

# Coeficientes de transferencia de calor en enfriadores de mineral laterítico a escala piloto

Ever Góngora Leyva<sup>1</sup> [egongora@ismm.edu.cu](mailto:egongora@ismm.edu.cu)  
Marbelis Lamorú Urgellés<sup>1</sup> [mlamoru@ismm.edu.cu](mailto:mlamoru@ismm.edu.cu)  
Ángel Oscar Columbié Navarro<sup>1</sup> [acolumbie@ismm.edu.cu](mailto:acolumbie@ismm.edu.cu)  
Yoalbys Retirado Medianeja<sup>1</sup> [yretirado@ismm.edu.cu](mailto:yretirado@ismm.edu.cu)  
Ángel Legrá Legrá<sup>2</sup> [alegra@ceinniq.moa.minbas.cu](mailto:alegra@ceinniq.moa.minbas.cu)  
Yudmila Spencer Rodríguez<sup>3</sup>

## Resumen

En la Planta de Hornos de Reducción de la empresa niquelera Ernesto Guevara las elevadas temperaturas del mineral reducido a la salida de los enfriadores (*coolers*) afectan el desarrollo eficiente del proceso de lixiviación. Se realizó una investigación, a escala piloto, en los enfriadores de mineral reducido con el fin de evaluar el comportamiento de los parámetros de transferencia de calor que caracterizan el proceso; para ello se registraron los valores de temperatura del agua y del flujo y la temperatura del mineral, tanto a la entrada como a la salida de la instalación, para valores de flujos de 10 y 19 l/min. Como resultado se obtuvo el procedimiento de cálculo para determinar los coeficientes superficiales de transferencia de calor por unidad de longitud. Se encontró que en los enfriadores de mineral reducido predominan la conducción y radiación del mineral a la pared interior del cilindro cubierta por el sólido así como la convección y evaporación del agua al medio que permite dirigir las acciones hacia estos elementos para aumentar la eficiencia de la instalación.

## Palabras clave

Coeficientes de transferencia de calor, enfriadores, lixiviación, mineral reducido.

---

Recibido: septiembre 2008 / Aceptado: enero 2009

<sup>1</sup> Instituto Superior Minero Metalúrgico, Las Coloradas s/n, Moa, Holguín, Cuba

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones del Níquel.

<sup>3</sup> Sede Universitaria Moa.

# Pilot scale heat transfer in ore slurry coolers

## Abstract

The Ernesto Guevara Plant leaching process is being significantly impacted due to high temperatures of roasted ore at the cooler outlet in the roasting furnace area. A pilot scale survey was conducted on the ore slurry coolers to evaluate the behavior of heat transfer parameters that are characteristic to the process. Measurements of the temperature of the fluid, water and ore slurry were taken at the cooler inlet and outlet, for a flowrate of 10 and 19 l/min. As a result, a procedure was developed for the calculation of the surface heat transfer rates per unit of length. It was found that ore conduction and radiation are predominant on the internal wall of the cylinder; which is covered by solids, in addition to convection and water evaporation to the environment. With this identified, the actions will be directed at correcting these issues so as to increase the efficiency of the plant.

## Key words

Heat transfer coefficient, leaching, ore slurry coolers, roasted ore.

## INTRODUCCIÓN

En la industria cubana del níquel se emplean enfriadores cilíndricos rotatorios, en los cuales el mineral laterítico, una vez reducido, es enfriado desde de los 750°C hasta valores entre 150 y 200°C, temperatura requerida para el proceso de lixiviación; sin embargo, desde su puesta en explotación, los enfriadores de la Planta de Hornos de Reducción no logran llevar hasta los valores deseados la temperatura del mineral, superando los 200°C. Ingenieros e investigadores se han dedicado a la solución de este problema y aunque algunas dificultades de la industria han sido solucionadas mediante la modelación matemática (Guzmán, 2000; Torres, 2007), hasta hoy no se reportan resultados referidos a la modelación físico-matemática del proceso de enfriamiento.

Columbié (2000) propone un modelo matemático en derivadas parciales para la evaluación de un calcinador que, siendo también un cilindro horizontal rotatorio, se diferencia considerablemente del enfriador de mineral. Por otra parte, Valle (2000a, 2000b) se aproxima algo al estudio de estos equipos y da una visión de los problemas existentes en los enfriadores de mineral, proponiendo algunas modificaciones para aumentar la capacidad de enfriamiento de la instalación, así como una metodología de cálculo; expone, además, los resultados obtenidos en cuatro corridas experimentales de evaluación de un enfriador.

