

ELABORACIÓN DE NOMOGRAMAS DE PROPIEDADES E IMPLEMENTACIÓN DEL ÍNDICE DE TRABAJO DE BOND PARA LA MOLIENDA DE CLINKER DE CEMENTO

Elaboration of nomograms of properties and implementation of Bond work index for cement clinker grinding

RESUMEN

Se evaluó la molienda de clinker en molino de bolas, variando carga de bolas, velocidad del molino y tiempo de residencia, con el objetivo de relacionar mediante nomogramas propiedades como: área superficial, número de partículas y otras con tiempos de molienda, se implementó el índice de trabajo de Bond para un molino con dimensiones diferentes, usando igual relación velocidad angular/ diámetro molino.

El material se caracterizó mediante: XRF, Área BET, Análisis Granulométrico por Tamizado (AGA-AGD). Los nomogramas mostraron condiciones óptimas para alcanzar tamaños de partícula deseados, el índice de Bond varió levemente al compararse con el método de Berry-Bruce.

PALABRAS CLAVES: Bruce–Berry, Clinker, índice de Bond, molienda, molinos de bolas.

ABSTRACT

clinker grinding was evaluated in a ball mill, varying the ball loading, mill speed and residence time, with the object of to relate by nomograms properties as: superficial area, number of particles and another with grinding times, Bond work index was implemented the for a mill with different dimensions, using the same relation angular speed/mill diameter.

The material was characterized using XRF, BET area, size distribution by sieving (AGA-DGA). The nomograms showed optimal conditions to obtain particle size desired, the Bond index varied slightly when it was compared with Berry-Bruce method.

KEYWORDS: Ball mill, Bond index, Berry-Bruce, clinker, grinding.

ADRIANA OSORIO CORREA

Ingeniera Química
M Sc (C) Ingeniería
Universidad de Antioquia
eamoc822@udea.edu.co

JUAN FELIPE PELÁEZ

Ingeniero Químico (C)
Universidad de Antioquia
ejfpr422@udea.edu.co

RICARDO SÁNCHEZ

Ingeniero Químico (C)
Universidad de Antioquia
ersc501@udea.edu.co

NATALIA RODRIGUEZ

Ingeniero Químico (C)
Universidad de Antioquia
eniro359@udea.edu.co

CARLOS FIDELGRANDA

Ingeniero Químico
Ph. D (C) Ingeniería
Universidad de Antioquia,
ecfgr693@udea.edu.co

GLORIA RESTREPO

Ph.D. Ciencias Químicas Profesora
Universidad de Antioquia
gloma@udea.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de los primeros estudios básicos de reducción de tamaño, especialmente los procesos de molienda, se ha reconocido el rol preponderante de variables como la carga de cuerpos moledores, la velocidad de giro del molino y los tiempos de residencia como parámetros determinantes de la respuesta del proceso para un determinado material. En otras palabras, la adecuada combinación de estos son los que establecen las condiciones óptimas de tiempo y consumo energético que permiten alcanzar una granulometría deseada que a su vez, de acuerdo a sus propiedades físicas y mineralógicas, determinan en gran medida la efectividad de las etapas de separación y/o clasificación [1]. La caracterización del comportamiento del material en la etapa de molienda y separación sólido-sólido o sólido-

líquido depende en gran medida del tamaño de las partículas tratadas; adicionalmente, el conocimiento de la distribución de tamaños, es una herramienta para definir las etapas posteriores de procesamiento del material hasta su etapa final [2].

En la región de Antioquia se concentra una cantidad importante de industrias que tienen que procesar sólidos. La globalización de la economía y los tratados comerciales a los cuales la industria está avocada en la actualidad, exigen demandas crecientes en cuanto a la calidad del producto y a la eficiencia de los procesos. A pesar de estos grandes incentivos, nuestra industria maneja un pobre conocimiento de los fenómenos involucrados en los procesos de reducción de tamaño y el comportamiento de los materiales sólidos, lo que conduce no sólo a la existencia de un gran empirismo al operar equipos y unidades de proceso, sino también a la

tendencia a ignorar otras alternativas de procesamiento que pueden ser aplicadas.

