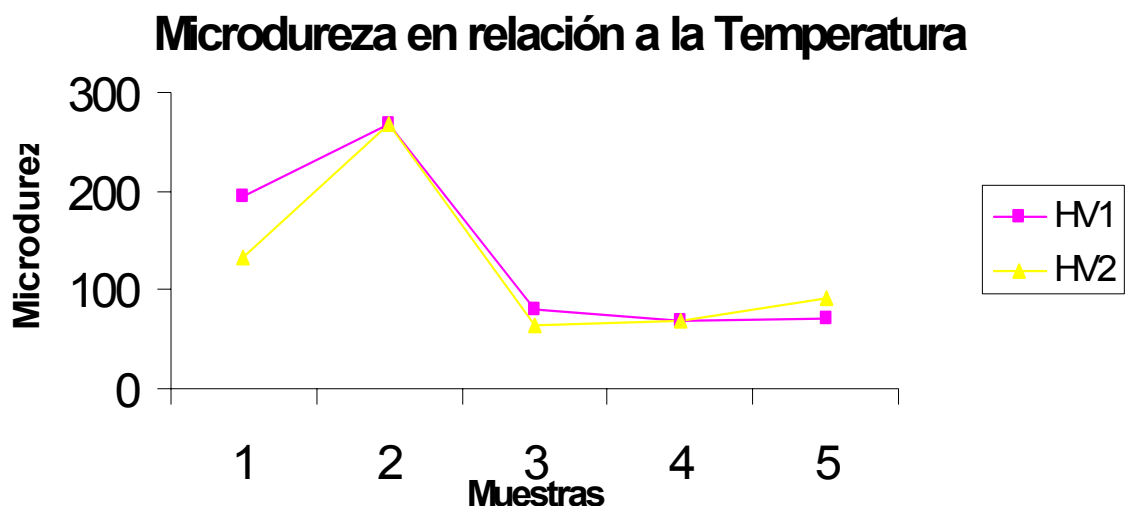


Figura 3.8a. Representación grafica de la microdureza del acero Ac - 20 Mn (Ac - 20 r Gost 977 - 77) para 0,01 Kg. de carga.

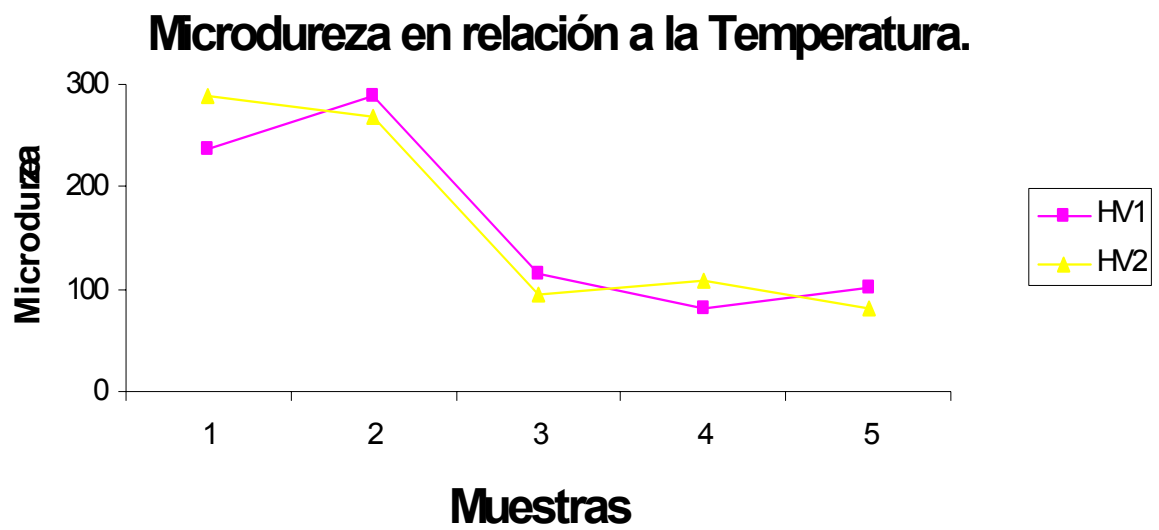


Figura 3.8b. Representación grafica de la microdureza del acero Ac - 20 Mn (Ac – 20 r Gost 977 - 77) para 0,02 Kg. de carga.



4 VALORACIÓN ECONÓMICA

Conociendo la potencia consumida (NC) por la maquina es posible determinar el consumo eléctrico durante el proceso. Del epígrafe 3.2.2 se conoce que el valor de NC:0,13 kW.