Con el objetivo de profundizar en los complejos fenómenos que tienen lugar durante el enfriamiento del mineral en cilindros horizontales rotatorios, Góngora (2007) propone un modelo matemático que describe el comportamiento del mismo y para su validación es necesario determinar los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud que caracterizan el proceso. Atendiendo a lo difícil que resulta experimentar en el enfriador de mineral a escala industrial, se determinan los coeficientes de transferencia de calor del proceso de enfriamiento en cilindros horizontales rotatorios, a escala piloto.

### Análisis del proceso de enfriamiento

Se utilizó el enfriador de mineral, a escala piloto, instalado en el Centro de Investigaciones del Níquel (CEINNIQ) Capitán "Alberto Fernández Montes de Oca", el cual es un equipo de transferencia de calor dispuesto horizontalmente, con carros raspadores y paletas en su interior que remueven el mineral y limpian la superficie interior del cilindro, evitando así que el mineral se adhiera e interfiera en la transferencia de calor entre éste y la superficie del enfriador.

En este proceso están presentes los tres modos de transmisión del calor (conducción, convección y radiación). El mineral descargado en el enfriador, a una temperatura entre 350 y 400°C, le transfiere calor por conducción, convección y radiación a la superficie interior del tambor, predominando la transferencia por conducción debido al contacto sólido-sólido (en este caso mineral-enfriador). También se transfiere calor por convección debido a la presencia de gases de combustión que acompañan al mineral hasta el interior del cilindro. A través del espesor del enfriador, 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 en que el mineral está en contacto con la pared del tambor. Luego, desde la superficie exterior del enfriador, este intercambia calor por convección con el agua de la ducha que se encuentra bajo condiciones atmosféricas, dando lugar al calentamiento progresivo de la misma hasta valores entre 40 y 55°C, formando una pequeña película de agua; posteriormente ocurre la transferencia de calor del agua al aire por convección y evaporación (Figura 1).

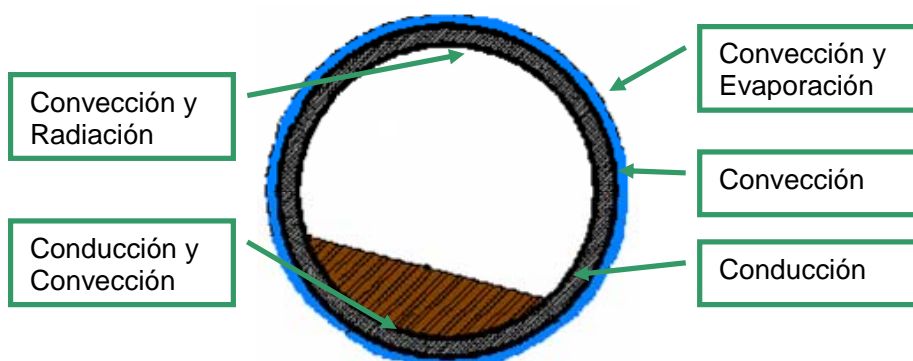


Figura 1. Modos de transferencia de calor durante el enfriamiento del mineral.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Procedimiento de cálculo para la evaluación del proceso de enfriamiento

Tomando como referencia el procedimiento establecido por Góngora (2007), conformado por tres ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que caracterizan el proceso de transferencia de calor en cilindros rotatorios horizontales enfriados con agua, se obtiene la expresión matemática (1) que servirá como ecuación de balance para el mineral laterítico reducido:

$$-\rho C A dx \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = -C \dot{m}[T(x,t) - T(x+dx,t)] + K_1 dx [T(x,t) - T_p(x,t)] \quad (1)$$

Donde:

$\rho$  - Densidad del mineral; kg/m<sup>3</sup>

$C$  - Calor específico del mineral; kJ/(kgK)

$A$  - Sección transversal del sólido; m<sup>2</sup>

$T$  - Temperatura del mineral; K

$\dot{m}$  - Flujo de mineral; kg/s

$T_p$  - Temperatura de la pared; K

$K_1$  - Coeficiente superficial de transferencia de calor del sólido a la pared por unidad de longitud; W/(mK)

En la expresión (1) el miembro izquierdo caracteriza la velocidad de variación de la temperatura en el tiempo del elemento del material (mineral)  $dx$ ; el primer miembro de la derecha relaciona el calor que entra con el flujo de material al elemento  $dx$  y el calor que sale con el material; el segundo es el calor entregado por el mineral a la pared del cilindro.