El propósito de este estudio fue establecer nomogramas para la molienda de clinker de cemento que variando condiciones de operación como la velocidad de giro del molino, el porcentaje de cuerpos moledores y el tiempo de residencia en el molino permitieron apreciar los cambios del material en cuanto su distribución granulométrica, área superficial, número de partículas y diámetro superficie volumen, con el objetivo de determinar condiciones óptimas de proceso. Además, se buscó implementar el índice de trabajo de Bond para un molino con dimensiones diferentes con el fin de establecer relaciones semejantes a las usadas por Bond para buscar disminuir las limitaciones del método en cuanto a las especificaciones del equipo usado, considerando que el índice de trabajo constituye un parámetro determinante en el diseño de molinos, éste se verificó implementando además el método de Berry-Bruce, usando roca caliza como material de referencia.

El material se caracterizó mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X (XRF, ARL 9800 XP), Área superficial BET y Análisis Granulométrico por Tamizado (AGA-AGD).

2. EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y equipos

Se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

Molino de bolas con diámetro de 0.2 m, altura del molino de 0.2 m, diámetros de los cuerpos moledores (bolas) de 3.85 cm, 2.41 cm y 1.87 cm, variador de velocidad Siemens Sinamics G110 AC, serie de tamices normalizada: U.S.A Certificate Standard Testing Sieve ASTM E 11/01, ro-tap, balanza analítica, equipo Area BET, Micrometrics Gemini V Surface Area and Pore Size Analyzer y equipo Fluorescencia de rayos X, ARL 9800 XP

2.2 Metodología

2.2.1 Pretratamiento y caracterización de la muestra

Se tomaron 100 Kg de clinker, los cuales se pasaron por una trituradora de mandíbulas y posteriormente por un molino de rodillos, luego se cuartearon en 4 lotes de 25 Kg cada uno, se prosiguió con el cuarteo hasta obtener una muestra representativa para realizar el respectivo análisis granulométrico, se caracterizó como partícula individual y como partícula en masa.

2.2.2 Cálculo de la carga del molino

El número de bolas se calculó considerando una ocupación de entre el 30-40% del volumen del molino, se midieron individualmente tres tamaños de bolas y se halló el diámetro total de éstas, con éste, se encontró el porcentaje relativo de cada bola dentro del molino, se considero un factor de empaquetamiento de 0.52 [3], se

prosiguió a calcular el volumen de bolas en el molino con la siguiente relación [3]:

$$V_{\text{bolas molino}} = V_{\text{molino}} \times \frac{40\%}{100\%} \times 0.52 \quad (1)$$

Se calculó el volumen ocupado por cada bola individualmente, asimismo el ocupado por cada tamaño de bola, finalmente se encontró el número de bolas de cada tamaño que se usarían en los ensayos. La muestra alimentada al molino fue el 10% del peso del total del peso de todas las bolas.

2.2.2.1 Cálculo de la velocidad crítica del molino

La velocidad crítica (vc) del molino se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$v_c = \frac{42.2}{\sqrt{D-d}} \quad (2)$$

Donde:

vc: Velocidad crítica del molino, RPM

D: Diámetro del molino, m

d: Diámetro del cuerpo moledor mayor, m

La vc sirvió como parámetro para seleccionar las velocidades de trabajo en la elaboración de los nomogramas, considerando que la velocidad en el molino no debía exceder el 70-80% de la vc [4].

2.2.3 Experimento de barrido de tiempo

Conociendo las características comerciales del cemento gris Portland tipo I [5,6,7 y 8] (se evaluaron tres muestras de cemento comerciales) y considerando que este es un 95% clinker, se realizaron una serie de moliendas preliminares en las cuales se mantuvo constante, la carga de cuerpos moledores, la alimentación al molino y la velocidad de giro del molino, en 11 tiempos diferentes para obtener una distribución de tamaño semejante a la del cemento comercial y así determinar los tiempos adecuados para la elaboración de los nomogramas.

N° Ensayo	Tiempo de molienda (min)
1	20
2	40
3	60
4	90
5	120
6	150
7	180
8	210
9	240
10	270
11	300

Tabla 1. Ensayos de barrido de tiempo para la elaboración de los monogramas (Muestra 1049.2 g, 40% de cuerpos moledores, 48 RPM)

2.2.4 Diseño de experimentos para la elaboración de nomogramas

Para la elaboración de los nomogramas se siguió un diseño experimental tipo diagrama de árbol, variando la carga de cuerpos molidores entre 30% y 40%, velocidad de giro del molino entre 24 RPM y 72 RPM y el tiempo de molienda entre 2 y 5 horas, obteniendo un total de 36 experimentos.

