

MOLIENDA DE CLINKER DE CEMENTO: EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE GIRO DEL MOLINO, EL TIEMPO DE RESIDENCIA Y LA CARGA DE LOS MEDIOS DE MOLIENDA

CEMENT CLINKER GRINDING: EVALUATION OF MILL SPIN SPEED, RESIDENCE TIME AND GRINDING MEDIA LOAD

ADRIANA OSORIO

Grupo de Procesos Físicoquímicos Aplicados, Universidad de Antioquia, eamoc822@udea.edu.co

GLORIA RESTREPO

Grupo de Procesos Físicoquímicos Aplicados, PhD, Universidad de Antioquia, gloma@udea.edu.co

JUAN MARÍN

Grupo de Procesos Físicoquímicos Aplicados, PhD, Universidad de Antioquia, jmmarin@udea.edu.co

Recibido para revisar junio 9 de 2008, aceptado octubre 29 de 2008, versión final noviembre 19 de 2008

RESUMEN: se evaluó la molienda de clinker en molino de bolas, variando: velocidad del molino (24 y 72 RPM), tiempo de residencia (3 y 5 horas) y carga de cuerpos molidores (30 y 40 %), mediante un modelo factorial, el objetivo fue evaluar la incidencia de estos sobre el porcentaje másico pasante 45 micras y el área superficial, factores determinantes en la calidad del cemento comercial.

Se determinaron propiedades físicoquímicas, de composición, naturaleza mineralógica y distribución granulométrica del material empleando Fluorescencia de Rayos X, Análisis de Área Superficial y Análisis Granulométrico por Tamizado. Se encontró que la cantidad de masa pasante de 45 micras crece al aumentar la velocidad del molino y en menor proporción al incrementar el tiempo, y que el cambio de carga de cuerpos molidores resulta insignificante. El área superficial aumenta al incrementarse velocidad, tiempo y carga; no obstante estos últimos en proporción menor que con la velocidad.

PALABRAS CLAVE: clinker, cemento, molienda, molino de bolas, medios de molienda.

ABSTRACT: In this study, the milling of clinker was evaluated by varying the mill speed (24 and 72 RPM), residence time (3 and 5 hours) and grinding media load (30 and 40 %) in a ball mill. The experiment was designed as a three level factorial statistical model. The main objective was to assess the effect of these parameters on cumulative passing percentage (CPP) and surface area, both of which affect the quality of commercial cement.

Physico-chemical properties, composition, mineralogy and granulometric distribution were determined using X Ray Fluorescence, Surface Area Analysis and Sieving Granulometric Analysis. Results showed that that CPP through a 325 mesh increases considerably with mill spin speed, that the rate of CPP increase decreases with residence time and that grinding media load changes were not significant. The surface area increased mainly as a function of increases in mill spin speed, while residence time and grinding media load had lesser impacts.

KEYWORDS: clinker, cement, grinding, ball mill, grinding media.

1. INTRODUCCIÓN

En el procesamiento de materiales sólidos hasta convertirlos en productos acabados, las operaciones de reducción de tamaño representan las etapas de mayor consumo de energía, además de estar relacionadas directamente con las propiedades y calidad final del producto y generar considerables impactos medioambientales. En este sentido, los desarrollos tecnológicos en el campo de los materiales sólidos deben estar orientados a obtener mayores rendimientos, esto es, más toneladas de sólido molido por cada Kw empleado; y procurar procesos sustentables en cuanto a uso de los recursos y respeto por el medio ambiente [1,2].

En Colombia existe una cantidad importante de industrias que procesan sólidos, tales como la industria alimenticia, textil, agrícola, minera, farmacéutica, construcción y de productos químicos (pigmentos, resinas, plásticos, pinturas, entre otros), para las que la reducción de tamaño es una etapa fundamental del proceso global [3].