El área de la sección transversal del mineral se determina según la expresión (2), desarrollada por Columbié (2000).

$$A = \frac{2}{3} R_{\text{int}}^2 \cdot \beta^3 \quad (2)$$

Siendo:

$R_{\text{int}}$  - Radio interior del cilindro; m

Para ello es necesario determinar el ángulo ( $\beta$ ), mostrado en la Figura 2, según la ecuación (3).

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{3\dot{m}}{2 \cdot R_{int}^2 \cdot \rho \cdot V_m}} \quad (3)$$

Donde:

$V_m$  - Velocidad del mineral; m/s

$\beta$  - ángulo con respecto al diámetro vertical y al área ocupado por el mineral; grados.

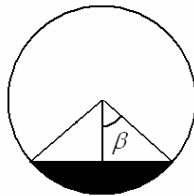


Figura 2. Representación del ángulo con respecto al diámetro vertical y al área que ocupa el mineral dentro del cilindro.

Alepuz (1997) determina el tiempo de residencia y su distribución en hornos de calcinación y Peña (2006) determina el tiempo medio de residencia del flujo en un reactor continuo a través del método de Simpsons. La velocidad del sólido por el interior del cilindro se puede determinar a través de la relación entre el tiempo de retención y la longitud del cilindro pero, debido a limitaciones existentes, se propone calcular la velocidad del sólido a través de la ecuación (4), referenciada por Chang (1997).

$$V_m = 5,78 D_i \cdot \varphi \cdot n \quad (4)$$

Donde:

$\varphi$  - Ángulo de inclinación del cilindro; grados

$D_i$  - Diámetro interior del enfriador; m

$n$  - Velocidad de rotación; rpm

Para la determinación del coeficiente es necesario tener en cuenta los modos de transferencia de calor presentes en el enfriador de mineral. El calor del sólido a la pared se transmite por conducción y radiación del sólido a la pared

cubierta por el mineral y a la pared descubierta se le transmite por convección y radiación. Para el primer caso el coeficiente de transferencia de calor puede definirse por la ecuación (5), según Góngora (2004).

$$h_{pcs} = k\sqrt{C \cdot K_m \cdot \gamma \cdot n} + \sigma \cdot \frac{\xi_s \cdot \xi_p}{\frac{1}{\xi_s} + \frac{1}{\xi_p} - 1} \cdot \frac{(T^4 - T_p^4)}{(T - T_p)} \quad (5)$$

Donde:

$k$  - Coeficiente de no-uniformidad de la temperatura del mineral (adimensional).

$K_m$  - Conductividad térmica del mineral; W/(m K)

$\sigma$  - Constante de Stefan-Boltzman;  $5,67 \cdot 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$\gamma$  - Masa (a granel) del mineral; kg/m<sup>3</sup>

$\xi_p$ ;  $\xi_s$  - Emisividad de la pared y el sólido respectivamente (adimensional).

$h_{pcs}$  - Coeficiente de transferencia de calor del sólido a la pared cubierta por el mineral; W/(m<sup>2</sup> K)

Para el segundo caso, donde se transmite el calor por convección y radiación del sólido a la pared descubierta, el coeficiente de transferencia de calor puede definirse por la ecuación (6)

$$h_{pds} = 4,36 \cdot \frac{\lambda_g}{D_i} + \sigma \cdot \xi_s \cdot \xi_p \cdot \frac{[T^4 - T_p^4]}{T - T_p} \quad (6)$$

Siendo:

$h_{pds}$  - Coeficiente de transferencia de calor del sólido a la pared no cubierta por el mineral; W/(m<sup>2</sup> K)

$\lambda_g$  - Conductividad térmica del fluido; W/(m K)

Para calcular el coeficiente superficial de transferencia de calor del sólido a la pared por unidad de longitud del cilindro se emplea la ecuación (7), que tiene en cuenta los coeficientes de transferencia de calor del sólido a la pared no cubierta y cubierta por el mineral y sus respectivas áreas de transferencia de calor, según Columbié (2000).