2.2.5 Implementación del índice de trabajo de Bond

Se implementó el índice de trabajo de Bond para un molino con 20 cm de diámetro y 20 cm de altura, inicialmente se calculó la velocidad angular del molino de Bond con 30.5 cm de diámetro y 30.5 cm de altura y una velocidad rotacional de 72 RPM, así [9]:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3)$$

Donde:

ω : Velocidad angular, rad/s

n: Velocidad rotacional, RPM

Se determinó la relación velocidad angular/diámetro del molino empleada por Bond, posteriormente se determinó la velocidad rotacional a la que nuestro molino cumplía dicha relación.

Finalmente se calcularon el número de bolas equivalentes a las bolas usadas por Bond de tal forma que se cumplieran los siguientes parámetros: porcentaje de ocupación de bolas en el molino, relación volumen del molino/área de cuerpos molidores y volumen de masa alimentada al molino/volumen del molino. El ensayo se realizó por triplicado usando la ecuación de Bond [10,11 y 12]

$$W_i = \frac{44.5}{P^{0.23} Gbp^{0.82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (4)$$

Donde:

Wi: Índice de trabajo, kWh/Ton_c

P: Malla de referencia, μm

Gbp: Gramos producidos por revolución, g/rev

P₈₀: Abertura de la malla por la cual pasa el 80% del producto, μm

F₈₀: Abertura de la malla por la cual pasa el 80% del alimento, μm

2.2.5.1 Implementación método de Bruce-Berry

Para la medición del índice de trabajo por el método de Bruce-Berry [4], se empleó como muestra de referencia una roca caliza con un índice de trabajo de 9.78 kWh/Ton_c, este método usa 1000 g de muestra para hacer los ensayos en el molino de Bond, por lo tanto se calculó la proporción de masa adecuada para nuestro molino, se molió a 250, 350 y 700 revoluciones a velocidad constante, el ensayo se hizo por duplicado, el índice de

trabajo se calculó finalmente mediante la siguiente expresión [4]:

$$\left[W_i \left(\frac{10}{P_{80}} - \frac{10}{F_{80}} \right) \right]_t = \left[W_i \left(\frac{10}{P_{80}} - \frac{10}{F_{80}} \right) \right]_r \quad (5)$$

Donde:

Wi: Índice de trabajo, kWh/Ton_c

t: Subíndice muestra

r: Subíndice referencia.

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Caracterización de la muestra

Las principales propiedades de la muestra de clinker fueron medidas en el laboratorio y se presentan a continuación:

Propiedad	Valor
Densidad Aparente aireada (g/cm ³)	1.38
Densidad Aparente empacada (g/cm ³)	1.91
Densidad Aparente promedio (g/cm ³)	1.64
Densidad Aparente de trabajo (g/cm ³)	1.53
Peso específico (g/cm ³)	3.17
Área superficial BET (cm ² /g)	460

Tabla 2. Propiedades del clinker

La muestra de clinker fue analizada por XRF presentó la siguiente composición:

Compuesto	%
Cal libre	0.77
C ₃ S	64.92
C ₂ S	10.55
C ₃ A	4.61
C ₄ AF	11.33
TOTAL	99.45
MnO	0.14
P ₂ O ₃	0.26

Tabla 3. Composición del clinker

Los análisis granulométricos diferenciales y acumulados posteriores a la trituration primaria y secundaria se muestran en las figuras 1 y 2:

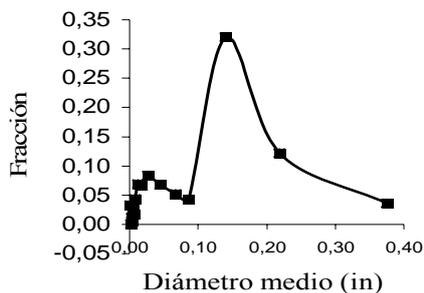


Figura 1. Análisis granulométrico diferencial clinker

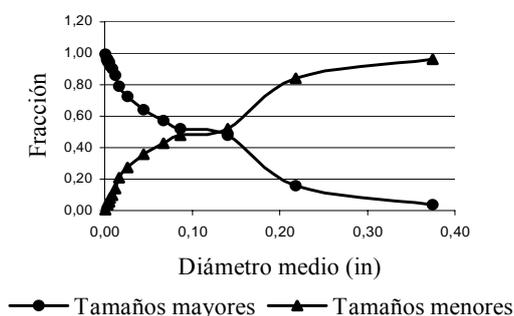


Figura 2. Análisis granulométrico acumulado clinker

Se puede observar que la mayor parte de la muestra presenta un tamaño de partícula comprendido entre las mallas 1/4 y 8, puesto que el 12% del material queda retenido en malla 4 y el 32% en malla 8, lo que indica que el material es en su mayoría grande y debido a su naturaleza cerámica debe requerir tiempos de molienda largos para alcanzar un tamaño de partícula comercial (pasante malla 325).

