



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA.

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al título de

INGENIERO MECÁNICO

TITULO: Evaluación de la influencia del agua de enfriamiento en el proceso transferencia de calor del mineral laterítico reducido en cilindros horizontales en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

AUTORES: José Javier Perdomo Mena
Diolkis Matos Casals

TUTORES: M.Sc. Ever Góngora Leyva
Ing. Marbelis Lamorú Urgelles
Ing. Juan Manuel Olivares Bients

“Año 49 de la Revolución”
Moa, 2007



RESUMEN

Durante el desarrollo de la investigación se realizó la revisión y el análisis de los trabajos precedentes que sobre la temática estudiada han sido publicados, valorando el estado actual de los procesos de enfriamiento, donde las características y propiedades del mineral tienen un papel decisivo en la eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido.

En el trabajo se expresa las principales propiedades que caracterizan el mineral reducido y algunos métodos de ensayos que permiten determinar éstas como objeto de modelación matemática. Se establecieron las ecuaciones que permitieron la realización del balance térmico y de masa en la instalación de objeto de estudio. Además de las ecuaciones se pudo determinar el porcentaje del enfriador que queda expuesto sobre la superficie.

En el trabajo se refleja la valoración económica e impacto ambiental de la propuesta estudiada emitiéndose las conclusiones y recomendaciones, la bibliografía consultada y los anexos.



ABSTRACT

During the development of the investigation he/she was carried out the revision and the analysis of the precedent works that it has more than enough the thematic one studied they have been published, valuing the current state of the cooling processes, where the characteristics and properties of the mineral have a decisive paper in the efficiency of the process of cooling of the mineral reduced laterítico.

In the work it is expressed the main properties that characterize the reduced mineral and some methods of rehearsals that allow to determine these like object of mathematical modelación. The equations that allowed the realization of the thermal balance settled down and of mass in the installation of study object. Besides the equations you could determine the percent of the cooler that is exposed on the surface.

In the work he/she is reflected the economic valuation and environmental impact of the studied proposal being emitted the conclusions and recommendations, the consulted bibliography and the annexes.



ÍNDICE

Contenido	Págs.
Introducción	
Capítulo I Marco teórico- metodológico de la investigación	
1.1- Introducción	
1.2- Trabajos precedentes	
1.3- Flujo tecnológico para la obtención del producto final	
1.4- Proceso tecnológico de la Planta de Hornos de Reducción	
1.5- Descripción de la instalación de estudio	
1.6- Estado actual de la automatización del proceso de enfriamiento del ineral	
1.7- Análisis del Proceso de enfriamiento del mineral reducido como objeto de modelación físico-matemática	
1.8- Conclusiones del capítulo I	
Capítulo II Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios	
2.1- Introducción	
2.2- Fundamentos teóricos para la modelación matemática del enfriador	
2.3- Definición del modelo teórico para el proceso de enfriamiento	
2.4- Conclusiones del capítulo II	
Capítulo III Resultados experimentales e identificación preliminar del modelo físico-matemático en el proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios	
3.1- Introducción	
3.2- Instalación experimental	
3.3- Diseño experimental	
3.4- Técnica experimental	
3.5- Procesamiento estadístico de los resultados	
3.6- Preidentificación de los coeficientes de transferencia de calor.	
3.7- Comportamiento de la temperatura del mineral a la salida del enfriador en función de los coeficientes preidentificados.	
3.8- Conclusiones del Capítulo III	
Capítulo IV Valoración técnico - económica e impacto social y ambiental	
4.1- Introducción	
4.2- Valoración técnico-económica	
4.3- Impacto social	
4.4- Impacto ambiental	
4.5- Conclusiones del capítulo IV	
Conclusiones	



Recomendaciones

Bibliografía.

Anexos.



CAPITULO I

MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Dentro del proceso de obtención del níquel, la planta de Horno de Reducción tiene gran importancia. En ella se crean las condiciones (reducción de los óxidos de níquel y cobalto) para la extracción del mineral en su forma metálica, un elemento importante dentro de ella lo constituyen los enfriadores de mineral, de los cuales depende en gran medida la realización óptima del proceso de Lixiviación. Por tal motivo el objetivo de este capítulo es realizar un estudio de los principales elementos teóricos relacionado con dicha planta y los aspectos fundamentales que rigen el proceso de transferencia de calor en los enfriadores.

1.2 Trabajos precedentes

Durante el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos, informes y proyectos, la revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales:

La información relacionada con el enfoque teórico-metodológico.

Los trabajos que sobre el tema del enfriamiento del mineral desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado 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), **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.

Aportaron considerablemente los conceptos de **Incropera** (2003), que abordan la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de masa y calor, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con la transmisión del calor y constituyen un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas.

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, 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.

Según **Guzmán** (2001), la modelación matemática es una herramienta indispensable en el diseño y operación de las plantas de procesos, ofrece un método numérico para la solución de grandes sistemas de ecuaciones derivadas de la modelación de toda una planta o parte de la producción. Los últimos avances en el campo de la simulación, en programas como el MATLAB, permiten obtener con gran exactitud estas soluciones a una gran velocidad, se pueden seleccionar para ello varios métodos numéricos. De igual forma para componer las ecuaciones de un objeto en la industria metalúrgica, los que representan complejos sistemas dinámicos, es necesario despreocuparse de una serie de factores secundarios y sí tener en cuenta los principales: de entrada, salida y perturbaciones que influyen en la dinámica del mismo; a la vez, la sencillez del modelo conformado debe contener las principales peculiaridades del proceso investigado.

Es de gran importancia sobre todo el descubrimiento de la ley de la hidrostática, el llamado principio de **Arquímedes**, que establece que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una pérdida de peso igual al peso del volumen del fluido que desaloja. El principio de Arquímedes, nos ofrece un método indirecto de calcular el volumen de un cuerpo, su densidad y peso específico.

Fue de mucho interés el trabajo realizado por **Correa** (2000), en este se realiza un balance energético a los enfriadores de mineral y muestra aspectos importantes

relacionados con el fenómeno físico que tiene lugar dentro de los mismos, exponiendo además las consideraciones en las que debe estar basado el modelo físico-matemático de estos equipos. Un modelo tal fue subsecuentemente elaborado por **Retirado** y **Góngora** (2004), quienes demostraron que los parámetros más influyentes en la transferencia de calor en el proceso son la temperatura de entrada y el flujo másico de mineral.

Los trabajos que sobre el tema del enfriamiento del mineral desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado en los últimos años.

Respecto al primer elemento, resulta muy útil la revisión de la tesis doctoral de **Torres** (2003), la misma 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 proyecto.

En relación al segundo elemento fue de mucho interés el trabajo de diploma realizado por **Norge** (2000) en este se realiza un balance energético a los enfriadores de mineral y muestra aspecto de interés relacionados con el fenómeno físico que tiene lugar dentro de los mismos.

Tuvo aporte práctico a este trabajo la investigación desarrollada por **Columbié** (2001) debido a que en la misma se obtiene la modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio, lo cual es de gran interés para el análisis de la transferencia de calor en los enfriadores debido a que estos últimos son cilindros rotatorios al igual que los primeros.

El descubrimiento más significativo en este sentido es la importancia del mezclado del sólido para la transferencia total de calor a la capa, obtenido por **Foliot** (1955), quien realizó mediciones del flujo de calor en un horno experimental de cemento de $2,75 \times 24m$ y fue uno de los primeros en enfatizar este hecho. Él estableció que el flujo de calor hacia la capa puede ser visto como un proceso en dos etapas que incluyen la transferencia de calor a una fina capa hacia el interior del mismo.

Perron (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 **Sai** (1992).

La validación del modelo fue basado en una corrida experimental para la velocidad del sólido alimentado, velocidad de rotación e inclinación del cilindro.

Fue de mucho interés el trabajo de diploma realizado por **González y Clares** (1980) donde realizan un estudio bibliográfico sobre fluidización en general, estudian la transferencia de calor entre los diferentes gases a utilizar y la obtención de parámetros envuelto en la correlación a utilizar con el objetivo de lograr el enfriamiento del mineral a través de un equipo de cama fluidizada utilizando la técnica de la fluidización

Es de gran importancia el trabajo realizado por **Reyes** (1982) el cual hace un análisis teórico de la influencia que posee el área de transferencia de calor sobre el enfriamiento del mineral reducido que pudiera servir de base para posteriores análisis o investigaciones practicas con vista a solucionar el problema existente con la temperatura de descarga de los enfriadores correspondientes a los Hornos de Reducción.

Bui (1997), éste realizó un trabajo sobre modelos de procesos que incluyen el flujo de fluidos y la transferencia de calor y se extiende a todas las categorías importante de los procesos encontrados en la industria primaria del aluminio, desde el procesamiento de la materia prima y la reducción, hasta la fundición y el reciclaje. Se incluye una amplia variedad de procesos desde los precipitadores, calcinadores, hornos rotatorios, celdas de reducción y hornos de mezclado y de fundición, hasta los hornos de reciclaje y filtración de metales; se lleva a cabo un repaso del trabajo de modelación, las aplicaciones y necesidades expresadas no solo en el análisis y diseño sino también el control del proceso, optimización y supervisión, incluyendo el entrenamiento del operador. Se da un sumario de los problemas percibidos, fundamentalmente en el campo de los parámetros de los modelos y la validación de estos, además de las indicaciones de las tendencias futuras.

Como se puede apreciar no existe suficiente información sobre el proceso de enfriamiento del mineral en los materiales consultados. En el manual de operaciones de la planta de hornos de reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” (1985) solo se encuentran algunos datos de la instalación utilizada actualmente.

La consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática escogida, en su mayoría aborda elementos aislados del proceso de transferencia de masa y calor. Esto impone la necesidad de ejecutar una investigación que contribuya a la mayor eficiencia del proceso de enfriamiento del mineral en las industrias del níquel con tecnología carbonato amoniacal.

1.3 Estado actual de la temática

En esta planta se reduce el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniacal. Para este proceso existen 24 hornos, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores.

El mineral, después de pasar por la sección de molienda, es enviado mediante transporte neumático a los silos (225 – SI) como forma de almacenaje.

El llenado de los silos se hace de forma cruzada para mantener equilibrado el peso y que la estructura no se deforme. Las tuberías (1, 2, 4) alimentan los silos impares y las tuberías (3, 5, 6) alimentan los silos pares, estas tuberías están dotadas de conmutadores (tres por cada silo) de forma tal que garantice el llenado del silo, una vez que el este está cargado con ayuda del conmutador se desvía la alimentación para el siguiente silo, a diferencia de los silos 5 y 6 que no poseen conmutadores y su llenado se realiza de forma directa.