$$K_l = h_{pcs} \cdot \frac{2\pi D_i \cdot \beta}{360^\circ} + h_{pds} \cdot \pi \cdot D_i \cdot \left(1 - \frac{2\beta}{360^\circ}\right) \quad (7)$$

Luego la expresión (1) se transforma en la ecuación (12)

$$\rho C A \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} + C \dot{m} \left( \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) = K_1 T(x,t) - K_1 T_p(x,t) \quad (8)$$

Del balance térmico para la pared, según la ecuación diferencial de la conducción se obtiene la expresión (9).

$$C_p M_p \frac{\partial T_p}{\partial t} + C_p M_p a \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} = -K_1 (T - T_p) - K_2 (T_p - T_{agua.}) \quad (9)$$

Donde:

$C_p$  - Calor específico de la pared; kJ/(kg K)

$a$  - Coeficiente de difusividad térmica; m<sup>2</sup>/s

$T_{agua}$  - Temperatura del agua; K

$M_p$  - Masa de la pared; kg/m

$K_2$  - Coeficiente superficial de transferencia de calor de la pared del enfriador al agua por unidad de longitud; W/(m K)

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor se tienen en cuenta los modos de transferencia de calor: conducción y convección, resolviéndose a través de la ecuación (10).

$$K_2 = \frac{l}{\frac{l}{\ln \frac{R_{ext}}{R_{int}}} + \frac{l}{2\pi \cdot \bar{h}_{agua} \cdot R_{ext}}} \quad (10)$$

$$\frac{1}{2\pi \cdot K_{mat}}$$

Donde:

$K_{mat}$  - Conductividad térmica del material del enfriador; W/(m K)

$\bar{h}_{agua}$  - Coeficiente de transferencia de calor por convección de la pared al agua; W/(m<sup>2</sup>K)

$R_{ext}$  - Radio exterior del cilindro; m



Para la solución de la ecuación (10) se debe calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección al agua  $\bar{h}_{agua}$  a través de la ecuación (11). En este caso, considerando que el enfriador se mueve a baja velocidad y que es éste quien le transmite el movimiento al fluido, se asume que la velocidad del agua es aproximadamente igual a la del enfriador, correspondiendo con la conclusión más importante referida a la velocidad para la convección en flujo de Couette donde, según Incropera *et al.* (2003) el movimiento del fluido es en una sola dirección en flujo paralelo, que involucra planos estacionarios y en movimiento, separados por una distancia  $L$ , con el espacio intermedio ocupado por un fluido incompresible.

Sin embargo, en el flujo de Couette, el movimiento del fluido no está determinado por el gradiente de presión,  $\partial p / \partial x$ , sino por una fuerza externa proporcionada a causa del movimiento del plano superior relativo al plano inferior. Las constantes  $C$  y  $m$ , correspondientes a la ecuación (11), se buscan en correspondencia con el valor del número de Reynolds.

$$\bar{h}_{agua} = \frac{\lambda_{agua} \cdot \left( C \cdot Re_D^m \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \right)}{D_e} \quad (11)$$

Donde:

$\lambda_{agua}$  - Conductividad térmica del agua; W/(m K)

$C$  y  $m$  - Constantes para flujo por el exterior de cilindros; adimensionales

$Pr$  - Número de Prandtl

$D_e$  - Diámetro exterior del enfriador; m

Obtenido  $\bar{h}_{agua}$  se sustituye en la ecuación (10) para calcular el coeficiente de transferencia de calor a través de la pared del cilindro por unidad de longitud. Luego, la ecuación (9) se transforma en la ecuación (12)

$$C_p M_p \frac{\partial T_p}{\partial t} + C_p M_p a \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + K_3 T_p = K_1 T + K_2 T_{agua} \quad (12)$$

Donde:

$$K_3 = K_1 + K_2 \quad (13)$$

$K_3$  – Coeficiente global de transferencia de calor; W/(m K).