En la etapa de la molienda las partículas se reducen de tamaño por una combinación de impacto y abrasión y su eficiencia depende del control que se ejerza sobre el tamaño del producto, evitando tanto la submolienda, que genera un producto grueso, como la sobremolienda que, además de ser innecesaria, ocasiona pérdidas importantes de energía. Estos aspectos están fuertemente influenciados por variables como la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de los medios de molienda, siendo determinantes en la respuesta del proceso para un material específico [4]. Una óptima combinación de estos factores, genera condiciones adecuadas de tiempo y consumo energético que permiten alcanzar la granulometría deseada en el producto que, a su vez, y de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas y naturaleza mineralógica, determinan en gran medida la efectividad de etapas posteriores de separación y/o clasificación [5].

En una economía globalizada como la actual, existe una demanda creciente de calidad de productos aunada a procesos eficientes. Sin

embargo, en el caso de los procesos de reducción de tamaño, nuestra industria maneja un escaso conocimiento de los fenómenos involucrados en 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 resistencia a implementar otras alternativas de procesamiento.

El objetivo de este estudio fue determinar la influencia de variables de operación como velocidad de giro del molino, tiempo de residencia y carga de cuerpos moledores sobre el porcentaje de masa pasante malla 325 (45 micras) y el área superficial del clinker de cemento [6-9], material básico en la industria cementera. Para caracterizar el material se empleó Fluorescencia de Rayos X – XRF (ARL 9800 XP), Análisis de Área superficial por el método BET [10]. y Análisis Granulométrico por Tamizado Acumulado y Diferencial (AGA-AGD).

2. EXPERIMENTAL

2.1 Materiales Y Equipos

- Muestra de clinker (suministrada por una reconocida industria cementera).
- Molino de bolas con diámetro de 0.2 m, altura del molino de 0.2 m y 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.
- Analizador de Área Superficial, Micrometrics Gemini V Surface Area and Pore Size Analyzer.
- Equipo de Fluorescencia de Rayos X, ARL 9800 XP.
- Software estadístico STATGRAPHICS Plus 4.1.

2.2 Metodología

2.2.1 Preparación y caracterización de la muestra

Se adecuaron 100 Kg de clinker, utilizando una trituradora de mandíbulas y un molino de rodillos. Se emplearon técnicas de cuarteo hasta obtener una muestra representativa del material, a la cual se le determinaron propiedades como peso específico, densidad y área superficial por el método BET.

2.2.2 Cálculo de la carga del molino

Se emplearon bolas de tres tamaños de diámetros 3.85 cm, 2.41 cm y 1.87 cm. Con el diámetro total se encontró el porcentaje relativo de cada bola dentro del molino, considerando una ocupación entre el 30-40% del volumen del molino y un factor de empaquetamiento de 0.52. El volumen de bolas en el molino se calculó empleando la siguiente relación [11]:

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

y el volumen ocupado por cada tamaño de bola de acuerdo a la expresión:

$$V_{\text{tamaño}} = \% \text{ relativo bola} \times V_{\text{bolas molino}} \quad (2)$$

Conociendo el volumen total de bolas en el molino y el volumen de cada bola, es posible determinar el número de bolas de cada tamaño a usar en los ensayos.

La cantidad de 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 (v_c) del molino se calculó mediante la relación [12]:

$$v_c = \frac{42.2}{\sqrt{D-d}} \quad (3)$$

donde:

v_c : velocidad crítica del molino, RPM

D : diámetro del molino, m

d : diámetro del cuerpo moledor mayor, m

La v_c se empleó como parámetro para seleccionar las velocidades de trabajo incluidas en el diseño de experimentos, considerando que la velocidad en el molino no debe exceder el 80% de la v_c [12].

2.2.3 Selección de los tiempos de molienda

A partir de tres muestras de cemento comerciales y conociendo las características del cemento gris Pórtland tipo I [13-15] que es en un 95% clinker, se realizaron moliendas preliminares de clinker manteniendo constante la carga de cuerpos moledores, la alimentación al molino y la velocidad de giro, y se emplearon 11 tiempos diferentes para obtener una distribución de tamaño semejante a la del cemento comercial, y así determinar los tiempos adecuados para incluir en el diseño de experimentos.