En la sección de los silos se encuentran 9 bombas tipo TA-36 (225- BO) de una capacidad de 120 t/h hora, mediante las cuales el mineral es bombeado hasta las tolvas de los hornos (225 TV) que son 12 en total, dispuestas una para cada dos hornos. Estas tolvas permiten realizar una operación de 8 horas a cada horno.

Una vez el mineral en las tolvas, este pasa a los dosificadores de pesaje automático (225 – BA – 201) que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno a través del pesaje que este realiza de acuerdo al tonelaje fijado, estos equipos tienen una capacidad hasta de 22 t/h .

Después que el mineral es pesado, se produce la descarga del mismo al sinfín alimentador (225- TR- 202) el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero.

El mineral una vez dentro del horno es sometido al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración

determinada de gases reductores ($\text{CO} - \text{H}_2$) para ello el horno dispone de 10 cámara de combustión dispuestas en los hogares 15, 12, 10, 8 y 6 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases para el calentamiento del mineral, lo cual permite, además de lograr el perfil de temperatura, enriquecer la atmósfera reductora del horno ya que trabaja con combustión incompleta.

El proceso de reducción se efectúa en un horno de hogares múltiples tipo ПМ 17 К- 6,8 de 23,5 m de alto y 6,8 m de diámetro, con 17 hogares ó soleras. Además, el horno (225- HR- 205). Cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas con la que mediante la rotación del eje central facilitan el traslado de mineral de un hogar a otro.

Este movimiento o traslado del mineral de un hogar a otro se realiza en forma de zigzag, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

Los gases que salen del horno arrastran consigo partículas muy finas de mineral, las cuales se hace necesario recuperar para evitar mayores pérdidas en el proceso, para ello, el taller cuenta con un sistema de limpieza de gases formado por un grupo de 6 ciclones en cada horno, 12 electrofiltros y un electro filtro en la sección de los silos para la purificación del aire del transporte neumático y del aire de succión de las tolvas.

El mineral recuperado en la batería de ciclones cae por gravedad al horno a través del hogar 0. El mineral que se recupera en los electrofiltros es transportado por unos transportadores de paleta hacia una tolva, debajo de la cual se encuentran unas bombas neumáticas de 120 t/h de capacidad, las cuales envían el mineral hacia las tolvas de los molinos para más tarde ser bombeado hacia los silos formando así el ciclo de la planta de Hornos de reducción.

Los hornos disponen de 9 cámaras de combustión, con 6 quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases calientes para el calentamiento del mineral, a la vez que enriquece la atmósfera reductora del horno ya que trabaja con combustión incompleta.

La presión del aire utilizado en las cámaras de combustión es de 14 kPa , facilitando por el uso de ventiladores centrífugos capaces de mantener una operación estable en dicha área cada bloque cuenta con tres de ellos, dos en operación y uno de reserva.

Así el mineral en su descenso es sometido a un perfil ascendente de temperatura que permite un calentamiento gradual, a la vez que penetra en un perfil gaseoso que garantiza un aumento en la concentración de reductores. La atmósfera reductora es controlada mediante la relación CO_2 / CO en H-10 que debe ser de 1,2 % .

1.4 Flujo tecnológico de la planta

Dentro del proceso de obtención de níquel la planta de hornos de reducción tiene como función fundamental reducir el níquel y el cobalto del mineral secado y reducido que fue almacenado en los silos. Utilizando 24 hornos de múltiples hogares y 12 electrofiltros con el objetivo de recuperar el mineral que se escapa con los gases.

El mineral es recepcionado en los silos con un 4% de humedad. Luego se suministra por un grupo de bombas neumáticas a presión hacia la tolva de los hornos, cuya capacidad es de 320 tn .

Es dosificado a los hornos a través de una romana que pesa el tonelaje que se alimenta y luego mediante un transportador sin fin se alimenta el hogar cero.

Una vez que el horno ha sido encamado, la temperatura desciende como consecuencia de la cama que se ha alimentado en el interior de los hogares. A partir de esta condición comienza el régimen normal de operaciones (mineral alimentado, horno en rotación, perfil de temperatura en la cámara, perfil de temperatura en hogares e ignición del hogar 4 y 6 para quemar el CO que extraen los ventiladores y lo hacen pasar a través de los electrofiltros para su purificación).

En cada uno de los hogares ocurre una cinética de reacciones químicas que permiten la selección extractiva del níquel y el cobalto y la reducción del hierro que conforma el mineral alimentado.

El tiempo de retención de mineral desde que se alimenta hasta que se descarga por la parte inferior del horno es de 90 minutos.

El mineral después de reducido, es descargado al transportador rotatorio que lo conduce al tambor enfriador de donde sale hacia los canales de contacto de la planta Lixiviación y Lavado.

1.5 Descripción de la Instalación

Después que el mineral sale de los hornos es transportado por el tambor rotatorio cuya función es transportar el mineral reducido de los hornos hasta el enfriador.

El transportador rotatorio consta de un cuerpo tubular que rota en 6 rodillos de apoyo. Dentro del cuerpo está colocado un tornillo transportador. El cuerpo tiene 6 llantas, cada una se asienta en 2 rodillos de apoyo. Al principio (según la marcha del mineral) y la parte del medio del cuerpo se han analizado las cámaras de carga, la parte final del cuerpo está dentro del enfriador. La entrada de aire atmosférico en las holguras, entre el cuerpo rotatorio, dispositivos cargados y el enfriador se expulsa mediante la empaquetadura. La rotación del cuerpo se realiza por el accionamiento electromagnético. Los desplazamientos axiales posibles del cuerpo del transportador son asimilados por dos rodillos de apoyos.

El mineral después de pasar por el transportador rotatorio es descargado en los enfriadores rotatorios los cuales tienen las siguientes funciones:

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

Remove: 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 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 (200 °C) en la descarga.

En el régimen de operación del enfriador se suministra agua a una temperatura de 30 °C a contracorriente con el mineral, controlándose el nivel a través de unas anillas en la zona caliente de evacuación en función del tonelaje que se está alimentando.

El tiempo de retención del mineral en el interior del enfriador es de 30 minutos. La temperatura del agua a la salida de la piscina es de 70 a 75 °C .

El accionamiento está compuesto por el grupo motor-reductor principal y motor-reductor auxiliar que se acoplan a través de un embrague frontal. En el cuerpo existen dos

puntos de apoyo (rodillos) que se apoyan en chumaceras, los cuales están revestidos por un material sintético conocido como textolita.

El mineral después de pasar por el transportador rotatorio es descargado en el enfriador rotatorio horizontal, 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. Además están diseñados 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:

Parámetros de trabajo del enfriador	Valores Nominales
Temperatura del mineral a la entrada	650 a 700 °C
Temperatura del mineral a la salida	200 °C
Temperatura del agua en la entrada	29,5 °C
Presión de trabajo	0,01 a 0,02 kPa
Presión excesiva del agua	300 kPa
Consumo de agua para enfriar el tambor.	107 m ³ /h
Temperatura del agua a la salida.	70 a 75 °C
Diámetro exterior	3,08 m
Espesor de pared	0.016 m
Longitud del cilindro	32,54 m
Coeficiente de llenado del tambor con el material.	9%

Fuente: Manual de Operaciones de la planta H. R, 2005

El material enfriado es un mineral que contiene una granulometría de 200 mesh (0.074 mm) que pasa al tambor a través de un muñón de tope del enfriador. Con el paso de mineral, éste se enfría con el contacto del cuerpo del tambor que es enfriado por el agua de la piscina. De la cámara de salida, el mineral enfriado llega al transportador que no constituye parte del enfriador.

El mineral que sale del enfriador cae a una de las canales de lixiviación por donde se introduce una corriente de una solución carbonato amoniacal formando una pulpa que va a los tanques de contacto (225-TK-213) los cuales tienen una capacidad de 70 m³. Esta pulpa es bombeada a la planta de lixiviación y lavado.



1.7 Conclusiones

1. En la bibliografía consultada no se recoge información alguna que aborde sobre la influencia del agua en el proceso de enfriamiento. Las investigaciones realizadas se limitan a determinar el calor que absorbe el agua.
2. No existe referencia alguna o documentos que recoja cuales son los ensayos que se deben realizar al mineral para determinar sus propiedades termo – físicas como objeto de modelación.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

El conocimiento del proceso y el desarrollo de modelos matemáticos que representen los fenómenos físicos de los sistemas y el proyecto para la implementación de las nuevas tecnologías es un tema de primordial importancia en el desarrollo actual del sector industrial. Según **Mason y Marjanovic** (1998) el modelo no es más que una abstracción matemática del proceso real, donde la ecuación o conjunto de ecuaciones que componen el mismo es la mejor aproximación del proceso.

En toda investigación científica es necesario conocer las propiedades de las sustancias de trabajo, cuando estas varían con respecto a la longitud y el tiempo. En este capítulo se plantea como **objetivo**:

Establecer los procedimientos para realizar el balance térmico y de masa en el proceso de enfriamiento del mineral en cilindros rotatorios de la planta Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Teniendo como referencia la modelación matemática del proceso de enfriamiento del mineral en el cilindro rotatorio horizontal se hace necesario conocer con la mayor precisión cuales son las propiedades del mineral que caracteriza el modelo planteado por Góngora, 2004. Las principales propiedades son:

- ✓ Densidad
- ✓ Densidad aparente
- ✓ Calor específico
- ✓ Peso específico
- ✓ Conductividad térmica

2.2 Densidad

La densidad permite medir la ligereza o pesadez de una sustancia, es una propiedad intensiva de la materia definida como la relación de la masa de un objeto dividida por su volumen. Ésta se puede determinar a través de la ecuación (2.1).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

donde:

$\rho \Rightarrow$ densidad; kg/m^3

$m \Rightarrow$ masa; kg

$V \Rightarrow$ volumen; m^3

2.2.1 Método para determinar la Densidad de las partículas

Método picnométrico

La densidad del mineral por el método picnométrico, se puede determinar en el Laboratorio de Física de las Rocas de la Facultad de Minas - Geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico, por poseer todas las condiciones para su realización, (Torres 2003).