Del balance térmico para el agua, según la ecuación diferencial de la conducción, resulta la ecuación (14).

$$\rho_{agua} \cdot C_{agua} \cdot A_{agua} \cdot dx \frac{\partial \theta_{agua}(x,t)}{\partial t} = \left[ C_{agua} \dot{m}_{agua} \theta_{agua}(x,t) - C_{agua} \dot{m}_{agua} \theta_{agua}(x+dx,t) \right] + \left[ K_2(\theta_p - \theta_{agua})dx - K_4(\theta_{agua} - \theta_{aire})dx \right] \quad (14)$$

donde:

$\rho_{agua}$  - Densidad del agua; kg/m<sup>3</sup>

$C_{agua}$  - Calor específico del agua; kJ/(kg K)

$A_{agua}$  - Área ocupada por agua; m<sup>2</sup>

$\dot{m}_{agua}$  - Flujo de agua; kg/s

$\theta_{agua}$ ,  $\theta_{aire}$  - Temperatura del agua y del aire; K

$K_4$  - Coeficiente superficial de transferencia de calor del agua al medio por unidad de longitud; W/m K

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor a través del agua por unidad de longitud al medio se utiliza la ecuación (15).

$$K_4 = h_{evp.agua} \cdot A_{agua} \quad (15)$$

Donde:

$h_{evp.agua}$  - Coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio; W/m<sup>2</sup>K

$A_{agua}$  - Área que ocupa el agua; m

La ecuación (16) se utiliza para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua al medio  $h_{evp.agua}$  y para ello es necesario tener en cuenta la cantidad de calor que se transfiere por evaporación del agua.

$$h_{evp.agua} = \frac{h_{fg} \cdot h_m (\rho_{A,sat} - \rho_{A,\infty})}{(T_{agua} - T_{aire})} \quad (16)$$

Donde:

$h_m$  - Coeficiente de transferencia de masa; m/s

$\rho_{A,sat}$  - Densidad del vapor de agua saturado a la temperatura de la superficie; kg/m<sup>3</sup>

$\rho_{A,\infty}$  - Densidad del vapor de agua saturado a la temperatura del aire; kg/m<sup>3</sup>

$h_{fgv}$  - Calor latente de vaporización; kJ/kg

La energía exigida para la evaporación proviene del interior del líquido lo que trae consigo reducciones en la temperatura del mismo. Como el proceso analizado no posee ninguna fuente de calor externa y no se desarrolla en las condiciones de estado estacionario, se reduce a un equilibrio entre la transmisión de calor por convección del gas y el calor perdido por evaporación desde el líquido. Estas simplificaciones son frecuentes en los cálculos de ingeniería y son recomendadas por diferentes investigadores (Kern, 1999; Isachenko *et al.*, 1979; Incropera *et al.*, 2003) para las condiciones antes descritas.

De la ecuación (14) se obtiene la (17):

$$(17)$$

donde:

$$K_5 = K_2 + K_4 \quad (18)$$

De esta manera quedó establecido el procedimiento de cálculo para la evaluación térmica del objeto de estudio. Los criterios considerados

para el establecimiento del procedimiento de cálculo le confieren al mismo una exactitud superior a la lograda en los establecidos con anterioridad y permiten la evaluación satisfactoria del comportamiento térmico del enfriador.

### Técnica experimental

El proceso de enfriamiento del mineral en el Centro de Investigaciones del Níquel *Alberto Fernández Montes de Oca* mide y registra con ayuda de un autómatas programable los principales parámetros que, desde el punto de vista metalúrgico, se consideran importantes para el proceso, luego la señal se envía al ordenador del panel de control y mediante el uso del programa EROS se almacena el valor de las variables. A continuación se enumeran los parámetros registrados, los correspondientes instrumentos de medición y las características técnicas de los mismos:

1. Flujo de mineral alimentado al horno: Banda transportadora CB-3 (pesa).
2. Temperatura del mineral: Termo resistencia PT-100
3. Velocidad de rotación del enfriador: Tacogenerador.
4. Flujo de agua: Rotámetro
5. Temperatura de la superficie del enfriador: Termocámara, Modelo FLUKE

En la instalación todos los instrumentos están normalizados y certificados por la NC 17025 de acreditación de instrumentación de laboratorio.