2.2.4 Diseño de experimentos

En la tabla 1 se presentan las condiciones de operación velocidad de giro del molino, tiempo de residencia y carga de cuerpos moledores, para la evaluación del porcentaje de masa pasante malla 325 (45 micras) y la variación del área superficial. Los ensayos se hicieron por duplicado y el modelo estadístico utilizado para el análisis de los experimentos fue un diseño factorial de tres niveles (3 x 3 x 3). Como variable de respuesta se consideraron de forma independiente el porcentaje de masa pasante malla 325 (45 micras) y el área superficial.

El análisis del diseño de experimentos se realizó mediante el software estadístico STATGRAPHICS Plus 4.1.

Tabla 1. Condiciones de operación para la evaluación de la molienda de clinker de cemento
Table 1. Operation conditions to the evaluation of the cement clinker grinding

Ensayo	Condiciones de operación de la molienda		
	Velocidad (RPM)	Tiempo (h)	Carga (%)
1	24	3	30
2	24	4	30
3	24	5	30
4	48	3	30
5	48	4	30
6	48	5	30
7	72	3	30
8	72	4	30
9	72	5	30
10	24	3	35
11	24	4	35
12	24	5	35
13	48	3	35
14	48	4	35
15	48	5	35
16	72	3	35
17	72	4	35
18	72	5	35
19	24	3	40
20	24	4	40
21	24	5	40
22	48	3	40
23	48	4	40
24	48	5	40
25	72	3	40
26	72	4	40
27	72	5	40

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización De La Muestra

En la tabla 2 se muestran las propiedades de la muestra de clinker.

Tabla 2. Propiedades del clinker
Table 2. Clinker properties

Propiedad	Valor
Densidad Aparente aireada (g/cm^3)	1.38
Densidad Aparente empacada (g/cm^3) (por desplazamiento de volumen)	1.91
Compresibilidad (%)	28.0
Peso específico (g/cm^3)	3.17
Área superficial BET (cm^2/g)	460

La composición mineralógica de la muestra de clinker fue determinada por XRF, tabla 3.

Tabla 3. Composición del clinker
Table 3. Clinker composition

Compuesto*	%
Cal libre	0.77
C_3S	64.92
C_2S	10.55
C_3A	4.61
C_4AF	11.33
TOTAL	99.45
MnO	0.14
P_2O_3	0.26

*C: Cal, S: Sílice, A: Alumina, F: Óxido de hierro.

C_3S : Silicato tricálcico (Alita), C_2S : Silicato bicálcico (Belita), C_3A : Aluminato tricálcico, C_4AF : Aluminoferrita tetraalcalica.

Las figuras 1 y 2 muestran la distribución granulométrica, diferencial y acumulada, de la muestra de clinker después de someterse a una trituration primaria mediante una trituradora de mandíbulas y un molino de rodillos.

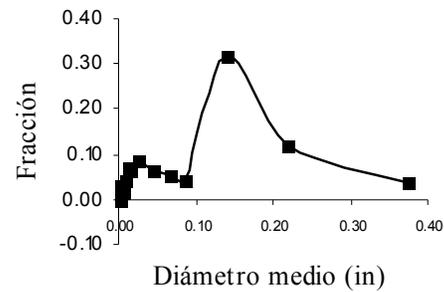


Figura 1. Distribución de tamaño del clinker
Figure 1. Particle size distribution of clinker

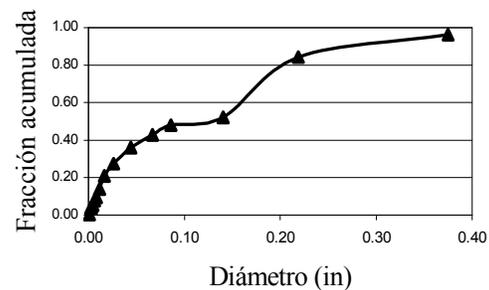


Figura 2. Distribución acumulada de tamaño pasante de partícula del clinker
Figure 2. Cumulative distribution particle passing size of clinker

De las figuras 1 y 2 puede observarse que la distribución granulométrica del material está centrada entre tamaños de partícula comprendidos entre las mallas 1/4 y 8, puesto que el 12% del material queda retenido en malla 4 y el 32% en malla 8. Esto indica que la mayor parte del material es grande y por su naturaleza cerámica y valores de densidad y peso específico relativamente altos, requiere tiempos de molienda largos para alcanzar un tamaño de partícula comercial, es decir pasante malla 325.

