

REPARACIÓN Y TECNOLOGÍA MECÁNICA *REPAIRING AND MECHANICAL TECHNOLOGICAL*

ARTÍCULO ORIGINAL

Diseño de un molino para reciclar pastas de freno de tracto-camiones usando el método de bond

Design of a ball mill for recycling brake pads tractor-trucks using the method of bond

M.Sc. Arturo Ocampo RamírezI, Dr.C. Luis Héctor Hernández GómezI, Dr.C. Guillermo Urriolagoitia SosaI, Ing. Dayvis Fernández ValdésI, M.Sc. Rafael Cervantes BeyraII, Ing. Daybelis Fernández ValdésII

^I Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Ciudad de México, México.

^{II} Universidad Agraria de La Habana, San José de la Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN. Actualmente existe en el transporte público la necesidad de reemplazar constantemente las pastas de freno debido principalmente al factor de desgaste y por razones de seguridad. En este trabajo se propone crear las bases del diseño general de una máquina prototipo capaz de re-utilizar y reducir el tamaño de las pastas de freno del transporte público que están fuera de uso para ser empleadas como agente principal en una mezcla pastosa. Esta pasta se utilizará como material aislante en construcciones, recubrimiento de paredes y techos, así mismo en la elaboración de pavimentación en base sólida de calles. Para llevar a cabo esta propuesta se hace uso del método de Bond con el objetivo de estimar las dimensiones iniciales del molino y la potencia necesaria, mediante la creación de un programa numérico BM-Crush, evitando con esto construir molinos pilotos hasta donde esto es posible. Entre los principales resultados se obtiene la metodología general para calcular la potencia mecánica y las dimensiones necesarias del molino con base a cualquier cambio en las condiciones iniciales de operación, así como la distribución de los medios moledores y sus dimensionamiento. Se estima la velocidad crítica, estableciéndose con base en esto la velocidad optima con la que debe girar el molino de bolas.

Palabras clave: Diseño mecánico del molino de bolas, método de Bond, programación numérica, transporte público, desarrollo sustentable.

ABSTRACT. Currently available in public transportation the need to constantly replace brake Pasta factor mainly due to wear and for safety reasons. This paper proposes to create the basis for the overall design of a prototype machine capable of re- use and reduce the size of the brake pastas public transport that are out of use to be used as the main agent in a slurry. This paste is used as insulation material in construction, covering walls and ceilings, also in the development of solid base paving streets. To implement this proposal using the method of Bond blocks in order to estimate the initial size of the mill and the necessary power through the creation of a BM- Crush numerical program, thus avoiding pilots to build mills where this is possible. The main results obtained are the general methodology for calculating the mechanical power and the necessary dimensions of the mill based on any changes in the initial conditions of operation, as well as the distribution of the grinding media and their sizing. Critical velocity is estimated on this basis established the optimal speed at which to rotate the ball mill.

Keywords: Mechanical design of ball mill Bond method, numerical programming, public transport, sustainable development.

INTRODUCCIÓN

Existen en México alrededor de 23 millones de automóviles por lo que recuperar una parte de las pastas de freno generaría un impacto favorable en el medio ambiente, además de beneficios sociales y económicos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2012)¹. En promedio se puede estimar que se tiran

más de un medio millón de balatas diariamente. Por lo que se requiere recuperar parte de estas pastas y transformarlas para ser utilizadas en recubrimiento de paredes, techos y calles con propiedades impermeables, reduciendo con esto la acumulación de hasta 200 toneladas de desechos sólidos diariamente. Con-

¹ INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA: Vehículos de motor registrados en circulación en México, [en línea] 2012, Disponible en: http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/Proyectos/bd/continuas/transporte/vehiculos.asp?s=est&c=13158&proy=vmrc_vehiculos [Consulta: 15 de abril de 2013].

tribuyendo con esto al uso racional de los recursos naturales, aprovechando un material que se desgasta rápidamente para darle un segundo ciclo de uso (Valencia y Gallo, 2010; Cárdenas *et al.*, 2011; Zafra Mejía *et al.*, 2013).

Para recuperar y utilizar la pasta, se necesita destruirla, por medio de una máquina que sea capaz de reducir su tamaño hasta un promedio de 0,1 mm. Existen diversos métodos y máquinas con principios mecánicos de reducción de materiales. Uno de los más empleados con mucho éxito en la industria de la minería y del cemento (Ossa *et al.*, 2014) es el molino de bolas que emplea principalmente la acción del impacto (Duda, 1977; Pardave, 2006; Osorio *et al.*, 2014; Solórzano *et al.*, 2014).