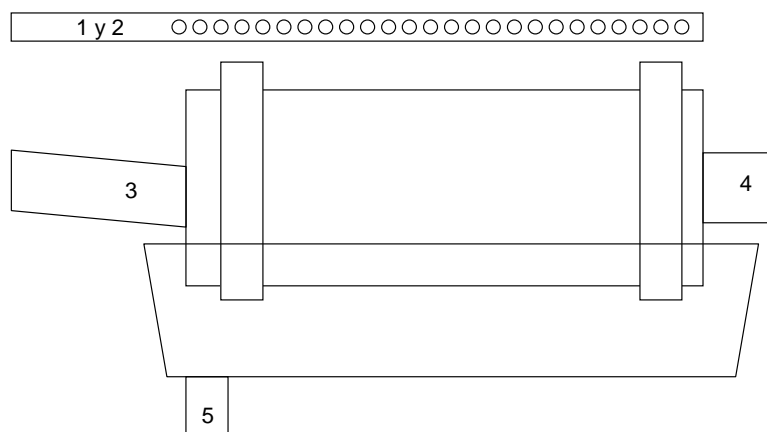


Figura 3. Puntos de medición de los parámetros del proceso de enfriamiento

La Figura 3 muestra los puntos de medición de los parámetros que intervienen en el proceso de enfriamiento; en 1 y 2 se mide el flujo y la temperatura del agua a la entrada de la ducha, en 3 y 4 la temperatura a la que entra y sale el mineral respectivamente y en 5 se mide la temperatura a la que sale el agua después de absorber parte del calor entregado por el mineral. El punto de medición del flujo de mineral no se señala en el esquema porque se registra a la entrada del horno.

Para efectuar los cálculos se utilizaron los valores medios de los datos obtenidos durante la realización de los experimentos y para ello se realizó un análisis estadístico descriptivo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores resultantes del análisis estadístico descriptivo de los parámetros que intervienen en el proceso de enfriamiento se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen estadístico descriptivo de los parámetros fundamentales del proceso de enfriamiento

	Flujo		Temperatura Entrada (°C)		Temperatura Salida (°C)	
	Agua (l/min)	Mineral (kg/h)	Mineral	Agua	Mineral	Agua
Media	14,50	619,47	325,01	26,13	50,59	76,44
Error típico	0,44	1,83	2,77	0,05	0,18	1,30
Mediana	14,50	618,41	322,66	26,50	51,00	75,28
Moda	19,00	623,05	298,83	26,50	51,00	87,89
Rango	9,00	97,65	72,65	2,00	11,50	39,55
Mínimo	10,00	572,27	291,02	25,00	41,50	56,97
Máximo	19,00	669,92	363,67	27,00	53,00	96,52
Cuenta	104,00	104,00	104,00	104,00	104,00	104,00

En la Tabla 2 se relacionan los resultados fundamentales obtenidos para los valores medios, evaluados para dos flujos de agua (10 y 19 l/min), y se determinan los coeficientes de transferencia de calor por unidad de longitud, según el procedimiento de cálculo

desarrollado para la evaluación del proceso de enfriamiento del mineral laterítico reducido.

Tabla 2. Resultados del balance térmico del enfriador

Parámetros calculados	Flujo (l/min)		U/M	No. Ecuación
	10	19		
por conducción y radiación del mineral a la pared cubierta por el sólido, $h_{pcs}$	98,02	94,351	W/(m <sup>2</sup> K)	5
por convección y radiación del mineral a la pared no cubierta por el sólido, $h_{pds}$	23,528	19,52	W/(m <sup>2</sup> K)	6
convección al agua, $\bar{h}_{agua}$	45,93	45,98	W/(m <sup>2</sup> K)	11
por evaporación del agua al medio, $h_{evp.agua}$	45,47	45,83	W/(m <sup>2</sup> K)	16
del mineral a la pared por unidad de longitud, $K_1$	76,997	67,466	W/(m K)	7
de la pared al agua por unidad de longitud, $K_2$	109,43	109,55	W/(m K)	10
del agua al aire por unidad de longitud, $K_4$	108,84	109,70	W/(m K)	15

El coeficiente  $K_1$  (Figura 4) muestra un crecimiento respecto a la temperatura del mineral a la salida del enfriador, debido a que el mismo es función de la temperatura y además caracteriza la transferencia de calor entre los dos sólidos (mineral-tambor).