3.2 Carga Del Molino

En la tabla 4 se presenta el número de bolas obtenido para cada tamaño, según el porcentaje de ocupación de éstas dentro del molino y de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2.

Tabla 4. Distribución de tamaño de bola
Table 4. Ball size distribution

% Bolas	# Bolas tamaño1	# Bolas tamaño2	# Bolas tamaño3	Peso total (g)
40	21	53	87	10492.1
35	18	46	77	9011.3
30	16	40	66	7860.4

Tamaño 1: diámetro 3.85 cm. Tamaño 2: diámetro 2.41 cm.
Tamaño 3: diámetro 1.87 cm.

3.2.1 Velocidad crítica del molino

Se considera que la velocidad límite máxima de operación para que las bolas conserven los efectos esperados dentro del molino equivale al 70% de la velocidad crítica, cuyo valor para el molino empleado fue de 105 rpm. Ecuación 3.

Para el diseño de experimentos se seleccionaron tres velocidades de trabajo: 24 rpm, 48 rpm y 72 rpm. Este último valor está muy cercano a la velocidad máxima permisible de trabajo calculada en 73.5 rpm.

3.2.2 Tiempos de molienda

La tabla 5 muestra los tiempos de molienda usados para obtener una distribución de tamaño semejante a la del cemento comercial, y así

determinar los tiempos de molienda para el diseño de experimentos.

Tabla 5. Ensayos de tiempo para determinar el tiempo de molienda para el diseño de experimentos (Muestra 1049.2 g, 40% de medios de molienda, 48 RPM)

Table 5. Time tests to establish the grinding time for the design of experiments (Sample 1049.2 g, 40% grinding media, 48 RPM)

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

La tabla 6 muestra la distribución de tamaño de partícula como porcentajes del total retenidos en cada malla (Análisis Granulométrico Acumulado por tamaños mayores), para tres muestras de cementos comerciales (CC) y tiempos de molienda de 1, 3 y 4 h. Los resultados muestran que a mayores tiempos de molienda, la distribución granulométrica alcanzada se asemeja a la del cemento comercial. Con base en esto, para el diseño experimental se seleccionaron tiempos de molienda de 3, 4 y 5 h, con los cuales se garantizan distribuciones granulométricas similares a las del cemento comercial.

3.2.3 Diseño de experimentos

La figura 3 muestra el análisis de superficie de respuesta obtenido para la variable porcentaje de masa pasante malla 325. Puede observarse la notable incidencia que tiene el aumento de la velocidad y el tiempo de molienda en la producción de partículas menores de 45 micras.

Tabla 6. Distribución del tamaño de partícula de cementos comerciales (CC) y algunos ensayos de tiempo

Table 6. Particle size distribution of commercial cements (CC) and some time tests

Malla	Diámetro medio (in)	% Retenido CC1	% Retenido CC2	% Retenido CC3	% Retenido t=1 h	% Retenido t=3 h	% Retenido t=4 h
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

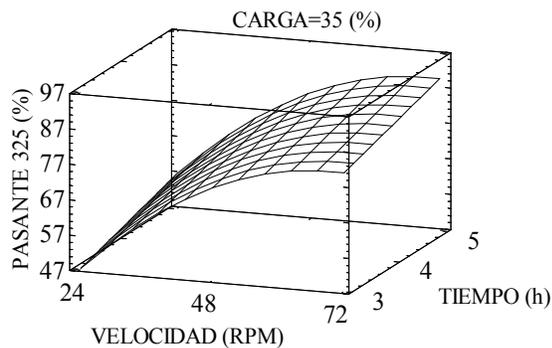


Figura 3. Superficie de respuesta pasante malla 325
Figure 3. Passing 325 mesh response surface