En la tabla 3.5 aparecen las máquinas empleadas con su consumo y la tarifa eléctrica del ISMMM, teniendo en cuenta el mismo se resume los mismos a partir de que la institución paga \$ 0,044 por kW.

Tabla 3.5. Máquinas empleadas en el proceso con su consumo.

Máquinas	Consumo (kW)	Tarifa (\$)
Fresadora	0,13	0,044
Pulidora	1,75	0,044
Microscopio	2,10	0,044
Durómetro	2,50	0,044
Total	6,48	0,044

4.1 Indicaciones para la formación de los precios en la caracterización microestructural del material (CMM)

En Cuba las indicaciones para la confección de la Ficha para precios se establecen por la resolución conjunta No. 1/2005 del Ministerio de Finanzas y Precios (MFP), y el Ministerio de Economía y Planificación (MEP).

Para la elaboración de la ficha de costo existen indicaciones del Ministerio de Finanzas y Precios, que en dependencia del tipo de actividad que realiza la entidad, son la base para la formación de los precios, los gastos para la formación de precio en la caracterización microestructural del material aparecen reflejados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Concepto de gastos para la formación de precios (CMM).

Concepto de Gastos	Total Unitario
Materias Primas (MD)	16,87 (\$)
Materiales Gastables (MI)	24,23 (\$)
Mano de obra (MOD)	10,25 h
Energía Eléctrica (CIF)	7,35 kW

Considerando el concepto de gastos se considera la siguiente clasificación:



Materia prima (Material Directo): Ac - 20 Mn (Ac – 20 r Gost 977 – 77.

Materiales gastables (Materiales indirectos): fresa, reactivos, lijas.

Mano de Obra Directa: cortador, técnico de laboratorio.

Energía eléctrica (Costo indirecto de fabricación): Fresadora, pulidora, microscopio.

- ❖ **Materiales directos (MD):** Son aquellos que se utilizan directamente en la producción y se transforman en productos terminados con la adición MOD y CIF; que representan el principal costo de materiales en la producción de un artículo.
- ❖ **Materiales indirectos (MI):** Son todos los materiales comprendidos en la fabricación de un producto diferente de los MD. Los MI se incluyen como parte de los CIF.
- ❖ **Mano de obra:** Es el esfuerzo físico o mental gastado en la fabricación de un producto. El costo de la mano de obra se puede dividir en Mano de obra directa (MOD) y Mano de obra indirecta (MOI).
- ❖ **Mano de obra directa:** Es toda la mano de obra directamente involucrada en la fabricación de un producto terminado que se puede fácilmente asociar con el producto y que representa el principal costo de mano de obra en la fabricación del mismo.
- ❖ **Mano de obra indirecta:** Es toda aquella que no está directamente involucrada en la fabricación de un producto. La mano de obra indirecta se incluye como parte de los CIF.

El comportamiento de los costos aparece reflejado en las tablas 3,7.

Tabla. 3.7. Costo de elaboración de la probeta.

COSTO DE ELABORACIÓN DE LA PROBETA.			
Tipo de material	Costo de material (\$)	Peso del semiproducto (kg)	Precio (CUC)
Acero Ac – 20 r	2,25	9,8	22,05
Lija	1,00	0,005	0,005
Operario	Tarifa(\$)	Tiempo efectivo(h/\$)	Costo(\$)



Cortador	1,54	0,9	1,38
Fresador	1,60	9,8	15,68
Téc de laborator.	1,78	6,00	10,68
Salario Básico (Sb) = Suma de los costos = \$ 27, 74			
Salario complementario Sc = (Sb*0,1) = \$ 2, 77			
Aporte a la seguridad social Ss = (Sc+Sb)*0,09 = \$ 2, 74			
GASTO DE ENERGÍA			
Máquinas	Tiempo trab (h)	Potenc máquina kW	Energ. consum (kW/h)
Fresadora	0,5	1,5	0,75
Oxicorte	1,04	0,13	0,13
Microscopio	2,00	2	4
Pulidora	4,00	3,75	15
COSTO ENERGÍA			
Fresadora	$C_{Fs.} = 250+0,75 \cdot 0,044 \cdot 1.92$		Costo Energía Eléctrica.
Oxicorte	$C_{SS} = 250+0,13 \cdot 0,044 \cdot 1.92$		$C_e = C_{Fs.}+C_{Ss}+C_M+C_P$
Microscopio	$C_M = 250+4,0 \cdot 0,044 \cdot 1.92$		CE= = \$ 961
Pulidora	$C_P = 250+15,0 \cdot 0,044 \cdot 1.92$		Costo Total
			$CT= P_M+Sb+Sc+Ss+C_e = \$ 1020,21$