2.3.2 Carga del molino

Para el cálculo del número de cuerpos molidores según el porcentaje de ocupación de bolas dentro del molino se obtuvieron los siguientes valores:

% Bolas	# Bolas tipo 1	# Bolas tipo 2	# Bolas tipo 3	Peso total (g)
40	21	53	87	10492.1
35	18	46	77	9011.3
30	16	40	66	7860.4

Tipo 1 diámetro 3.85 cm, tipo 2 diámetro 2.41 cm, tipo 3 diámetro 1.87 cm.

Tabla 4. Distribución de cuerpos molidores

2.3.2.1 Velocidad crítica del molino

Se cálculo la velocidad crítica del molino (105 RPM), tomando el 70% de ésta, se obtuvo una velocidad rotacional de 73.5 RPM, la cual se considera el límite máximo de operación para que las bolas conserven los

efectos esperados dentro del molino, por lo que se tomo como punto de partida para la elaboración de los nomogramas se tomó una velocidad de 24 RPM, un punto intermedio de 48 RPM y finalmente el valor extremo de 72 RPM, muy cercano a la velocidad máxima permisible de trabajo.

2.3.3 Barrido de tiempo

La tabla 5 muestra la distribución de tamaño de partícula como porcentajes retenidos en cada malla, para tres muestras de cementos comerciales (CC) diferentes y tres tiempos de molienda del experimento de barrido, se puede observar que con el aumento del tiempo de molienda se alcanza una distribución granulométrica semejante a la del cemento comercial. Con base a este barrido se seleccionaron los tiempos de molienda para la elaboración de los nomogramas (300, 240, 180 y 120 minutos) los cuales permiten observar variaciones significativas en la distribución granulométrica y en el caso de los tiempos de 300 y 240 minutos, permiten alcanzar distribución de tamaños cercanas o superiores a las comerciales.

Malla	Diámetro medio (in)	% Retenido CC1	% Retenido CC2	% Retenido CC3	% Retenido t= 60 min	% Retenido t= 180 min	% Retenido t= 240 min
1/4	0.3750	0.00	0.00	0.00	0.88	0.00	0.00
4	0.2185	0.00	0.00	0.00	2.63	0.40	0.00
8	0.1404	0.00	0.00	0.00	5.93	0.09	0.28
10	0.0862	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.03
14	0.0671	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.09
20	0.0443	0.00	0.00	0.00	0.42	0.04	0.20
35	0.0264	0.00	0.00	0.00	0.30	0.14	0.17
45	0.0168	0.00	0.00	0.00	0.20	0.17	0.12
60	0.0119	0.00	0.00	0.00	0.38	0.24	0.43
80	0.0084	0.00	0.00	0.00	0.70	0.32	0.08
100	0.0065	0.00	0.00	1.50	0.88	0.00	0.00
140	0.0050	0.00	0.00	1.97	8.03	0.68	0.10
170	0.0038	0.40	0.50	3.38	7.20	0.87	0.89
200	0.0032	1.10	1.00	7.92	6.70	2.86	2.54
270	0.0025	6.40	7.88	14.49	10.9	10.20	5.13
325	0.0019	11.10	11.33	15.21	5.28	13.87	11.15
400	0.0016	13.50	11.89	12.96	16.3	16.15	12.13
500	0.0013	19.60	18.53	14.05	14.7	17.86	19.60
Colector		47.90	48.86	28.51	17.2	36.11	47.06

Tabla 5. Distribución de tamaño de cementos comerciales (CC) y algunos ensayos para el barrido de tiempo

2.3.4 Nomogramas

En las figuras 3 y 4 se pueden observar las variaciones de propiedades como el área superficial y el porcentaje pasante malla 325 (45 μm), el área superficial muestra el comportamiento esperado a una velocidad constante y aumentando los cuerpos moledores, a mayor tiempo de molienda, mayor es el incremento del área superficial, para el caso del porcentaje pasante por malla 325, se observa la tendencia a disminuir el porcentaje conforme se disminuye el porcentaje de cuerpos moledores, sin embargo no es muy significativo el cambio, tal vez se deba a que la velocidad puede resultar más determinante en este caso.