La ecuación 4 expresa el modelo obtenido, el cual representa la cantidad de masa obtenida que pasa por la malla 325 en función de la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de cuerpos moleadores.

$$\%325 = 17.9 + 2.87v - 10.32t - 0.826c - 0.016v^2 - 0.019vc + 0.43tc \quad (4)$$

donde:

%325: cantidad de masa pasante por la malla 325 (45 micras), %.

v: velocidad de giro del molino, RPM.

t: tiempo de residencia dentro del molino, h.

c: carga de cuerpos moleadores, %.

La expresión hallada tiene un coeficiente de correlación de $R=96.0426$ lo cual indica que existe un alto grado de intensidad en la relación de las variables estudiadas, por su parte el coeficiente de determinación $R^2=95.1003$ indica que el 95 % del porcentaje pasante de malla 325 puede ser explicado por la interacción de la velocidad, el tiempo y la carga de cuerpos moleadores en el molino.

La tabla 7 muestra los p-valores del análisis de varianza (ANOVA) para los factores que fueron significativos, siendo A: velocidad, B: tiempo y C: carga. Los demás factores e interacciones que presentaron p-valores superiores a 0.05 fueron descartados del modelo por no ser significativos.

Tabla 7. p-valores del análisis de varianza para el modelo pasante malla 325

Table 7. p-values of variance analysis for passing 325 mesh model

Factor	p-valor
A	0.0000
B	0.0000
AA	0.0000
AC	0.0346
BC	0.0412

La figura 4 muestra el diagrama de Pareto, en el que puede apreciarse la incidencia de los efectos de los factores sobre el modelo encontrado.

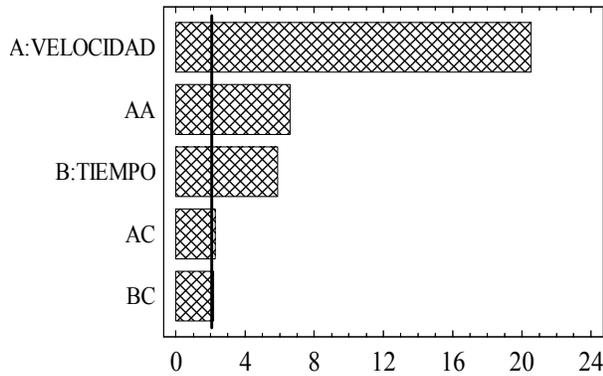


Figura 4. Diagrama de Pareto para pasante malla 325
Figure 4. Passing 325 mesh Pareto Charts

En la figura se observan los efectos de los factores velocidad y tiempo sobre la cantidad de masa pasante por malla 325. Puede apreciarse que en la transición entre una velocidad baja a una velocidad alta, hay un incremento en la producción de material menor de 45 micras; este efecto es más pronunciado que cuando se pasa de un tiempo de molienda menor a uno mayor, sin embargo la tendencia un poco curva de la línea de velocidad puede indicar que velocidades muy altas pueden provocar fenómenos de desaceleración en la molienda.

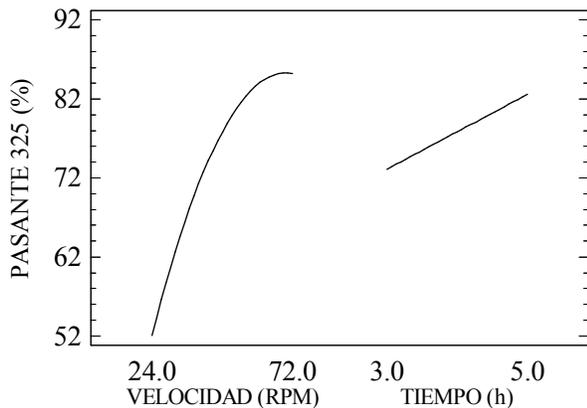


Figura 5. Efectos de los factores velocidad y tiempo sobre la cantidad de masa pasante malla 325
Figure 5. Speed and time effects on the amount of passing mass 325 mesh

El análisis de superficie de respuesta para el área superficial se presenta en la figura 6.