Materiales y reactivos

- Picnómetros
- Balanza analítica
- Agua destilada
- Mortero
- Tamiz
- Estufa
- Micropipeta
- Embudo de crisol
- Cubeta
- Bicromato de potasio
- Ácido sulfúrico
- Benceno
- Gas oil

Técnica experimental

1. El picnómetro se lava primeramente con una mezcla caliente de bicromato de potasio con ácido sulfúrico, después con agua y seguidamente con agua destilada; se seca y se pesa. Luego se llena mediante una bureta con el líquido picnométrico seleccionado y de nuevo se pesa. La temperatura del líquido picnométrico debe ser de 18 a 22 °C y el picnómetro lleno de líquido debe pesarse en balanzas con precisión de hasta 0,01 g . Se obtiene el peso del picnómetro con el líquido (g_1).
2. La muestra, en su estado seco, se tritura en un mortero de porcelana y se cierne a través de una zaranda con agujeros de diámetro 0,2 mm. Las partículas de diámetro superior a este valor se vuelven a triturar.
3. Se seca el picnómetro y se selecciona una muestra de roca de 5 g , se coloca en una estufa a la temperatura de 100 a 110 °C hasta alcanzar peso constante, se enfría y se traslada en cubetas al picnómetro seco. El picnómetro con la muestra se pesa en balanzas de precisión con exactitud de 0,01 g . Se determina el peso de la muestra (g), restando el peso del picnómetro seco al peso del picnómetro con la muestra.
4. Para eliminar el aire de la muestra, al picnómetro se le hecha el líquido picnométrico puro en un 30 a 50 % de su volumen y se pone a hervir durante 30 min. Si la muestra es de granos gruesos, y durante una hora si los granos son finos.
5. Después de la ebullición, se enfría el picnómetro en un baño con agua destilada a temperatura de 18 a 22 °C . El nivel del líquido debe permanecer estable en el límite superior del menisco; para ello se utiliza una micropipeta con la que se añaden o sustraen gotas de agua, según se requiera. Luego, el picnómetro se pesa cuidadosamente en balanzas de precisión con exactitud de hasta 0,01 g y se obtiene el peso del picnómetro con el líquido picnométrico y la muestra, o sea (g_2).

Con estos datos, se determina la densidad por la ecuación:

$$\rho = \frac{g \cdot \rho_1}{g_1 + g - g_2} \quad (2.2)$$

donde:

$g \Rightarrow$ masa de la muestra seca; kg

$g_1 \Rightarrow$ masa del picnómetro con el líquido picnométrico; kg

$g_2 \Rightarrow$ masa del picnómetro con el líquido picnométrico y la muestra; kg

$\rho_1 \Rightarrow$ densidad del líquido picnométrico; kg/m^3

2.2.2 Densidad aparente

Materiales y reactivos

- Balanza analítica de precisión 0,01g
- Embudo de crisol
- Agua destilada
- Cubeta
- Juego de tamices
- Probeta graduada
- Estufa

Técnica experimental

1. Se toma una muestra de mineral, se seca en la estufa a una temperatura de 100 °C hasta alcanzar un peso constante y se tamiza, de manera tal que permita la clasificación de las partículas de acuerdo con su diámetro.

2. Se lava la probeta con agua destilada, se seca en la estufa, se pesa y se obtiene la masa (m). Cada muestra, según su diámetro, se traslada en una cubeta y se deposita en la probeta graduada; se trata de eliminar todo el aire de la muestra, de manera que ésta quede lo más compacta posible y al mismo nivel mediante golpecitos en una mesa, y se mide el volumen ocupado por ésta (V_n). Se repite el procedimiento para todas las muestras clasificadas. Se toma la probeta con la muestra y se pesa para obtener la masa (m_n).

3. Se determina la densidad aparente por la ecuación:

2.3 Método para determinar Calor específico

La capacidad calorífica específica o calor específico desde el punto de vista de la ingeniería de materiales se define como la cantidad de calor que hay que proporcionar a un gramo de sustancia para que eleve su temperatura en un grado centígrado.

Existen diferentes ecuaciones para determinar esta propiedad como la expresión que obtuvo A. Enstén (1907) para la capacidad calorífica atómica de un sólido a volumen constante y la expresión que obtuvo P. Debye (1912) para la determinación de la capacidad calorífica. En ambos casos esas ecuaciones contienen parámetros que no se pueden obtener en las instalaciones con las que cuenta la industria.

Para determinar esta propiedad se propone la ecuación (2.4)

$$C_e = \frac{C_p}{P_a} \quad (2.4)$$

donde:

$C_p \Rightarrow$ calor específico a presión constante; kJ/kgK

$P_a \Rightarrow$ peso atómico del material; (uma)

Según Faires (1987): (uma) es unidad de masa atómica.

Cuando un sistema de masa grande se pone en contacto con un sistema de masa pequeña que está a diferente temperatura, la temperatura de equilibrio resultante está próxima a la del sistema grande. La cantidad de calor dQ se transfiere desde el sistema de mayor temperatura al sistema de menor temperatura y es proporcional al cambio de temperatura dT y a la de proporcionalidad C .

$$dQ = C \cdot dT \quad (2.5)$$

donde:

$C \Rightarrow$ capacidad calorífica del sistema; kJ/kgK

$dT \Rightarrow$ cambio de temperatura; K

Si los cuerpos A y B son los dos componentes de un sistema aislado, el cuerpo que está a mayor temperatura transfiere calor al cuerpo que está a menos temperatura hasta que ambas se igualan Si $T_A > T_B$.

- El cuerpo A cede calor: $dQ_A = C_A(T - T_A)$, entonces $dQ_A < 0$
- El cuerpo B recibe calor: $dQ_B = C_B(T - T_B)$, entonces $dQ_B > 0$

$$\text{Como } dQ_A + dQ_B = 0 \quad (2.6)$$

La temperatura de equilibrio, se obtiene mediante la media.

$$T = \frac{C_A T_A + C_B T_B}{C_A + C_B} \quad (2.7)$$

La capacidad calorífica de la unidad de masa se denomina calor específico.

$$C_e = m \cdot c \quad (2.8)$$

donde:

$m \Rightarrow$ masa; kg

$c \Rightarrow$ calor específico; kJ/kgK

La fórmula para la transferencia de calor entre los cuerpos se expresa en términos de la masa m , del calor específico c y del cambio de temperatura.

$$dQ = mc(T_f - T_i) \quad (2.9)$$

donde:

$T_f \Rightarrow$ temperatura final del cuerpo; K

$T_i \Rightarrow$ temperatura inicial del cuerpo; K

Joule demostró la equivalencia entre calor y trabajo $1\text{cal} = 4.186\text{ J}$. Por razones históricas la unidad de calor no es la misma que la de trabajo, el calor se suele expresar en calorías.

2.3.1 Fundamentos físicos para la determinación del calor específico

Cuando varios cuerpos a diferentes temperaturas se encuentran en un recinto adiabático se producen intercambios caloríficos entre ellos alcanzándose la temperatura de equilibrio al cabo de cierto tiempo. Cuando se ha alcanzado este equilibrio se debe cumplir que la suma de las cantidades de calor intercambiadas es cero.

El experimento se realiza en un calorímetro, consistente en un vaso Dewar, convenientemente aislado. El vaso se cierra con una tapa hecha de material aislante, con dos orificios por los que salen un termómetro y el agitador.

- Supongamos que el calorímetro está a la temperatura inicial T_0 .

Por otra parte:

Sean m y c las masa y el calor específico del cuerpo problema a la temperatura inicial T .

En el equilibrio a la temperatura T_e se tendrá la siguiente relación.

$$(M + m_v \cdot C_v + m_f \cdot c_f + m_a \cdot c_a)(T_e - T_0) + m \cdot c(T_e - T) = 0 \quad (2.10)$$

donde:

- m_v es la masa del vaso del calorímetro y c_v su calor específico.
- m_t la masa de la parte sumergida del termómetro y c_t su calor específico.
- m_a la masa de la parte sumergida del agitador y c_a su calor específico.
- M la masa de agua que contiene el vaso, su calor específico es la unidad.

La capacidad calorífica del calorímetro es:

$$k_c = m_v \cdot c_v + m_t \cdot c_t + m_a \cdot c_a \quad (2.11)$$

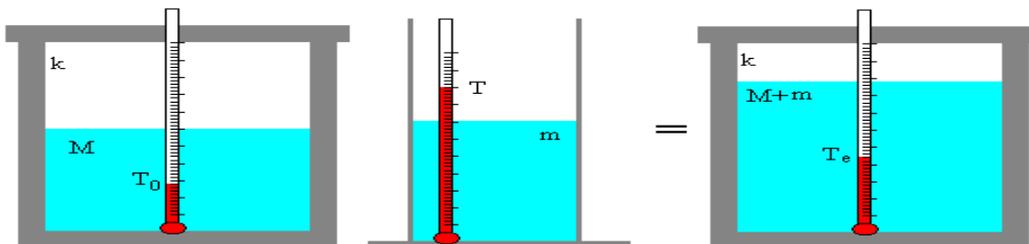
Se le denomina equivalente en agua del calorímetro, y se expresa en gramos de agua. Por tanto, representa la cantidad de agua que tiene la misma capacidad calorífica que el vaso del calorímetro, parte sumergida del agitador y del termómetro y es una constante para cada calorímetro.

El calor específico desconocido será por tanto:

$$c = \frac{(M + k)(T_e - T_o)}{m(T - T_e)} \quad (2.12)$$

En esta fórmula se tiene una cantidad desconocida k , que debe determinar experimentalmente.

2.3.2 Determinación del equivalente en agua del calorímetro.



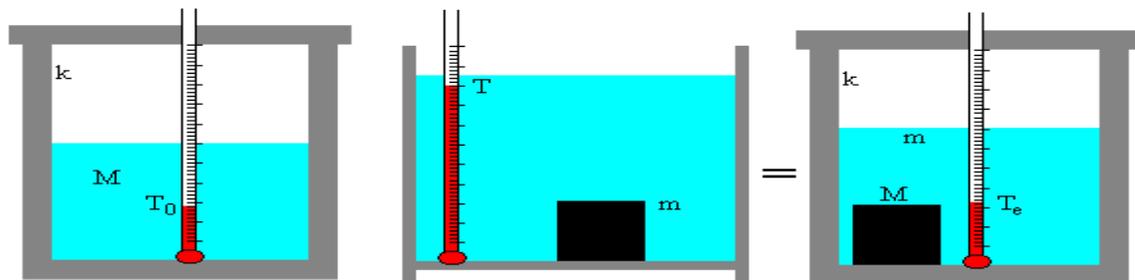
Se ponen M gramos de agua en el calorímetro, se agita, y después de un tiempo, se mide su temperatura T_0 . A continuación, se vierten m gramos de agua a la temperatura T . Se agita la mezcla y luego, se mide la temperatura de equilibrio T_e .

Como el calorímetro es un sistema adiabáticamente aislado se tiene que:

$$(M + k)(T_e - T_o) + m(T_e - T) = 0 \quad (2.13)$$

$$k = \frac{m(T - T_e)}{T_e - T_o} - M \quad (2.14)$$

2.3.3 Determinación del calor específico del sólido.



1. Se pesa con una balanza una pieza de material sólido de calor específico (c) desconocido, resultando (m) su masa. Se pone la pieza en agua casi hirviendo a la temperatura T .
2. Se ponen M gramos de agua en el calorímetro, se agita y después de poco de tiempo, se mide su temperatura T_0 .
3. Se deposita rápidamente la pieza de sólido en el calorímetro. Se agita, y después de un cierto tiempo se alcanza la temperatura de equilibrio T_e .