Costo total de materiales: \$ 551, 375

Costo por operario: \$ 27, 74

Salario complementario: \$ 2, 77

Aporte a la seguridad social: \$ 2, 74

Costo de la energía eléctrica: **\$ 961**

Costo total: \$ 1545, 625 = 61, 825 CUC



4.2 Valoración del impacto medio ambiental

La protección del medio ambiente se ha convertido, en los últimos años, en una de las cuestiones que más inquietan a la humanidad. Los grandiosos medios técnicos de que dispone el hombre para explorar las riquezas naturales, el acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población, han dado lugar a consecuencias indeseables para la humanidad, tales como: el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental, los ruidos, la pérdida de los valores estéticos del medio circundante y la merma acelerada del fondo genético, entre otros.

Se intensifica el esfuerzo para garantizar el uso racional de los recursos naturales, minimizando su impacto en el entorno, pensando en el futuro de la región. La gestión ambiental se manifiesta de igual forma en un programa de rehabilitación de terrenos afectados por la minería a cielo abierto que permitirá en varios años devolver las condiciones naturales a grandes cantidades de hectáreas dañadas. La entidad participa además en la reforestación popular territorial, mediante la siembra de un promedio anual de 50 000 posturas de árboles maderables y frutales. También el proceso de modernización y el incremento de la eficiencia metalúrgica de la fábrica han repercutido favorablemente en la situación medioambiental.

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues en este medio es donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentran el polvo industrial, ruidos, gases.

De acuerdo con la forma de acción biológica sobre el organismo humano, los polvos industriales se clasifican en:

Polvos inertes: son aquellos que no provocan reacción aparente en los depósitos linfáticos pulmonares, pero obstruyen el flujo normal de la linfa.

Polvos tóxicos: Son los que ocasionan daños en uno o varios órganos y sistemas linfáticos pulmonares, pero obstruyen el flujo normal de la linfa.



Polvos alergénicos: son los causantes de afecciones alérgicas, sus efectos dependen en gran medida de la susceptibilidad del individuo.

Polvos fibrogénicos: ocasionan fibrosis pulmonar característica de la neumoconiosis.

Los elementos metálicos que se relacionan en este trabajo tienen las siguientes características toxicológicas sobre el hombre.

Níquel: La aspiración de aerosoles ricos en sales solubles de níquel puede provocar corizas crónicas y sinusitis. A pesar que la dermatitis de níquel es provocada normalmente a través de contacto externo con aleaciones de níquel o sales se ha reportado también reacciones alérgicas en pacientes sensibles. Al níquel también se le atribuyen propiedades cancerígenas, actuando fundamentalmente sobre los pulmones.

Cobalto: Presenta propiedades dañinas sobre el riñón, también se le atribuyen la aparición de dermatitis por ser altamente irritante, además se ha reportado que provoca cambios hematológicos, digestivos y pulmonares.

Hierro: Los polvos finos de óxido de hierro son inertes y pueden como máximo interrumpir las funciones de los órganos respiratorios.

Cobre: La inhalación de vapores de cobre es peligrosa para diferentes órganos como el páncreas y los pulmones, algunos de los compuestos del cobre son irritantes de la piel y de la conjuntiva lo cual a la base de algunos procesos alérgicos y los óxidos de cobre son irritantes de los ojos y el tacto respiratorio.

Zinc: No es intrínsecamente un metal tóxico, pero la exposición a los compuestos de zinc causa daños a la membrana mucosa.

Manganeso: La exposición a los polvos de manganeso provoca la aparición de diversas infecciones respiratorias.



4.2.1 Impactos Ambientales generados por la planta Hornos de Reducción

1. Generación de polvo y gases fugitivos calientes por sistema de alimentación y descarga de los hornos "Herresfoff".
2. Generación de polvo y gases fugitivos calientes por sistema de alimentación y descarga de los alimentadores "Yacoby".
3. Arrastre de mineral crudo a las canalizaciones
4. Altas temperaturas en la zonas de trabajo
5. Altos ruidos producto a los equipos dinámicos de la operación.
6. Afectaciones a la estética laboral durante el montaje y desmontaje de los equipos y componentes de la planta.

4.2.2 Medidas para mitigar estos efectos

1. Implementar un programa de mejoras continúa para alcanzar una operación estable.
2. Continuar las pruebas de sellos de alta resistencia a las temperaturas de descarga de los alimentadores.
3. Dar tratamiento a los residuales en el SD-01 evitando así arrastre a las canalizaciones.
4. Aplicar proyectos de automatización con vista a disminuir la influencia de altas temperaturas en las zonas de trabajo.
5. Uso obligatorio de los medios de protección con sanciones administrativas a los infractores.
6. Lograr que los trabajadores desarrollen una cultura laboral e industrial.