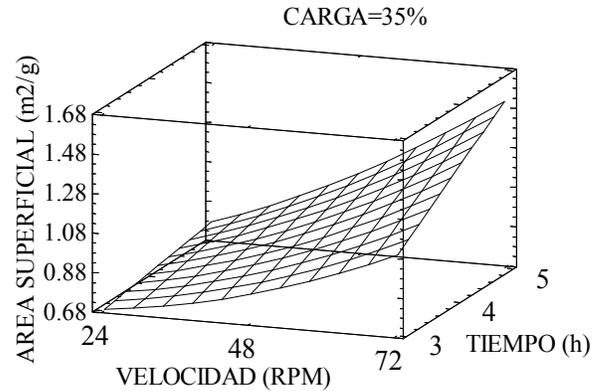


Figura 6. Superficie de respuesta área superficial
Figure 6. Surface area response surface

La ecuación 5 representa el modelo obtenido para el comportamiento del área superficial, con los cambios en la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de cuerpos molidores.

$$As = 0.129 - 0.0124v - 0.0347t + 0.0185 + 0.0001v^2 + 0.0035vt \quad (5)$$

donde:

- As: área superficial, m²/g.
- v: velocidad de giro del molino, RPM.
- t: tiempo de residencia dentro del molino, h.
- c: carga de cuerpos molidores, %.

La expresión anterior tiene un coeficiente de correlación R=98.0345 lo que significa la relación entre las variables estudiadas es del 98% y de acuerdo a su coeficiente de determinación R²=97.5665 el comportamiento del área superficial puede deberse en un 97 % por la interacción de la velocidad, el tiempo de residencia y la carga de cuerpos molidores del molino.

La tabla 8 muestra los p-valores del análisis de varianza (ANOVA) para los factores que fueron significativos. Al igual que en el caso anterior los demás factores e interacciones que presentaron p-valores superiores a 0.05 fueron descartados del modelo.

Tabla 8. p-valores del análisis de varianza para el modelo área superficial

Table 8. p-values of variance analysis for surface area model

Factor	p-valor
A: Velocidad	0.0000
B: Tiempo	0.0000
C: Carga	0.0000
AA	0.0028
AB	0.0000

En el diagrama de Pareto mostrado en la figura 7, puede apreciarse la incidencia de los efectos de los factores sobre el modelo encontrado para el área superficial.

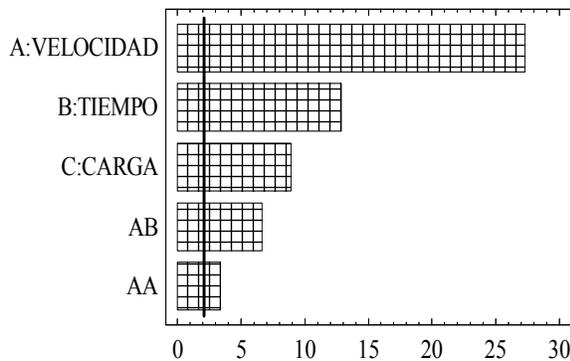


Figura 7. Diagrama de Pareto para Área Superficial
Figure 7. Surface área Pareto Charts

La figura 8 muestra los efectos de los factores velocidad, tiempo y carga de bolas sobre el área superficial. Al igual que en el caso anterior, la velocidad afecta considerablemente el incremento del área superficial, y en menor proporción el tiempo y la carga de cuerpos molidores.