Se apuntan los datos y se despeja k de la ecuación (2.13) que se ha deducido anteriormente.

El experimento se debe hacer con mucho cuidado, para que la medida del calor específico sea suficientemente precisa. Se debe tener en cuenta el intercambio de calor entre el calorímetro y la atmósfera.

1. Medida del equivalente en agua del calorímetro.

El programa interactivo genera un número al azar que representa el equivalente en agua del calorímetro.

Introducimos los siguientes datos:

- Masa (M) de agua en gramos en el calorímetro.
- Temperatura (T_0) inicial del calorímetro.
- Masa (m) de agua en gramos en una probeta.
- Temperatura (T) del agua.

La masa de agua se vierte en el calorímetro y en el termómetro podemos leer la temperatura final de equilibrio T_e .

Ejemplo:

- Sea $M = 150 \text{ g}$, $T_0 = 18 \text{ °C}$
- Sea $m = 70 \text{ g}$, y $T = 80 \text{ °C}$
- La temperatura de equilibrio es $T_e = 34 \text{ °C}$

El equivalente en agua del calorímetro será:

$$k = \frac{70(80 - 30)}{34 - 18} - 150$$

$$k = 51 \text{ g}$$

2. Medida del calor específico del sólido.

Se introducen los siguientes datos:

- Masa (M) de agua en gramos en el calorímetro.
- Temperatura (T_0) inicial del calorímetro.
- Masa (m) del sólido en gramos.
- Temperatura (T) del sólido en el baño.
- Elegimos en material del sólido.
- Aluminio, Cobre, Estaño, Hierro, Oro, Plata, Plomo, Sodio.

El sólido se introduce en el calorímetro y en el termómetro se lee la temperatura final de equilibrio T_e .

Ejemplo:

- Agua: $M = 150 \text{ g}$, $T_0 = 18 \text{ °C}$
- Sólido: aluminio, $m = 70 \text{ g}$, y $T = 80 \text{ °C}$
- La temperatura final de equilibrio es $T_e = 22 \text{ °C}$

El calor específico del agua es mínimo a 35 °C y aumenta proporcionalmente cuanto más se aleja de esta temperatura. A temperatura ambiente la capacidad calorífica específica del agua es superior a la de cualquier líquido o sólido. La capacidad calorífica específica elevada del agua implica que ésta mantiene muy bien su temperatura o, lo que es lo mismo, que la pierde con gran dificultad, razones por las que se utiliza como medio efectivo de calentamiento o enfriamiento.

2.4 Métodos para la determinar el Peso Específico

Se denomina peso específico de un mineral al cociente entre su peso y el peso de un volumen equivalente de agua a 4 °C (condiciones de máxima densidad del agua), siendo un valor adimensional. El peso específico es una propiedad intrínseca y constante para un mineral de composición química determinada y depende básicamente de dos factores:

- De los átomos que constituyen el mineral.
- Del tipo de empaquetamiento de los átomos.

2.4.1 Picnómetro

Cuando no se puede obtener un mineral con una masa homogénea lo suficientemente grande que permita emplear uno de los métodos descritos, puede determinarse su peso su peso específico con gran exactitud por medio el picnómetro.

Se trata de una pequeña botella con un tapón de vidrio esmerilado a través del cual hay un orificio capilar.

Al efectuar una determinación de peso específico, se pesa primeramente la botella vacía, con el tapón (P). Los fragmentos del mineral se introducen entonces dentro de la botella y se efectúa una nueva pesada (M)/(M - P) representa el peso de la muestra en aire.

Luego la botella se llena parcialmente de agua destilada y se calienta durante unos minutos con el fin de que desaparezca cualquier burbuja de aire que hubiese en la muestra. Una vez enfriado, el picnómetro se llena completamente con agua destilada y se pesa (S), teniendo especial cuidado de que el agua llegue hasta la parte superior del

capilar, pero que no haya exceso de agua. La última pesada (W) se efectúa después de vaciar la botella y volverla a llenar solamente con agua destilada.

En esta última etapa el picnómetro contiene más agua que en la pesada previa; el volumen de agua añadido es igual al volumen agregado de los granos que formaban la muestra.

El peso específico puede determinarse así:

$$\gamma = \frac{M - P}{W + (M - P) - S} \quad (2.15)$$

donde:

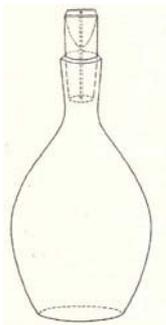
$\gamma \Rightarrow$ peso específico; kg/m^3

$W + (M - P) - S \Rightarrow$ peso del agua desplazada por la muestra

$M - P \Rightarrow$ peso de la muestra

$W \Rightarrow$ picnómetro + contenido en agua

$S \Rightarrow$ muestra + picnómetro + agua no desplazada

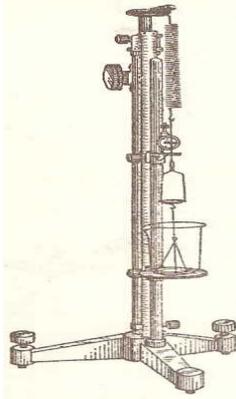


2.4.2 Balanza de Jolly

Como el peso específico es simplemente un cociente, no es necesario determinar el peso absoluto de la muestra, sino que basta con la obtención de valores proporcionales a sus pesos en aire y en agua.

Esto puede hacerse mediante una balanza de Jolly en la cual se obtienen los datos necesarios para los cálculos midiendo el alargamiento de un muelle helicoidal. Al utilizar la balanza, se coloca primero un fragmento en el platillo superior y se anota el alargamiento del muelle. Éste es proporcional al peso en aire (W_a). El fragmento se

transfiere luego al platillo inferior y se sumerge en agua. El alargamiento del muelle es ahora proporcional al peso del fragmento en agua (W_w).



2.5 Métodos para determinar la conductividad Térmica

El coeficiente de conductividad térmica es una propiedad física de los materiales y expresa la magnitud de su capacidad de conducir el calor. En otras palabras es también la capacidad de una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otras sustancias con las que está en contacto.

La conductividad térmica es una propiedad de los materiales que, en excepto en el caso de los gases a bajas temperaturas, no es posible predecir analíticamente; la información disponible está basada en medidas experimentales. En general, la conductividad térmica de un material varía con la temperatura, pero en muchas situaciones prácticas se puede considerar con un valor medio constante, si el sistema tiene una temperatura media, lo que proporciona resultados bastante satisfactorios.

El coeficiente de conductividad calorífica interna ejerce un rol importante en las aplicaciones prácticas del sólido. Este coeficiente es una constante del material, que depende también de la dirección del flujo de calor, de la temperatura y del grado de humedad del mismo.

La conductividad térmica de los sólidos porosos depende principalmente de su peso específico. Este efecto queda explicado teniendo en cuenta que la conductividad térmica del aire que llena los poros es mucho menor que la del constituyente pesado del material poroso. Los sólidos porosos secos son muy malos conductores del calor y constituyen excelentes aislantes térmicos.

La conductividad térmica de un material húmedo es mucho mayor que la del material seco y la del agua tomados individualmente. Este hecho se explica, en parte, por el efecto de la transmisión de calor por convección, debido al movimiento de agua por capilaridad dentro del material poroso y por el hecho de que las propiedades del agua absorbidas son distintas de la del agua libre.

2.5.1 Determinación del Coeficiente de Conductividad Térmica

Las conductividades caloríficas de los sólidos se determinarán experimentalmente ya que dependen de numerosos factores que son difíciles de medir o predecir. En el caso de sólidos porosos, la conductividad calorífica depende significativamente de la fracción de huecos, del tamaño de los poros y del fluido que está contenido en los mismos.

La deducción de una ley física para determinar el coeficiente de conductividad térmica presenta grandes dificultades ya que habría que considerar las dimensiones celulares, los espesores de las capas de moléculas de agua en la superficie interna, los cosenos en la dirección respecto a las fibras y los coeficientes de conductividad caloríficas de cada una de las partes componentes. En consecuencia es preferible la fórmula empírica siguiente, hallada por vía estadística:

$$k = 0.168 \cdot \gamma_o + 0.022; \text{ W/mk} \quad (2.16)$$

Esta ecuación da resultados aceptables en la práctica para todos los pesos específicos aparentes γ_o (kg/m^3) de los sólidos.

Metodología de trabajo

En los ensayos se utilizaron probetas cúbicas de 2 cm de arista. En la elección de estas dimensiones se tuvo en cuenta lo recomendado por la conferencia de Ginebra (1949) y la norma francesa B51-003.

Técnica operatoria

Cada ensayo se realizó en condiciones constantes de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire de secado, utilizando 10 probetas obtenidas de muestras de sólidos correspondientes a un mismo ejemplar.

Los volúmenes de las probetas se determinaron por medición indirecta mediante la inmersión en líquido. Para evitar la absorción de agua por parte de la probeta se empleó como líquido el mercurio, como lo establecen las normas COPANT 461 IRAM 9543 y francesa 51-006.

Una vez obtenidos los pesos específicos de las muestras en estado anhidro se determinaron los coeficientes de conductividad térmica mediante la ecuación (2.16) para distintos contenidos de humedad.

2.5.2 Determinación de las conductividades térmicas en sólidos

Existen numerosos trabajos mediante los que se ha intentado relacionar la conductividad térmica con algunas propiedades físicas del material. Así, puede utilizarse con un margen de error aceptable la ecuación:

$$k = 2.61 \cdot 10^{-8} \frac{T}{\lambda_e} - 8.36 \cdot 10^{-13} \frac{\left(\frac{T}{\lambda_e}\right)^2}{C_p \rho} + 2.36 \cdot 10^{-6} \frac{C_p \rho^2}{M \cdot T} \quad (2.17)$$

donde:

$k \Rightarrow$ conductividad térmica; W/mK

$T \Rightarrow$ Temperatura absoluta; K

$\lambda_e \Rightarrow$ Conductividad eléctrica del material; $\Omega \cdot m$

$C_p \Rightarrow$ Capacidad calorífica; J/kgK

$\rho \Rightarrow$ Densidad; kg/m³

2.6 Determinación del ángulo de reposo del mineral reducido en los enfriadores de la planta de Horno de Reducción

Con el objetivo de estudiar las características del movimiento del mineral reducido caliente dentro de los enfriadores de la planta de Horno de Reducción (en caso de no tener estos ningunos de los aditamentos interiores que tienen en la actualidad) se utiliza un pequeño modelo experimental de enfriador que permite observar el movimiento del material en su interior.

Como base para el modelaje se tomaron dos aspectos, que el coeficiente de llenado fuera semejante en el enfriador industrial y en el modelo; y que la fuerza centrífuga sobre el mineral en ambos equipos fuera idéntico.