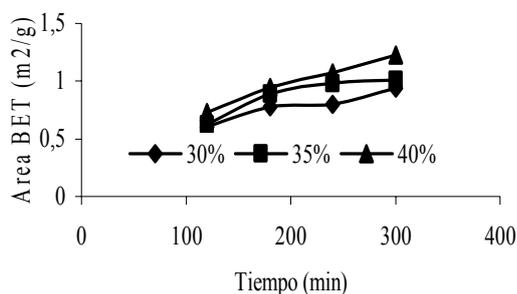


Figura 3. Nomograma para la variación del área superficial con el porcentaje de cuerpos moledores (48 RPM)

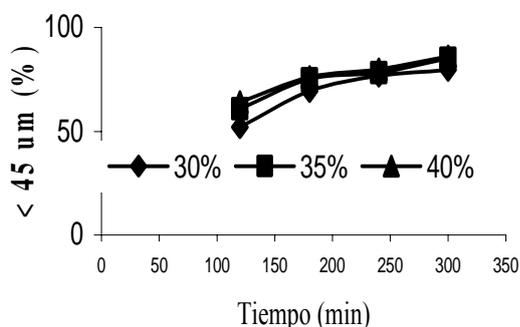


Figura 4. Nomograma para la variación del porcentaje pasante de 45 μm con el porcentaje de cuerpos moledores a velocidad constante (48 RPM)

2.3.5 Implementación del índice de trabajo de Bond

En la implementación del índice de Bond con otro molino se calcularon las siguientes relaciones:

Molino Bond	Molino U de A
Volumen (V_m) = 21205.7 cm^3	Volumen (V_m) = 6283.19 cm^3
Velocidad molino (v) = 72 RPM	Velocidad molino (v) = 46 RPM
Velocidad angular (ω) = 7.33 $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Velocidad angular (ω) = 4.81 $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$
Diámetro (D) = 0.305 m	Diámetro (D) = 0.20 m
Relación $\frac{\omega}{D}$ = 24.43	Relación $\frac{\omega}{D}$ = 24.03
Volumen bolas (V_b) = 2571.08 cm^3	Volumen bolas (V_b) = 761.52 cm^3
% Ocupación bolas = 12.12	% Ocupación bolas = 12.12
Área bolas (A_b) = 5411.97 cm^2	Área bolas (A_b) = 1600.57 cm^2
Relación $\frac{V_m}{A_b}$ = 3.918	Relación $\frac{V_m}{A_b}$ = 3.92
Volumen masa (V_w) = 700 cm^3	Volumen masa (V_w) = 207 cm^3
Relación $\frac{V_w}{V_m}$ = 0.033	Relación $\frac{V_w}{V_m}$ = 0.033

Tabla 6. Implementación de parámetros de Bond en molino U de A

Se inició el primer ciclo con 100 revoluciones, valor propuesto por Bond, estas se incrementaron hasta alcanzar un 250% de carga recirculante y un valor de Gbp constante, debido a la diferencia en la cantidad de muestra con respecto a la que se usaría en un molino tradicional de Bond, se estableció una corrección para los gramos producidos por revolución de la prueba de Bond con respecto a los ensayos con el molino U de A, así:

$$Gbp = \frac{(V_m W)_{\text{Bond}} * Gbp_{\text{UdeA}}}{(V_m W)_{\text{UdeA}}} \tag{6}$$

Donde:

Gbp: Gramos producidos por revolución

Vm: Volumen de masa.

W: Peso del volumen de masa.

Bond: Subíndice para referirse a los valores que se emplearían si se sigue el método tradicional de Bond.

UdeA: Subíndice para referirse a los valores encontrados con el molino U de A.

Gbp_{UdeA}: Gramos producidos por revolución en el molino U de A.

Los índices de trabajo se reportan en la tabla 7. Se verificó con otro material de naturaleza más frágil que el clinker como lo es la caliza, para determinar si la relación encontrada en la ecuación 5, se cumplía para otro tipo de material, encontrándose que para el clinker el porcentaje de desviación con respecto al valor reportado por la literatura era del 6.5%, mientras para la caliza resultó de 11.34%, tal vez debido a que estos valores se hallaron en moliendas en seco, y no se uso ninguna de las correcciones sugeridas por Bond, para estos casos.