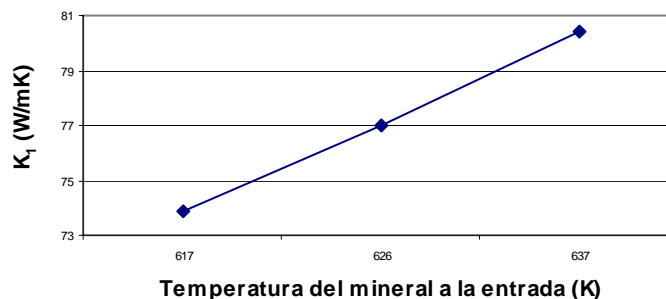


Figura 4. Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor del mineral a la pared del cilindro.

El coeficiente de transferencia de calor del mineral a la pared por unidad de longitud ( $K_1$ ) depende, además, de las propiedades termo-físicas del mineral. Estas propiedades, unidas al área que ocupa el mineral en el interior del cilindro, son factores decisivos en el proceso de enfriamiento ya que a mayor área ocupada por el mineral la altura de la capa de mineral es mayor y, a su vez, la transferencia de calor es menor, si se tiene en cuenta además que la conductividad térmica del mineral es baja, entre 0,11 y 0,17 W/(mK). Los valores de  $K_1$  obtenidos en este trabajo se sustentaron en los valores de la conductividad térmica, calor específico y densidad del mineral determinados experimentalmente por Tunra (1998).

Al analizar el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor de la pared al agua por unidad de longitud ( $K_2$ ) se revela un incremento del mismo con el aumento de la temperatura del agua a la salida del proceso (Figura 5), logrando que el agua absorba mayor cantidad de calor durante éste. En la Tabla 2 se pudo observar la diferencia entre los valores de  $K_2$ , para ambos experimentos es despreciable, por lo que se puede justificar que un aumento en el flujo de agua no contribuye al incremento de la transferencia de calor por convección en el proceso. Esto se debe a que el tiempo de permanencia del agua sobre la superficie del cilindro es mínimo y por tanto sólo permanece una pequeña película de agua cubriendo el cilindro, moviéndose conjuntamente con él a igual velocidad.

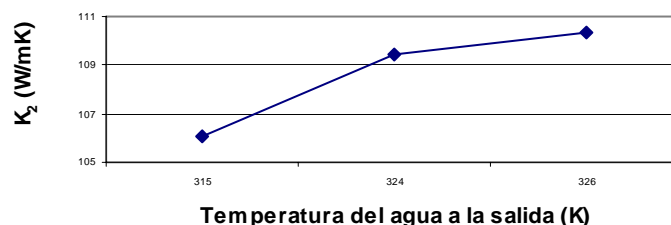


Figura 5. Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor de la pared al agua.

Influye también en la eficiencia de la transferencia de calor el material del enfriador, ya que en el proceso una parte significativa del calor

transferido se emplea en variar la energía interna de la pared, a medida que aumenta su temperatura. Se deben considerar las incrustaciones en la pared, que actúan como aislante térmico, dificultando el intercambio de calor con el agua y que están presentes en el objeto de estudio (Figura 6).

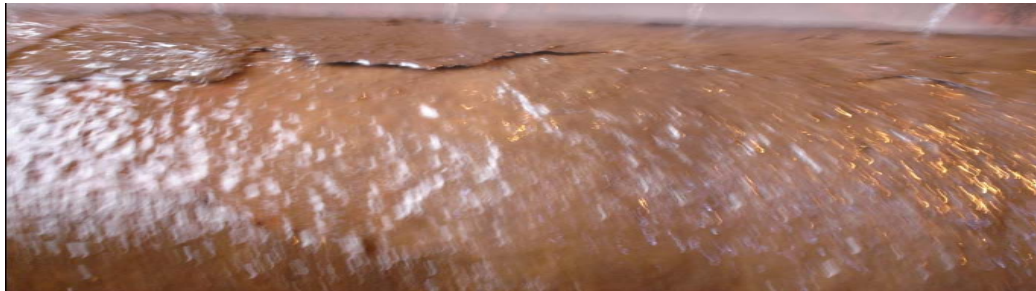


Figura 6. Formación de incrustaciones en la superficie del cilindro.

El coeficiente superficial de transferencia de calor del agua al medio circundante por unidad de longitud ( $K_4$ ) muestra un comportamiento similar a  $K_2$ , debido a que el valor de  $K_4$  está condicionado por la temperatura que alcance el agua a través de la superficie exterior del cilindro durante el proceso de enfriamiento (Figura 7). La cantidad de calor que entregue al aire, por convección y evaporación, estará en dependencia de las condiciones medio ambientales como son, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, humedad relativa, humedad específica y velocidad del viento.