Como el dato del coeficiente de llenado de los enfriadores industriales no era conocido se utilizó la fórmula que sigue para hallarlo:

$$M = C \cdot \frac{\Pi \cdot D^2}{4} \cdot W_m \cdot d \quad (2.18)$$

donde:

$M \Rightarrow$ flujo del mineral; tn/h

$C \Rightarrow$ coeficiente de llenado

$D \Rightarrow$ diámetro del enfriador; m

$d \Rightarrow$ peso volumétrico del mineral reducido; ton/m³

$W_m \Rightarrow$ velocidad lineal del mineral dentro del enfriador; m/s

$$W_m = \frac{L}{t} \quad (2.19)$$

donde:

$L \Rightarrow$ longitud del enfriador; m

$t \Rightarrow$ tiempo de retención del mineral reducido dentro del enfriador; h

$$C = \frac{4 \cdot M}{\Pi \cdot D^2 \cdot W_m \cdot d} \quad (2.20)$$

Para que la fuerza centrífuga en los dos equipos sea la misma tiene que cumplirse la siguiente condición.

$$n_1^2 D_1 = n_2^2 D_2 \quad (2.21)$$

donde:

n_1 y $n_2 \Rightarrow$ r.p.m del enfriador industrial y del modelo respectivamente

D_1 y $D_2 \Rightarrow$ diámetros de las secciones transversales del enfriador industrial y del modelo respectivamente.

$$n_1 = 5.5 \text{ rpm}$$

2.7 Otro método que puede ser utilizado en la determinación del tiempo de retención del mineral en el cilindro rotatorio horizontal por ser ambos equipos de geometrías similares

El efecto de llenado en el tiempo de retención y uniformidad en secadores rotatorios ha sido estudiado por Misvell y Marshall. El tiempo de paso es definido como la retención dividida por el régimen de alimentación. Puede medirse directamente en secadores rotatorios, se puede medir el tiempo de retención y el régimen de alimentación. La retención no siempre puede medirse convenientemente en los secadores industriales, sin embargo, a menor periodo de parada ocurra cuando el secador se pueda descargar y pesar sus volúmenes.

Se han acudido a otros métodos, uno consiste en añadir 1 o 2 kg de un sólido perceptible inerte o un radioisótopo de un componente del alimento al y analizado en el producto descargado. El tiempo requerido para la concentración máxima para ocurrir representa el tiempo medio de pasaje.

El tiempo medio de pasaje en secadores rotatorios puede ser estimado por la relación desarrollada por Friedman y Marshall.

$$\theta = \frac{0.23L}{S \cdot N^{0.9} \cdot D} \pm \frac{B \cdot L \cdot G}{F} \quad (2.22)$$

$$B = 5(D_p)^{-0.5} \quad (2.23)$$

donde:

$\theta \Rightarrow$ tiempo de pasaje; min

$B \Rightarrow$ constante que depende del material utilizado

$S \Rightarrow$ inclinación; m/m

$L \Rightarrow$ longitud; m

$D \Rightarrow$ diámetro; m



$N \Rightarrow$ velocidad; s^{-1}

$G \Rightarrow$ velocidad de la masa de aire; kg/sm^2

(+) \Rightarrow se define a flujo paralelo

(-) \Rightarrow se define a flujo contracorriente

2.8 Determinación del por ciento del enfriador que se halla expuesto sobre la superficie

Es necesario tener en cuenta la ley de Arquímedes para calcular que % del enfriador se halla expuesto sobre la superficie, para determinar los modos de transferencia de calor de las paredes del cilindro al agua y de ésta al aire.

$$V_{enf} = \pi \cdot R_2^2 \cdot L \quad (2.24)$$

donde:

$L \Rightarrow$ longitud del enfriador; m

$R_2 \Rightarrow$ radio exterior del cilindro; m

$$V_{agua} = H_{agua} \cdot L_{agua} \cdot A_{agua pisc} \quad (2.25)$$

donde:

$A_{agua pisc} \Rightarrow$ ancho que ocupa el agua en la piscina; m

$L_{agua} \Rightarrow$ longitud que ocupa el agua en la piscina; m

$H_{agua} \Rightarrow$ nivel o altura del agua en la piscina; m

$$\rho_{enf} = \frac{P_{enf}}{V_{enf}} \quad (2.26)$$

donde:

$P_{enf} \Rightarrow$ peso del enfriador; kg

$V_{enf} \Rightarrow$ volumen del enfriador; m^3

$$\rho_{agua} = \frac{\rho_{enf} \cdot V_{enf} \cdot g}{V_{agua} \cdot g} \quad (2.27)$$

donde:

$g \Rightarrow$ aceleración de la gravedad; m/s^2

$V_{agua} \Rightarrow$ volumen del agua; m^3

$\rho_{agua} \Rightarrow$ densidad del agua; kg/m^3

El peso del enfriador es:

$$W_{enf} = \rho_{enf} \cdot V_{enf} \cdot g \quad (2.28)$$

donde:

$\rho_{enf} \Rightarrow$ densidad del enfriador; kg/m^3

$V_{enf} \Rightarrow$ es el volumen del enfriador. El peso del volumen V_a del agua desalojada (o, lo que es lo mismo, del volumen de la parte sumergida del enfriador) es la fuerza de flotación.

$$F_b = \rho_{agua} \cdot V_{agua} \cdot g \quad (2.29)$$

donde:

$F_b = W_{enf}$, porque el enfriador está en equilibrio

de modo que:

$$\rho_{agua} \cdot V_{agua} \cdot g = \rho_{enf} \cdot V_{enf} \cdot g \quad (2.30)$$

usando las densidades calculadas,

$$\frac{V_{agua}}{V_{enf}} = \frac{\rho_{enf}}{\rho_{agua}} = \% \quad (2.31)$$

El volumen del agua desalojada V_a es el volumen de la porción sumergida del enfriador, de modo que el otro % del enfriador se halla expuesto sobre la superficie.

2.9 Evaluación del proceso de transferencia de calor a través del agua

Para evaluar la influencia del agua en el proceso de enfriamiento de mineral Góngora (2004), estableció la ecuación (2.32) en la cual se tiene en cuenta el modo de transferencia de calor del agua al aire.

$$\rho_{agua} \cdot C_{agua} \cdot A_{agua} dx \frac{\partial \theta_{agua}(x,t)}{\partial t} = C_{agua} \dot{m}_{agua} \theta_{agua}(x,t) - C_{agua} \dot{m}_{agua} \theta_{agua}(x+dx,t) + K_2(\theta_p - \theta_{agua})dx - K_4(\theta_{agua} - \theta_{aire})dx \quad (2.32)$$

donde:

$\rho_{agua} \Rightarrow$ densidad del agua; kg/m³

$C_{agua} \Rightarrow$ calor específico del agua; kJ/kg K

$A_{agua} \Rightarrow$ área ocupada por agua; m²

$\dot{m}_{agua} \Rightarrow$ flujo de agua; kg/s

$\theta_{agua}, \theta_{aire} \Rightarrow$ temperatura del agua y del aire; K

$K_4 \Rightarrow$ coeficiente superficial de transferencia de calor del agua al medio por unidad de longitud; W/m K

El calor específico del agua es mínimo a 35 °C y aumenta proporcionalmente cuanto más nos alejamos de esta temperatura. A temperatura ambiente la capacidad calorífica específica del agua es superior a la de cualquier líquido o sólido. La capacidad calorífica específica elevada del agua implica que ésta mantiene muy bien su temperatura o, lo que es lo mismo, que la pierde con gran dificultad, razones por las que se utiliza como medio efectivo de calentamiento o enfriamiento.

En otros casos, el calor suministrado se utiliza en la producción de un cambio de fase (sólido a líquido, líquido a gas). Generalmente estos cambios se producen a una temperatura determinada (temperatura de fusión, de ebullición. El calor latente se define

como la cantidad de calor que hay que suministrar a un gramo de sustancia para que ésta cambie totalmente de fase.

$C_p \Rightarrow$ a pesar de ser una función de la temperatura el calor específico del agua puede ser considerado constante dentro de ciertos intervalos. El error máximo que se comete al considerar el $C_p_{H_2O}$ constante es de 0,8%.

$$\frac{1 \text{ kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} = 4,1868 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

2.10 Balance de masa y energía

En este trabajo se evaluará a partir de un balance de masa y energía la equivalencia entre los calores que entran y salen del sistema. Una aplicación importante del calor y analogía de transferencia de masa es el enfriamiento evaporativo, que ocurre siempre que un flujo de gas fluye sobre un líquido.

La evaporación debe ocurrir de la superficie líquida y la energía asociada al cambio de la fase es el calor latente del líquido.

La evaporación ocurre cuando las moléculas líquidas cerca de la superficie experimentan colisiones que aumentan su energía, sobre eso necesitan superar la superficie obligatoria de unión (lazo).

La energía exigida para obtener la evaporación debe venir de la energía interior del líquido, que entonces debe experimentar una reducción en la temperatura. (efecto de enfriamiento).

Sin embargo, si las condiciones de mantener el estado son constantes, la energía latente perdida por el líquido debido a la evaporación debe ser llenado por el traslado de la energía del líquido.

La ecuación (2.33) describe el balance térmico del proceso en estudio:

$$Q_{trans.H_2O} = Q_{em} - (Q_{sm} + Q_{M.amb}) \quad (2.33)$$

El calor transferido al agua se determina por la ecuación (2.34).

$$Q_{trans.H_2O} = \dot{V}_{H_2O} \cdot C_{pH_2O} \cdot (t_{sH_2O} - t_{eH_2O}) \quad (2.34)$$

donde:

$\dot{V}_{H_2O} \Rightarrow$ flujo másico del agua; kg/s

$C_{pH_2O} \Rightarrow$ calor específico del agua; J/kgK

$t_{sH_2O} \Rightarrow$ temperatura de salida del agua de la piscina; K

$t_{eH_2O} \Rightarrow$ temperatura de entrada del agua a la piscina; K

Para determinar el calor que entra y que sale con el mineral se utiliza las ecuaciones

$$Q_{em} = \dot{m}_e \cdot C_{pm} \cdot t_{em} \quad (2.35)$$

$$Q_{sm} = \dot{m}_s \cdot C_{pm} \cdot t_{sm} \quad (2.36)$$

donde:

$\dot{m}_e = \dot{m}_s \Rightarrow$ flujo másico del mineral; kg/s

$t_{em} \Rightarrow$ temperatura de entrada del mineral; K

$t_{sm} \Rightarrow$ temperatura de salida del mineral; K

$C_{pm} \Rightarrow$ calor específico del mineral; J/kgK

$C_{pm} \Rightarrow$ constante para no tener en cuenta las fluctuaciones del mismo, en dependencia de la composición química del mineral y de su temperatura.