Los molinos de bolas son esencialmente reactores que transforman partículas grandes a partículas más pequeñas (Orozco Cardona *et al.*, 2014). Son equipos sencillos, relativamente baratos de construir, seguros, fáciles de controlar y de mantener y tienen bajos requerimientos de energía por tonelada de producto comparados con otros tipos de equipo de molienda, por lo que el propósito de este trabajo se centra en presentar las bases del diseño general de una máquina capaz de moler pastillas de freno para su recuperación en la creación de una pasta con propiedades aislantes, para recubrimientos de ingeniería aplicada (Shigley y Mitchell, 1989; Romero *et al.*, 2006; Norton, 2011).

MÉTODOS

El primer paso consiste en interpretar los requerimientos del diseño del molino de acuerdo con las necesidades del problema (Tabla 1), para esto es necesario fijar las metas del diseño del molino y evaluarlas con base en criterios de ingeniería (Romero *et al.*, 2006; Cárdenas *et al.*, 2011; Norton, 2011).

TABLA 1. Requerimientos del diseño

Id	Concepto	Función
1	Tipo de molino	Bolas de acero
2	Tipo de energía	Eléctrica
3	Tipo de transmisión	Engranajes
4	Entrada de producto	Manual con posibilidad a automática
5	Salida de producto	Semiautomática
6	Tipo de motor	Trifásico/Reductor
7	Operación y control	Automática
8	Seguridades	Automática
9	Ensamblaje	Modular
10	Dimensionamiento	Compacto
Parámetros principales de operación del molino		
Capacidad máxima		100 kg
Dimensiones máximas		[1,20 x 1,0 x 1,50] m
Salida promedio del producto		0,1 mm

Método de Bond para la determinación del diámetro del molino

El método de Bond (Bond, 1960; Wang *et al.*, 2014), se

encuentra dentro de los métodos aproximados de diseño que ha encontrado una amplia aceptación en la industria minera-metalúrgica, la experiencia demuestra que es efectivo para muchas circunstancias. El objetivo del método es seleccionar el diámetro y largo de un molino, para producir Q toneladas por hora de un material, con un tamaño de reducción especificado, basándose en el índice de Bond (W_i). La descripción del material se muestra en la Tabla 2.

TABLA 2. Descripción del mineral según su W_i

Descripción	Límite W_{it} (kWh/ton) métricas
Muy blando	8
Blando	8-12
Medio	12-16
Duro	16-20
Muy duro	20-24
Extremadamente duro	+24

Para otras condiciones de trabajo se necesita corregirlo mediante el factor de conversión K_j mediante las ecuaciones (1) y (2):

$$W_i = K_j W_{iD} \quad (1)$$

siendo:

$$K_j = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 \quad (2)$$

Los cuales se describen a continuación:

K_1 : Conversión a circuito abierto, (Tabla 3):

TABLA 3. Conversión de circuito cerrado a circuito abierto

Control sobre el tamaño del producto (% paso)	K_1
P (p ₁)	
50,00	1,035
60,00	1,05
70,00	1,10
80,00	1,20
90,00	1,40
92,00	1,46
95,00	1,57
98,00	1,70

K_2 : Conversión a molienda seca:

$$K_2 = \begin{cases} 1.3 & \text{molienda seca} \\ 1.0 & \text{molienda húmeda} \end{cases}$$

K_3 : Corrección por sobre tamaño en la alimentación: Si el tamaño de alimentación es tal que se cumple, (Ecuación 3):

$$D_{80} > \frac{4000}{\sqrt{1.10 \frac{13}{W_{it}}}} \quad (3)$$

Es necesario corregir el Índice de Trabajo expresado en kWh/ton métrica, mediante el factor K_3 dado por la Ecuación 4:

$$EF_3 = \frac{R_r + (w_i - 7) \left[\frac{D_{80} - F_0}{F_0} \right]}{R_r} \quad (4)$$

donde

Además se tiene que:

R_r = Relación de reducción = D_{80}/d_{80} (material de alimentación/material de salida);

w_i = Índice de Bond (molino de bolas) (kWh/sht);

F_o = Tamaño óptimo de alimentación;

w_i = Índice de Bond (molino de bolas) (kWh/sht).

K_4 : Corrección por fineza de molienda, (Ecuación 5):

$$K_4 = \frac{(d_{80} + 10.3)}{1.145d_{80}} \quad (5)$$

K_5 : Corrección por razón de reducción pequeña, (Ecuación 6):

$$K_5 = 1 + \frac{0.13}{\left(\frac{D_{80}}{d_{80}}\right) - 1.35} \quad (6)$$

K_6 : Factor de Eficiencia del Diámetro, según la Ecuación 7:

$$K_6 = \left[\frac{2.44}{D} \right]^{0.2} \quad (7)$$

donde:

D = Diámetro interior entre revestimientos (m);

K_7 (Alto/Bajo ratio de reducción): En el caso de molinos de bolas $K_7 = 1$;

K_8 (solo para molinos de barras): No se aplica. $K_8 = 1$.