Wi,Bond Clinker kWh/Ton_c	13.49	Wi,Bond Caliza kWh/Ton_c	9.78
Gbp_{UdeA}	0.1182	Gbp_{UdeA}	0.201
Gbp_(Ec, 5)	1.3524	Gbp_(Ec, 5)	2.2959
Wi, UdeA prom kWh/Ton_c	106.00	Wi, UdeA prom kWh/Ton_c	63.66
Wi, promedio % Error	14.37 6.5	Wi, UdeA promedio % Error	8.67 11.34

Tabla 7. Resultados de la implementación del índice de trabajo de Bond

2.3.6 Comparación método de Berry-Bruce

Para el método de Berry-Bruce se recalculo la masa que debía utilizarse de acuerdo a las dimensiones del molino, obteniéndose un valor de 296 g, se observó que a 350 revoluciones se obtiene una desviación muy baja comparada con los valores reportados para las otras dos revoluciones, los resultados se presentan en la tabla 8, las diferencias entre los valores para el P80 y el F80 se pueden apreciar en la figura

Wi, UdeA	250 Rev		350 Rev		700 Rev	
	Wi, test	% Error	Wi, test	% Error	Wi, test	% Error
106.00	41.	60.79	105.18	0.77	202.	90.76

Tabla 8. Variación del Wi, con las revoluciones para el método de Berry-Bruce

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la elaboración de los nomogramas se pudo observar el comportamiento de algunas propiedades del clinker con el tiempo de molienda, lo cual resulta de gran ayuda para determinar las condiciones de proceso más adecuadas que permitan alcanzar distribuciones de tamaño deseadas considerando además que se pueden obtener granulometrías semejantes, para condiciones diferentes de operación y que resulta muy útil a la hora de determinar si en determinado proceso es más relevante el ahorro en cuanto a consumo energético por velocidades o el ahorro en desgaste de cuerpos moledores.

La implementación del índice de trabajo de Bond resultó satisfactoria considerando todas las modificaciones que fueron hechas en cuanto al tamaño del molino, los cuerpos moledores y la velocidad de giro del molino, cabe resaltar que los índices de trabajo están estrechamente relacionados con el material y que por tal motivo los valores pueden variar considerablemente dependiendo del origen del material (mena) y que se deben realizar ensayos con más materiales para

determinar hasta que punto se aplica la correlación encontrada.

El método de Berry-bruce por su parte arrojó valores altos semejantes a los hallados con el método de Bond modificado, y aunque este se pudo comparar con dicho ensayo, no resulta posible compararse con un ensayo de bond estándar puesto que no fue posible encontrar en este caso una correlación para corregir la cantidad de muestra utilizada.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sepúlveda, J. Seminario Diseño y optimización de circuitos de molienda/clasificación, Moly-Cop Chile S.A., 1999.
- [2] Blazi, Pierre. *El Beneficio de los Minerales*, Ed. Rocas y Minerales, Madrid 1975.
- [3] Reología de los sistemas dispersos, emulsiones, suspensiones y dispersiones semisólidas. Biblioteca digital Universidad de Chile Disponible: http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/ap/ciencias_quimicas_y_farmacuticas/ap-fisquim_farm14/c21.2.html.
- [4] Austin, L. y Concha, F. "Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y Clasificación". Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología.
- [5] *Especificaciones Químicas para cementos* Norma Técnica Colombiana NTC 121
- [6] *Especificaciones Fisico-Mecánicas de Cementos* Norma Técnica Colombiana NTC 321
- [7] *Método de ensayo para determinar finura sobre 45 μm* Norma Técnica Colombiana NTC 294
- [8] *Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio de los tamices 75 μm (M200) y 150 μm (M100)*. Norma Técnica Colombiana NTC 226
- [9] Geankoplis, Ch. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Ed. Continental, 3ª edición, New Jersey 1993.
- [10] Bond, F.C. AIME Trans., 193, 1952, p. 484.
- [11] Bond, F.C. Min. Eng. Mayo 1952.
- [12] Bond, F.C. *Crushing and grinding calculations*, Can. Mining and Metall. Bulletin, 47, 507, 1954, p. 466.