Las ecuaciones (2.33), (2.34), (2.35) y (2.36) dependen de las propiedades, parámetros del mineral y del agua de enfriamiento, pero para determinar la cantidad de calor transferida al medio ambiente es necesario tener en cuenta los métodos de transferencia de calor, en este caso convección.

Factores a considerar:

$\dot{V}_{H_2O} \Rightarrow$ flujo másico del agua

$t_{sup\ erf} \Rightarrow$ esta influye en la producción de mineral (t/h) y la t_{entrad} , y en las incrustaciones.

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio es necesario tener en cuenta la cantidad de calor que se transfiere por evaporación del agua. La energía exigida para la evaporación proviene de la energía interior del líquido que entonces trae consigo reducciones en la temperatura del mismo.

Aplicando la ley de conservación de energía a un control de superficie sobre el líquido, se obtiene la expresión (2.37).

$$q''_{conv} + q''_{add} = q''_{evap} \quad (2.37)$$

Si no hay ninguna suma de calor por otros medios, la ecuación (2.37) se reduce a un equilibrio entre la transmisión de calor por convección del gas y el calor perdido por evaporación desde el líquido representada en la ecuación (2.38).

$$q''_{conv} = q''_{evap} \quad (2.38)$$

donde:

$q''_{evap} \Rightarrow$ flujo de calor por evaporación

Este puede calcularse como el producto de flujo de masa de evaporado y el calor latente de vaporización, ecuación (2.39).

$$q''_{evap} = n''_A \cdot h_{fgv} \quad (2.39)$$

donde:

$n''_A \Rightarrow$ flujo de agua que se evapora; kg/s

$h_{fgv} \Rightarrow$ calor latente de vaporización; J/kg

El flujo de agua que se evapora se determina según la ecuación:

$$n''_A = h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.40)$$

donde:

$h_m \Rightarrow$ coeficiente de transferencia de masa; m/s

$\rho_{A,sat} \Rightarrow$ densidad del vapor de agua saturado a la temperatura de la superficie; kg/m³

$\rho_{A,\infty} \Rightarrow$ densidad del vapor de agua saturado a la temperatura del aire; kg/m³

El número de Sherwood es igual al gradiente de concentración adimensional de la superficie, y proporciona una medida de la transferencia de masa por convección de la superficie y se obtiene a través de la ecuación:

$$Sh = 0.0296 \cdot R_e^{\frac{4}{5}} \cdot S_C^{\frac{1}{3}} \quad (2.41)$$

donde:

$S_C \Rightarrow$ número de Schmidt

El número de Reynolds se determina a través de la ecuación:

$$R_{eD} = \frac{v_{aire} \cdot D_e}{\nu_{aire}} \quad (2.42)$$

donde:

$v_{aire} \Rightarrow$ velocidad del aire; m/s

$\nu_{aire} \Rightarrow$ coeficiente cinemático de viscosidad del aire; m²/s

La velocidad del aire la planta de Hornos de Reducción varia entre 0,2 y 2 m/s aproximadamente este fenómeno se puede apreciar con claridad en los anexos 2 y 3 respectivamente cuando el agua se evapora no ocurre un desplazamiento tan rápido.

Para el calcular el número de Schmidt se emplea la ecuación:

$$S_C = \frac{\nu_{aire}}{D_{AB}} \quad (2.43)$$

donde:

$\nu_{aire} \Rightarrow$ viscosidad cinemática; m²/s

$D_{AB} \Rightarrow$ coeficiente de difusión de masa; m²/s

Conociendo las ecuaciones (2.41), (2.42), (2.43), y a través de la ecuación (2.44) se puede determinar el coeficiente de transferencia de masa.

$$h_m = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L} \quad (2.44)$$

donde:

$L \Rightarrow$ longitud característica; m

El calor transmitido por convección del agua al aire se determina a través de la ecuación:

$$q''_{evap} = \alpha_{agua} (\theta_{agua} - \theta_{aire}) \quad (2.45)$$

donde:

$\alpha_{agua} \Rightarrow$ Coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio; W/m²K

Sustituyendo las ecuaciones (2.39) y (2.45) en la ecuación (2.38) y despejando el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al aire α_{agua} , se obtiene la ecuación (2.46).

$$\alpha_{agua} = \frac{h_{fg} \cdot h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty})}{(\theta_{agua} - \theta_{aire})} \quad (2.46)$$

Entonces el coeficiente de transferencia de calor a través del agua por unidad de longitud al medio se determina por la ecuación:

$$Q_{perma} = \alpha_{agua} \cdot A_{agua} \cdot (t_{aguapisc} - t_{aire}) \quad (2.47)$$



2.4 Conclusiones

1. En el presente capítulo quedó establecido el procedimiento de cálculo para realizar el balance de masa y energía en el proceso de enfriamiento de mineral.
2. Para la realización del balance se tuvo en cuenta los modos de transferencia de calor del agua al aire.
3. A partir de la ley de Arquímedes se determinó el % del enfriador que se halla expuesto sobre la superficie.
4. Se definen las principales propiedades de mineral que influyen en el proceso y los métodos para el ensayo de las mismas.

CAPITULO III

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

La incansable labor transformadora que realiza el hombre día a día para explotar al máximo los recursos naturales, acompañado del crecimiento de la población y el desarrollo acelerado de la economía han provocado consecuencias indeseables para la humanidad, entre las que se encuentran: el agotamiento de los recursos naturales, la contaminación ambiental, el ruido, la pérdida de los valores estéticos del medio circundante y la merma acelerada del fondo genético. Por tal motivo organizaciones políticas, sociales, científicas, estados y gobiernos de diferentes partes del mundo se han preocupado por tomar medidas que de una forma u otra estén dirigidas a garantizar un uso racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente. Toda inversión realizada en la industria contemporánea solo es posible si se justifica desde el punto de vista económico.

El **objetivo** del capítulo es: Obtener los resultados de los coeficientes de transferencia de calor expuestos en el capítulo anterior y desarrollar la valoración económica asociada al proceso de enfriamiento de mineral para las condiciones actuales y el análisis de las afectaciones provocadas por éste al medio ambiente, mediante los resultados experimentales obtenidos en el enfriador cilíndrico rotatorio.

3.2 Resultados

A partir de las ecuaciones (2.34), (2.35), (2.36) y (2.47) se obtienen los resultados de un balance térmico y de masa representados en la tabla (3.1), la equivalencia entre los calores que entran y salen del sistema para el balance de masa en los enfriadores.

Q_{perma}	$1.422 \cdot 10^5 W$	calor que entrega el agua al medio ambiente
Q_e	$9.696 \cdot 10^6 W$	calor que entrega el mineral a la entrada del enfriador
Q_s	$5.16 \cdot 10^6 W$	calor que entrega el mineral a la salida del enfriador
$Q_{trans} H_2O$	$4.394 \cdot 10^6 W$	calor que se transfiere al agua

Tabla 3.1 Resultados obtenidos del balance térmico.

Mediante el planteamiento de Arquímedes queda demostrado en la ecuación (2.34) que el enfriador esta expuesto sobre la superficie $2/3$ del volumen total. Donde el otro tercio se encuentra sumergido en la piscina.

En el gráfico 3.1 representado a continuación demuestra como a menor temperatura en la piscina por debajo de los 298 K hasta 348 K los la longitud del enfriador expuesta sobre la superficie se mantiene en los $2/3$ de su diámetro.

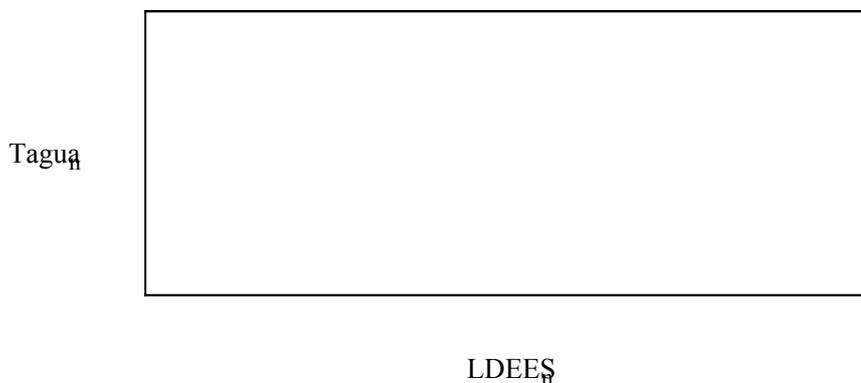


Gráfico 3.1 Comportamiento de la T_{agua_n} vs $LDEES_n$.

$LDEES_n$ – longitud del enfriador expuesto a la superficie.

En el gráfico 3.2 representado a continuación demuestra como la longitud del enfriador expuesta sobre la superficie se mantiene en los $2/3$ de su diámetro cuando la densidad del agua oscila en un valor de 997 hasta 974 kg/m^3 donde la temperatura de trabajo se mantiene en el rango de 298 hasta 348 K.

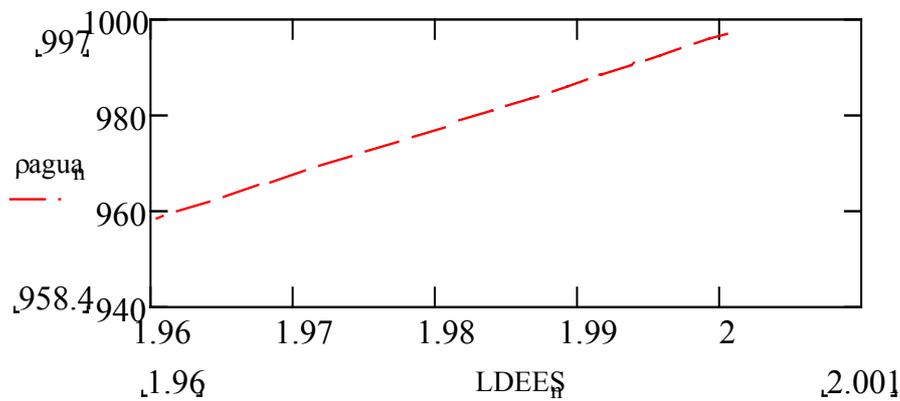


Gráfico 3.2 Comportamiento de la ρ agua_n vs LEESn.

En el gráfico 3.3 representado muestra como el calor específico aumenta considerablemente en un rango de 4.18 hasta 4.2 kJ/kgK a medida que aumenta la temperatura del agua. A pesar de esto como ya se planteó anteriormente este calor se puede tomar constante y solo se introduce un error de 0.8 %. Los datos de este gráfico se pueden apreciar en el anexo # 4.