Cálculo de la energía específica consumida.

Bond (Bond, 1960; Fueyo, 1999) estableció que, la energía específica necesaria se podía relacionar a los tamaños de alimentación D_{80} y producto d_{80} mediante la Ecuación (8):

$$E = W_i = \left[\frac{10}{\sqrt{D_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{d_{80}}} \right] \quad (8)$$

donde:

E = Energía específica de molienda en kWh/t;

d_{80} y D_{80} = Tamaños del 80% del producto y alimentación al circuito en μm .

W_i = Índice de Trabajo en kWh/t.

La energía específica de molienda dada por la Ecuación 9, está en función de la potencia que consume el molino en el eje (sin tomar en cuenta las pérdidas eléctricas), tal que se cumple:

$$P_a = CE \quad (9)$$

donde:

P_a = Potencia en el eje en kW;

C = Flujo de mineral en ton/h.

Cálculo de la potencia para mover los medios de molienda

Bond (Rose y Sullivan, 1958; Bond, 1960; Fueyo, 1999) propuso una ecuación que da la potencia necesaria para mover los medios de molienda, por unidad de éstos. La potencia de

un molino es el principal parámetro que va a determinar sus dimensiones y estas se obtienen por medio de la Ecuación 10.

$$P_a = 10w_i \frac{1}{0.907} \left[\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right] * C \quad (10)$$

donde:

P_a = Potencia mecánica absorbida (kW);

C = Capacidad del molino de bolas (ton/h);

w_i = Índice de Bond corregido (kWh/t);

d_{80} = Material de salida;

D_{80} = Material de entrada.

La potencia eléctrica será obtenida directamente desde la potencia mecánica aplicando un factor de eficiencia que están relacionadas con las pérdidas y oscila en un rango de (94 a 96) %. Se desarrollan las ecuaciones mediante la creación de un programa numérico (BM-Crush) el cual se muestra en el diagrama de flujo en la Figura 1. Este programa calculará iterativamente el diámetro óptimo.

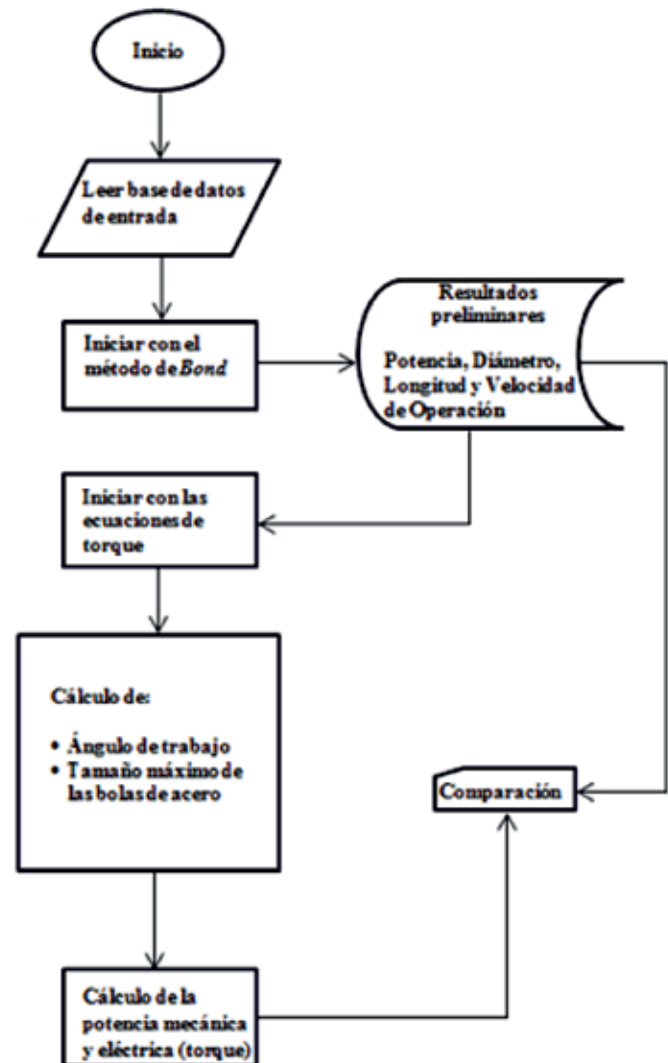


FIGURA 1. Diagrama de flujo del programa BM-Crush.