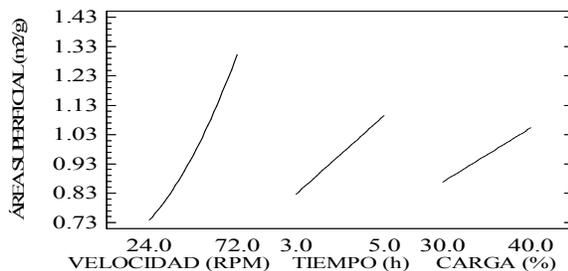


Figura 8. Efectos de los factores velocidad, tiempo y carga de medios de molienda sobre el área superficial
Figure 8. Speed, time and grinding media load effects on surface area

3. CONCLUSIONES

Se evaluó la incidencia que tiene la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la variación en la carga de cuerpos molidores sobre la cantidad de masa pasante malla 325 y el área superficial para la molienda de clinker de cemento.

La producción de material fino menor a 45 micras, está fuertemente influenciada por factores como la velocidad de giro del molino y el tiempo de residencia. No sucede lo mismo con la carga de cuerpos molidores, para la cual la cantidad de material producido por debajo de la malla 325 no varía significativamente con cambios en la carga, quizá debido a que el rango evaluado para este parámetro fue muy estrecho. Asimismo, el área superficial se incrementa al aumentar tanto la velocidad como el tiempo y la carga. Sin embargo, la mayor incidencia la tiene el factor velocidad.

El mayor impacto de la velocidad de giro del molino tanto sobre la cantidad de masa pasante malla 325 como sobre el área superficial, se debe probablemente al alto grado de tensiones creadas sobre la estructura cristalina del material y en consecuencia, al aumentar la velocidad se incrementa en varios órdenes de magnitud el número de fracturas en las fronteras e imperfecciones estructurales de las partículas lo que conduce a la producción de una mayor cantidad de finos y a la generación de la nueva área superficial asociada a los tamaños más pequeños.

Indudablemente la mejor combinación de parámetros operacionales para el procesamiento de sólidos, será aquella que proporcione las características deseadas en el producto y que simultáneamente optimice energéticamente el proceso, lo que conducirá a la minimización de los costos de producción.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia por el soporte para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] TORRES, I.E.; The mineral Industry of Colombia, 2000.
- [2] BONET, O.; Molinos impactadores de eje vertical, Rocas y Minerales, 33, 433, 2008.
- [3] URIBE, M. Estrategias para la inversión minera en Colombia, Colombian Coal Conference, Barranquilla febrero de 2006.
- [4] BENZER H. et al; Modelling cement grinding circuits. Minerals Engineering, Vol 14, No 11 (2001)1469-1482.
- [5] SEPÚLVEDA, J. Seminario Diseño y optimización de circuitos de molienda/clasificación, Moly-Cop Chile S.A., 1999.
- [6] CELIK, I.B., ONER M., CAN N.M.; The influence of grinding technique on the liberation of clinker minerals and cement properties. Cement and Concrete Research 37 (2007) 1334–1340.
- [7] CELIK, I.B., ONER M.; The influence of grinding mechanism on the liberation characteristics of clinker minerals. Cement and Concrete Research 36 (2006) 422 – 427.
- [8] F.C. BOND, Third theory of comminution, Trans. Soc. Min. Eng. AIME 193. (1952) 484–494.
- [9] TOUIL D., BELAADI S. Y FRANCES C.; Energy efficiency of cement finish grinding in a dry batch ball mill. Rose Cement and Concrete Research 36 (2006) 416–421.
- [10] TOUIL D., BELAADI S. Y FRANCES C.; Energy efficiency of cement finish grinding in a dry batch ball mill. Rose Cement and Concrete Research 36 (2006) 416–421.
- [11] 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_farmaceuticas/ap-fisquim_farm14/c21.2.html. (citado 8 de septiembre de 2007).
- [12] AUSTIN, G. L. Y CONCHA, A.F. " Diseño y Simulación de Circuitos de Molienda y clasificación", Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología. P.315-330.1994.
- [13] Especificaciones Fisico-Mecánicas de Cementos Norma Técnica Colombiana NTC 321.
- [14] Método de ensayo para determinar finura sobre 45 μm Norma Técnica Colombiana NTC 294.
- [15] 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.