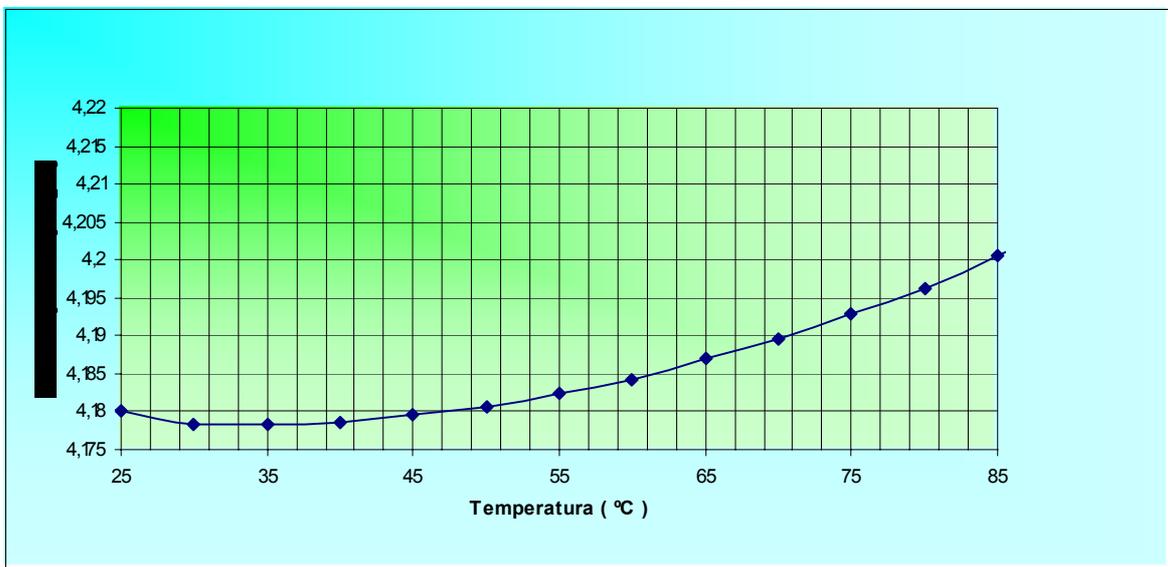


Gráfico 3.3 Comportamiento de la temperatura vs calor específico.

3.3 Valoración económica

La valoración técnica – económica del proceso de enfriamiento debe realizarse mediante el análisis de las pérdidas que existen actualmente en el sistema de tanque de contacto por ser en este donde tiene repercusión el proceso analizado, las cuales se clasifican en:

- Pérdidas por evaporación de amoniaco (NH_3)
- Pérdidas por mantenimiento no planificado.

Las temperaturas elevadas del mineral que salen del enfriador debido al deficiente proceso de enfriamiento provocan en la Planta de Lixiviación la evaporación del amoniaco, el cual en investigaciones realizadas se demuestra que existe una pérdida aproximada de 10.93 t/día. Considerando que el precio actual del amoniaco es 335.312 CUC/t, el daño económico para un año de trabajo continuo es 1337710.45 CUC.

El deterioro prematuro de algunos elementos y accesorios que componen el sistema de los tanques de contacto provocan las pérdidas por mantenimiento no planificado, este problema está dado porque el magnesio a altas temperaturas se hace soluble en la pulpa; se incrusta en las paredes de los tanques de contacto y en las tuberías por donde es transportado, las cuales se cambian cada dos o tres meses aproximadamente lo que genera pérdidas de 12570 CUC por cada tramo de tubería según estudios realizados por el personal de mantenimiento de la planta.

En los enfriadores el promedio mensual del consumo de agua es de 271 066 m^3 con un precio de 0,28 CUC el m^3 , para un promedio anual es de 3 252 790 m^3 lo que significa un costo de 910 781 CUC por año.

3.4 Impacto ambiental

En la fábrica Ernesto Che Guevara 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 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.

Los principales problemas detectados en relación con el medio ambiente en la planta de hornos comienzan en los silos.

En esta área se producen emanaciones de polvo principalmente por salideros en la parte superior de los silos (rajaduras), esto ocurre cuando los silos son llenados a máxima capacidad, esta contaminación afecta el área de trabajo. La limpieza que se realiza en esta parte es manual.

En esta planta la contaminación es provocada por salideros de mineral, en romanas, alimentadores, sinfines de polvo etc. El derrame de mineral cae a los pisos inferiores y este es eliminado mediante el soplado con aire (provocando contaminación en el área y en el exterior de la planta).

El derrame y salideros de mineral en la planta por los sellos de los transportadores, cae a la planta baja, este mineral se somete a la limpieza con agua y es trasladado por canales hacia tres pozos (uno para cada ocho hornos), mediante bombas la pulpa se envía hacia la canalización oeste de la fábrica, que lo descarga al río Moa (este residual contiene gran cantidades de sólidos y grasas) sin tratamiento previo.

Otro foco de contaminación es provocado por los salideros de grasas (escotillas, mirillas, cámaras, sellos de los transportadores), estos gases contienen CO_2 , H_2 , CO y son expulsado a la atmósfera y al área de trabajo.

Los gases de la planta son ventilados hacia secaderos y parte oeste de la planta, cuando cambia el sentido del aire estos gases afectan la fábrica en general y áreas aledañas.

El agua en la piscina de los enfriadores se contamina con polvo y grasa por los salideros de los sellos del enfriador del mineral y por las grasas de la transmisión del mismo que necesita para su movimiento. También puede ser afectada por las rajaduras del shell lo cual permite la entrada de agua al interior del mismo y esto provoca la contaminación de la misma. Otra afectación que provoca este equipo es la salida del mineral a una temperatura por encima de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ que trae consigo la evaporación del licor fresco hacia la atmósfera en la sección de contacto.

En la planta la contaminación del aire por el polvo reduce la visibilidad resultante de absorción y dispersión de la luz por los materiales líquidos y sólidos arrastrados por el aire. La visibilidad se altera por las partículas que se forman en la atmósfera, por las reacciones en las partes gaseosas. Su reducción no solo resulta desagradable para el individuo, sino que puede sufrir fuertes efectos psicológicos. Además se presentan algunos peligros que afectan la seguridad.

➤ **Efectos de las partículas (en el aire) sobre la salud humana**

Las partículas, solas o en combinación con otras contaminantes representan un peligro muy grave para la salud. Los contaminantes entran principalmente al cuerpo humano por las vías respiratorias, los daños pueden presentarse directamente, ya que se ha estimado que el 50 % de las partículas que penetran a las cavidades pulmonares se depositan en el mismo.

➤ **Influencia del polvo en el medio ambiente**

Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad, además de la luz solar las partículas en suspensión adsorben la luz producida por medio artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración de partículas, pero así mismo influye el tamaño de estas. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetros comprendido entre 0.1 a 1 μm .

Estas influyen sobre los materiales, entre los efectos que pueden tener sobre estos tenemos:

- Abrasión: realizadas por aquellas partículas de mayor tamaño y dotadas de elevada velocidad (efecto de pequeña incidencia).
- Ataque químico: puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente, tras el efecto de abrasión realizado por las partículas.

Los efectos que producen sobre la vegetación pueden considerarse como muy pequeños y prácticamente inexistentes. Tan solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas.

La partícula de tamaño superior a $5 \mu m$ de diámetro quedan retenida en los bellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la traquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0.5 y $5 \mu m$ son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí a que en la mayoría de los caso sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

Las partículas sólidas de pequeño tamaño generalmente menores de $10 \mu m$ de diámetro, son de gran importancia porque dado su tamaño permanecen en el aire antes de sedimentarse.

Efectos tóxicos:

1. Pueden ser intrínsecamente tóxicas por las características inherentes químicas.
2. Pueden interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.
3. Puede actuar como un conductor de una sustancia tóxica absorbida en su superficie.

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, etc.

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 alérgicos: 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.

Cobalto: Presenta propiedades dañinas sobre el riñón, también se le atribuyen la aparición de dermatitis por ser altamente irritante.

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.

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.

Impactos Ambientales generados por la planta Hornos de Reducción

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

Medidas para mitigar estos efectos

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

3.5 Conclusiones

1. Mediante las mediciones Tomadas del CITEC programa en funcionamiento en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se realizó un balance térmico y de masa en el enfriador # 5 donde entran $9.696 \cdot 10^6 W$ en forma de calor, $4.394 \cdot 10^6 W$ se transfiere al agua de la piscina, $1.422 \cdot 10^5 W$ se transfiere al medio exterior por ebullición y $5.16 \cdot 10^6 W$ sale con el mineral hacia el proceso de Lixiviación.
2. En la planta de Hornos de Reducción se procesan actualmente grandes volúmenes de mineral, debido a esto existe una elevada contaminación al medio ambiente (los factores que mas se destacan son el ruido y el polvo).
3. Las altas temperaturas del mineral a la salida del proceso de enfriamiento repercuten negativamente en la planta de Lixiviación y Lavado, destacándose las perdidas por evaporación de amoniaco en los tanques de contacto.



CONCLUSIONES GENERALES

1. La bibliografía consultada no muestra criterios sobre la influencia de las propiedades del agua en el proceso de enfriamiento.
2. No se encontraron ecuaciones matemáticas que describan el comportamiento de las propiedades del mineral en el rango de 100 a 800 °C.
3. Aún no se cuenta en el territorio nacional con laboratorios que determinen la propiedades termo – físicas de sustancias multicomponentes.



RECOMENDACIONES

1. Realizar un nuevo estudio teniendo en cuenta el nivel del agua en la piscina.
2. Continuar la búsqueda de ecuaciones que describan el comportamiento de las propiedades, densidad, calor específico, peso específico y conductividad térmica del mineral reducido a partir de otras propiedades.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Boateng, A. A; Barr, P.V. *Granular flow behaviour in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder*. Journal of Fluid Mechanics, January 10, 1997 vol. 330 pp. 233-249.
2. Boateng, A. A; Barr, P.V. *Modelling of particle mixing and segregation in the transverse plane of a rotary klin*. Chemical Engineering Science, September 1996 vol. 51 pp. 4167-4181.
3. Burmeister, L. C., *Convective Heat Transfer*, Wiley Interscience, New York, 1983.
4. Bui, R. T. *Computational modelling of thermophysical processes in the light metals industry*. Reveu Generale de Termique, Septiembre 1997 vol. 36 pp. 575-591.
5. Cala, E *Estudio del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios horizontales como objeto de modelación matemática*. Tesis de grado. ISMMANJ. Moa. 2005. 71p.
6. Columbié, A. *Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2001. 98p.
7. Chang, A. *Una Visión Sobre las Reservas Estratégicas de Eficiencia Metalúrgica en la Tecnología Carbonato-Amoniaca*. Minería y Geología. 16 (1):13 – 19, 1999.
8. Conde, E. *Termodinámica Técnica*. La Habana: Editorial "Felix Varela, 1994. Tomo I.
9. Correa, N. *Balance energético en el enfriador de mineral en la planta de Hornos de reducción de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Ramón, Gonzáles Marrero. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 2000. 43p.
10. Detkov S. P. *Movimiento del mineral en horno rotatorio*; Revista Ts. M 1980. No.11, pp 54-57.
11. Evaporación del agua. <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/pregunta/p-7.htm>. Junio 2004.
12. Faires, V. *Termodinámica*. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
13. Góngora E. *Modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento de mineral en cilindros rotatorios de la Planta Hornos de Reducción de la Empresa Cdte. Ernesto Che Guevara*. Tesis de Maestría. ISMMANJ. Moa. 2004. 83p.