4.2.3 Riesgos para el trabajador y medidas para su prevención

En la planta el trabajador se expone a diferentes riesgos durante el desarrollo de su jornada laboral. A continuación se relacionan estos riesgos, así como las medidas para prevenirlos.

Atrapado por: Partes móviles o giratorias durante la supervisión de los equipos de su área y que son: Transportadores, bombas, ventiladores, impelente de motores,



acoplamientos, correas o cadenas de transmisión, par piñón - catalina, eje central con sus brazos y dientes, enfriador, par llanta – rodillo y otros.

• **Las medidas de prevención que deben seguirse para evitar este riesgo son:**

1. No subir a un transportador rotatorio que este en movimiento.
2. Limpiar, no reparar, no tocar ninguna pieza o elemento en movimiento de: Transportadores rotatorios, bombas de neumáticas o centrifugas, ventiladores, alimentadores, tornillo sinfín mezcladores, motores, transportadores de paleta, eje central, maquinas herramientas y otros.
3. No tratar de poner, quitar, limpiar, ajustar, no tocar brazos, dientes, piedras, pedazos de escoria, ladrillos u otros objetos mientras este rotando su eje central.
4. No trate de introducir o extraer ningún tipo de objeto dentro de: Alimentador GRIZZLY del transportador rotatorio, horno, tornillo sinfín, cajas de impelentes y otros.
5. No permitir la explotación de ningún equipo cuyas partes o elementos móviles y rotatorias no estén debidamente resguardadas.
6. No usar en el área ropas con elementos desabotonados, sueltos o colgantes.
7. Para hacer chequeos, inspecciones, calibraciones, regulaciones, reparaciones o limpiezas en (o dentro) cualquier equipo que este fuera de operaciones, solicite la VIA LIBRE correspondiente.

Quemaduras: Al hacer contacto con equipos, tuberías y accesorios que conducen o tienen petróleo, gases, mineral, vapor, agua, aire calientes.

• **Las medidas de prevención que deben seguirse para evitar este riesgo son:**

1. Las tuberías, equipos y accesorios que tengan o transporten sustancias calientes (petróleo, vapor, gases, mineral, agua) deben estar debidamente aislados y protegidos.
2. No permitir la explotación de ductos, bombas, ventiladores, enfriadores (y otros equipos similares) que tengan salideros de mineral, vapor, petróleo, gases, aire y agua caliente.



3. Utilice guantes y espejuelos protectores para inspeccionar, regular, manipular equipos, dispositivos o elementos calientes incluyendo las tareas de inspección, mantenimiento y limpieza de platos, piedras de combustión, quemadores, las tareas de chequear, sacar o poner brazos y dientes, rastrillar hogares, inspección y mantenimiento del alimentador Grizzly.

4. Emplear los métodos correctos para manipular, regular, abrir, cerrar, inspeccionar, cambiar, limpiar equipos y dispositivos que tengan o transporten mineral, vapor, petróleo, gases, aire y agua caliente.

Contacto con corriente eléctrica: como resultado de la manipulación indebida de equipos, dispositivos y accesorios eléctricos, Así como conductores eléctricos desnudos.

• **Las medidas de prevención que deben seguirse para evitar este riesgo son:**

1. No trate de revisar, reparar, abrir, cerrar, cambiar y ajustar equipos, dispositivos, conductores, instalaciones, o cajas eléctricas. Para ello llame al electricista del turno.

2. Reporte urgentemente al electricista del turno la existencia de cualquier equipo, dispositivo o instalación que no posea el debido cable a tierra.

3. No use extensiones eléctricas para alumbrado portátil conectadas a tensiones mayores que 36 V.

4. No toque ningún empalme o conductor eléctrico desnudo que encuentre en su área de trabajo. Repórtelo al electricista de turno.



CONCLUSIÓN

Una vez finalizada la investigación se llegó a la siguiente conclusión:

1- Se determinó el comportamiento microestructural del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral.

- Se caracterizó la microestructura del material del cilindro rotatorio del enfriador de mineral y se realizó un análisis tenso-deformacional, quedando demostrado que existen cambios en la estructura del material, en el tamaño de los granos así como una nueva disposición en la red cristalina, y presencia de inclusiones metálicas.
- Se realizaron ensayos de dureza y microdureza al material, demostrándose que existe un incremento de dureza en el tramo de la entrada del enfriador en relación a la salida, encontrándose este último cercano al valor de dureza de la muestra patrón, y se determinaron las causas principales que provocan el deterioro del material del cilindro rotatorio del enfriador, las cuales son el cambio brusco de temperatura y el desgaste abrasivo del mismo.