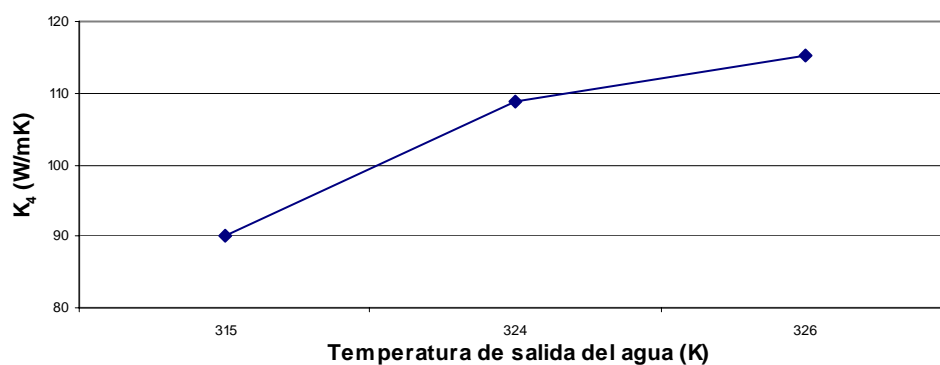


Figura 7. Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor del agua al aire.



## CONCLUSIONES

Se encontró que los procesos de transferencia de calor que predominan son los de conducción y radiación del mineral a la pared cubierta por el sólido, seguido por convección y evaporación del agua al medio y, en menor medida, por convección y radiación del mineral a la pared no cubierta por el sólido.

Los coeficientes de transferencia de calor del mineral a la pared por unidad de longitud ( $K_1$ ), de la pared al agua por unidad de longitud ( $K_2$ ) y del agua al aire por unidad de longitud ( $K_4$ ) tienen un comportamiento similar y sus valores se incrementan con el aumento de la temperatura del mineral y del agua a la salida del proceso, respectivamente.

Los coeficientes de transferencia de calor de la pared al agua por unidad de longitud ( $K_2$ ), y del agua al aire por unidad de longitud ( $K_4$ ) tienen muy poca variación al cambiar el flujo de agua de 10 a 19 l/min.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEPUZ LLANSANA, H. 1997. Determinación del tiempo de residencia y su distribución en hornos de calcinación. *Minería y Geología* 14 (2):50-55
- CHANG, A. 1997. *Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos*. Editorial Félix Varela, La Habana, 227 p.
- COLUMBIÉ NAVARRO, ÁNGEL. 2000. Modelo matemático del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio. *Minería y Geología* 17 (2): 47-53.
- GÓNGORA, E. 2007. Modelo matemático multivariable para un proceso de enfriamiento industrial de sólidos en cilindros rotatorios horizontales. *Energética XXVIII* (2): 15-25.
- GUZMÁN DEL RÍO, DANIEL. 2000. Modelación y simulación del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal con minerales lateríticos cubanos. *Minería y Geología* 17 (2): 61-71.
- INCROPERA, F.; D. WITT. 2003. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3 ed. Pueblo y Educación, La Habana, Tomos I, II y III.

- ISACHENKO, V.; V. OSIPOVA; A. SUKOMEL. 1979. *Transmisión del calor*. Pueblo y Educación, La Habana, 556 p.
- KERN, D.1999. Procesos de Transferencia de Calor. Primera Edición. Trigésima. Editorial Continental S.A. 970 p.
- PEÑA ABREU, RAMÓN. 2006. Integración numérica en Microsoft Excel para cálculo del tiempo medio de residencia en reactores continuos. *Tecnología Química* 26 (1): 48-52.
- TORRES TAMAYO, ENRIQUE. 2007. Modelación matemática del transporte neumático del mineral laterítico en fase densa. *Minería y Geología* 23 (1): 1-31.
- TUNRA. 1998. *Ore Cooler Evaluation*. The University Of New Castle Research Associates Limited, Australia, 18 p.
- VALLE M, MANUEL. 2000a. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa (I). *Tecnología Química* 20 (1): 70-77.
- VALLE M, MANUEL. 2000b. Evaluación de los enfriadores de mineral de la empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa (II) *Tecnología Química* 20 (2): 10-15.