14. Guzmán D. *Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa, Cuba. 2001. 124p.
15. Glasstone, S. *Termodinámica para químicos*. Tomado de la edición española Ediciones Aguila, Madrid, 1977.
16. Halliday, D; Resnick, R; Krane, K. *Física. Volumen I. Tomo II*. La Habana: Editorial Félix Varela, 2003.
17. Houge, O; M, Watson; R. A. Ragatz. *Principios de los procesos químicos*. T.I. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1978.
18. Hurtado, F. G. *Estudio de la Influencia en el Medio Ambiente del Sistema de Generación de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara y el Sistema de Transmisión Eléctrico Adyacente*. Tesis doctoral. ISMM, Moa. 1999. 120p.
19. Incropera, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Tercera edición. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 2003 Tomo I, II. III.
20. Khakhar, D. V.; McCarthy, J. J.; Ottino, J. M. *Radial segregation of granular mixtures in rotating cylinders*. *Physics of Fluids*, December 1997 vol. 9 pp.3600-3614.
21. Lago de Plachco, M; H, Lucena. *Fenómenos de Transferencia de Masa, Calor y Momentum*. <http://web.tampabay.rr.com/iq/transferencia.htm>.
22. Manual de Operaciones de la planta Hornos de Reducción de la empresa Comandante "Ernesto Che Guevara", 1985. 219 p.
23. Marrero Ramírez S. *Algoritmos y sistemas de control del proceso de reducción del mineral laterítico en hornos de soleras múltiples*. Tesis doctoral. San Petersburgo. 1989.
24. Mijiev., Mijjeiva. *Fundamentos de termotransferencia*. Editorial Mir, 1979.
25. Mesarovich, M. *Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas*. Editorial MIR. URSS, pp. 422-436, 1996.
26. Montadas, K. *Estudio de la atmósfera dentro de los enfriadores de los hornos de reducción*. José, Oriol Rodríguez. Trabajo de Diploma. Moa: ISMM, 1991. 55p.
27. Nukiyama, S., "The maximum and minimum values of the heat transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure" J. Japan Soc. Mech. Eng., 37,367, 1934 (Translation: Int. J. Heat Mass Transfer, 9, 1419), 1966.



28. Perron, J. and R. T. Bui, "Fours rotatifs: *Modele dynamique du mouvement du lit*", Can. J. Chem. Eng. 72, 16-25 (1994).
29. Periodico Granma, Habana, Marzo 2006
30. Rabell González, D., Morales Morales Y. Evaluación de los enfriadores de mineral de la Empresa Comandante "Ernesto Che Guevara". Manuel Valle Matos. Trabajo de Diploma. Santiago de Cuba: UO, 1998. 65p.
31. Retirado, Y. *Modelación matemática del proceso de enfriamiento del mineral laterítico en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara*. Tesis de Grado. ISMMANJ. Moa. 2004.
32. Rioshkevich A. S, A. M Podkorbinsky, M. M Rejnik. *Modelo matemático de la transferencia de calor y de masa para la tostación de menas oxidadas de níquel en hornos rotatorios*. *Revista Ts.M.*, 1979, No. 6 pp. 11-15.
33. Rohsenow, W. M., M "A meted of correlatin heat transfer data for superface boiling liquids". Trans. ASME, 74, 969, 1952.
34. Sai, P. S.T., G. D. Surender and A. D. Damodaran, "Predicction of axial velocity profiles and solid hold-Up in a rotary klin", Can. J. Chen. Eng. 70, 438-44 (1992).
35. Sverdlik G. I. Gregoreu G. G. *Peculiaridades del paso del movimiento de materials en un tambor rotatorio a un régimen de cataratas*. *Revista Ts.M.* 1979. No.1pp.9-12.
36. Torres, E. *Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico*. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2003. 105p.
37. Transferencia de calor. <http://www.ramos.ut fsm.cl/pqui/tcalor/>. Junio 2007.
38. Transferencia de calor. <http://www.cca.org.mx/dds/web/ventana/ligas/nlaboratorio10.htm>. Junio 2007.
39. Transmisión de calor por convección correlaciones para la convección natural. <http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/14.pdf>. Junio 2007.

ANEXOS

Anexo # 2 Vista frontal del enfriador.



Anexo # 3 Vista superior del enfriador.

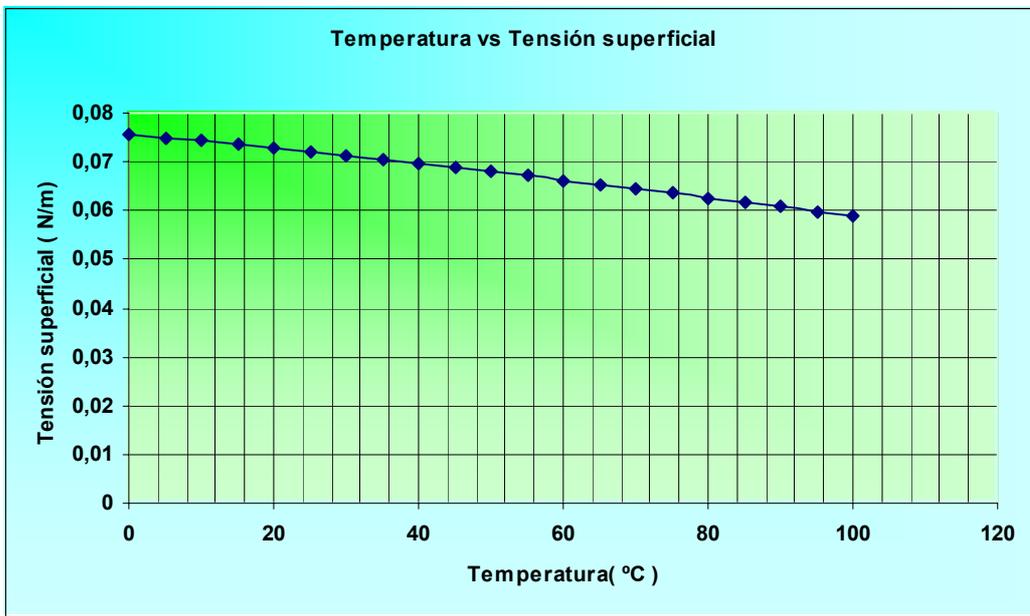
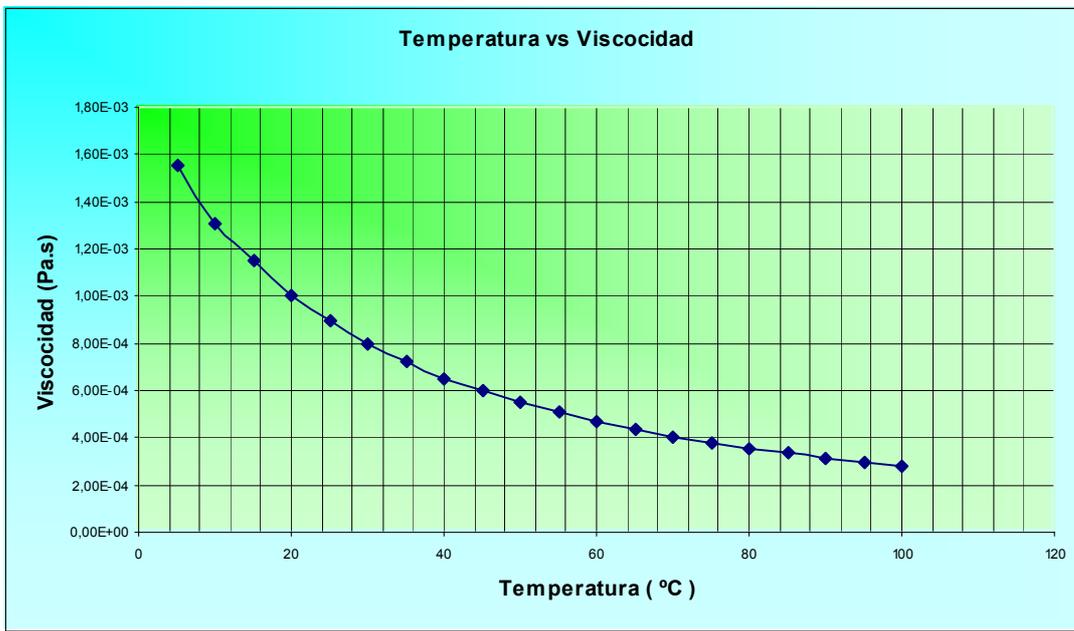


Anexo # 4 Propiedades del agua a diferentes temperaturas.

Temperatura	Densidad	Calor específico	Viscosidad	Tensión superficial
t	ρ agua	Cp	∞	σ agua
(°C)	(kg/m ³)	(kJ/kg.K)	(Pa.s)	(N/m)
0	999,8	4,2176	1,79E-03	0,07564
5	1000	4,2076	1,55E-03	0,074935
10	999,7	4,1976	1,31E-03	0,07423
15	999,1	4,1897	1,15E-03	0,07349
20	998,2	4,1818	1,00E-03	0,07275
25	997	4,1801	9,00E-04	0,071975
30	995,6	4,1784	7,98E-04	0,0712
35	994,1	4,17845	7,25E-04	0,0704
40	992,2	4,1785	6,53E-04	0,0696
45	990,2	4,17955	6,00E-04	0,06877
50	988,1	4,1806	5,47E-04	0,06794
55	985,7	4,18245	5,07E-04	0,06709
60	983,2	4,1843	4,67E-04	0,06624
65	980,6	4,1869	4,35E-04	0,065355
70	977,8	4,1895	4,04E-04	0,06447
75	974,9	4,1929	3,79E-04	0,06357
80	971,8	4,1963	3,54E-04	0,06267
85		4,20065	3,34E-04	0,061735
90	965,3	4,205	3,15E-04	0,0608
95		4,21045	2,98E-04	0,059855
100	958,4	4,2159	2,82E-04	0,05891

Fuente: <http://www.ucm.es/info/Geofis/practicas/propiedades%20agua.pdf>.

Anexo # 5 Comportamiento de la Viscosidad vs Temperatura.



Anexo # 6 Comportamiento de la Tensión superficial vs Temperatura.