RECOMENDACIONES

1. Profundizar la investigación con el uso de otros Métodos de Análisis Metalográficos para así alcanzar una caracterización completa del objeto de estudio.
2. Proponer el empleo de otro método para la simulación de las tensiones por medio del software ANSYS.





BIBLIOGRAFÍA

1. Adler, P H; et al. Strain Hardening of Hadfield Manganese Steel. Metallurgical and Materials Transactions. A. Volume 17 A. October 1986. p 1725.
2. Bilmes, P.D. Microscopia óptica y electrónica de aceros al carbono. Monografía. La Habana. 2001.
3. Guliaev, A. Metalografía. Tomo I. Moscú. Editorial Mir. 1983.
4. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983.
5. Herrera, E; Gallardo, J. Algunos casos prácticos de fallos metálicos relacionados con el desgaste. Revista de Metalurgia CENIM. Madrid, 22 (4), 1986.
6. 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/>.
7. MANGANESE CENTRE. Manganese in powder metallurgy alloys. Manganese Centre. Paris. 1998. 53 p
8. Martínez, F; Martínez, H. Adaptación de máquinas pulidoras para ensayos de desgaste abrasivo. Revista Construcción de Maquinaria. N01. 1981. p 47-55.
9. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Versión 1.1. 1996.
10. Subramanyan, D K; et al. Austenitic Manganese Steel. ASTM. Specialty Steel and Heat Resistant Alloys. ASTM Handbook. USA. 1999. pág 822-840.
11. 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.
12. 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>
13. Bold, PE, *Wear* 1991; v XIV (N 2): 307-317.



14. 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).
15. Clauser. H. R. Diccionario de materiales y procesos de ingeniería. Editorial Labor S.A. Barcelona. 1985.
16. Caubet, J.J. (1971). "Teoría y Práctica Industrial del rozamiento". España.



ANEXOS



Anexo 1. Diagonales obtenidas para una carga de 10 g aplicada a las probetas.

Muestra 1E	(Punto 1)	
	D1	4.66
	D2	5.9
	D3	4.45
	D4	4.4
Muestra 1E	(Punto 2)	
	D1	3.97
	D2	4.4
	D3	4.17
	D4	4.58
Muestra 2E	(Punto 1)	
	D1	4.36
	D2	4.83
	D3	4.1
	D4	4.5
Muestra 2E	(Punto 1)	
	D1	4.51
	D2	4.8
	D3	4.21
	D4	4.81
Muestra 1S	(Punto 1)	



	D1	4.69
	D2	5.13
	D3	4.61
	D4	5.7
Muestra 1S	(Punto 2)	
	D1	5.5
	D2	4.58
	D3	4.6
	D4	4.5
Muestra 2S	(Punto 1)	
	D1	5.4
	D2	4.58
	D3	4.2
	D4	4.5
Muestra 2S	(Punto 2)	
	D1	4.56
	D2	4.4
	D3	4.61
	D4	4.11
Muestra 3S	(Punto 1)	
	D1	4.11
	D2	4.61



Muestra 3S	D3	5.53
	D4	4.9
	(Punto 2)	
	D1	3.55
	D2	4.12
	D3	4.62
	D4	4.14



Anexo 2. Diámetros obtenidos a partir de 20 g de carga aplicado a las probetas.

Muestra 1E	(Punto 1)	
	D1	3.14
	D2	3.65
	D3	2.66
	D4	2.24
Muestra 1E	(Punto 2)	
	D1	3.73
	D2	3.22
	D3	3.27
	D4	3.7
Muestra 2E	(Punto 1)	
	D1	3.73
	D2	3.22
	D3	3.27
	D4	3.7
Muestra 2E	(Punto 2)	
	D1	3.77
	D2	3.41
	D3	3.36
	D4	3.78
Muestra 1S	(Punto 1)	



	D1	5.49
	D2	5.8
	D3	5.24
	D4	5.81
Muestra 1S	(Punto 2)	
	D1	5.89
	D2	5.46
	D3	5.82
	D4	5.78
Muestra 2S	(Punto 1)	
	D1	5.5
	D2	6.11
	D3	5.98
	D4	5.37
Muestra 2S	(Punto 2)	
	D1	5.94
	D2	5.3
	D3	5.29
	D4	5.9
Muestra 3S	(Punto 1)	
	D1	5.9
	D2	5.54



	D3	5.54
	D4	5.99
Muestra 3S	(Punto 2)	
	D1	5.99
	D2	5.66
	D3	5.61
	D4	5.02