El diámetro del molino será obtenido mediante la Ecuación 11, y la longitud dependerá de la relación (L/D) que se halla su-

puesto desde el inicio de los cálculos, donde K_B es una constante que es igual a 4.456×10^{-5} para molienda seca.

$$D = \left[\frac{P_E}{K_B (J)^{0.461} (\phi_c)^{1.505} \left(\frac{L}{D} \right)} \right]^{\frac{1}{3.5}} \quad (11)$$

Tamaño máximo de las bolas de acero

El tamaño máximo de las bolas se determina mediante la Ecuación 12 desarrollada por Bond.

$$d_{B1} = 25.4 \left[\left(\frac{D_{80}}{cbm} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho_s w_i}{100 \phi_c (3.281 D)^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] [mm] \quad (12)$$

donde;

ρ_s = densidad del material a moler en gr/cm^3 ;
 cbm = constante del molino de bolas = 350.

Velocidad centrípeta y ángulo de caída

$$F_{cp} = \frac{mv^2}{r} \quad (13)$$

$$mg * \sin(\phi) = \frac{mv^2}{r} \quad (14)$$

Donde m es la masa de la partícula, v la velocidad tangencial en (m/s) y r es el radio de giro.

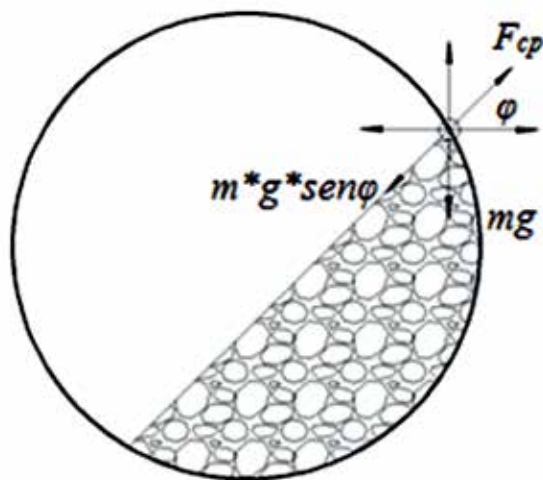


FIGURA 2. Velocidad y ángulo de levantamiento de la carga.

Para calcular el ángulo de caída o de levantamiento de carga, primero hay que calcular la velocidad centrípeta según Ecuación 15.

$$N = \sqrt{\frac{\sin(\phi)}{kr}} \text{ cuando } \phi = 90 \text{ entonces } N = \sqrt{\frac{1}{kr}} \quad (15)$$

De esta ecuación se puede calcular el ángulo de levantamiento

de la carga, ya que a la velocidad N será afectada por un factor que varía entre 0,7 y 0,9. Este ángulo servirá para calcular el torque necesario para mover la carga. Este es el mismo que el de la Figura 2, esto servirá para calcular el torque y la potencia mecánica.

$$(\phi) = \arcsen(kN^2 r) \quad (16)$$

Potencia en función del par mecánico

La potencia mecánica de un molino se puede estimar si se conoce el torque (par mecánico) y la velocidad angular, como sigue;

$$P_{molino} = \tau \omega \quad (17)$$

dónde;

$$\omega = \left(\frac{2\pi N}{60} \right), \tau = M_t * c * \sin(\phi) \text{ y } M_t = m_T g \quad (18)$$

Por lo que se obtiene la potencia estimada de un molino en función de su par mecánico:

$$P_{molino} = m_T g \left[(r - h_b) + \left(\frac{4h_b}{3\pi} \right) \right] \left(\frac{2\pi N}{60} \right) \sin(\phi) \quad (19)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron los parámetros generales de diseño del molino usando el método de Bond, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Cálculos obtenidos mediante el método de Bond

Diámetro del molino (interno)	0,594	m
Longitud del molino (interno)	0,88	m
Potencia eléctrica estimada	2,53	hp
R.P.M. salida	44,0	rpm

Se usaron bolas de acero de 50 mm a partir de eso se hizo una distribución para mejorar el rendimiento de la molienda. En la Tabla 5, se tiene la distribución de las bolas de acero para un llenado del 25% con una carga de las bolas de acero de 202 kg.

TABLA 5. Distribución de las bolas para el molino diseñado

Distribución en (mm)	Fracción (%) en peso	Peso por bola (kg)	Número de bolas	Carga de bolas (kg)
50	40	0.513	157	80.6
40	45	0.263	347	91
25	15	0.064	476	30.4
Total	100		978	202

Potencia y torque en función del ángulo de levantamiento

La Figura 3 muestra potencia y el torque en por unidad (p.u.), teniendo como base una potencia de 10 kW. Se puede observar que el torque necesario cuando alcanza la velocidad

centrípeta, ya no se incrementará más con el aumento de la velocidad. La potencia sin embargo tiende a incrementarse ya que está en función de la velocidad, es decir de la rapidez con la que se realiza el trabajo.

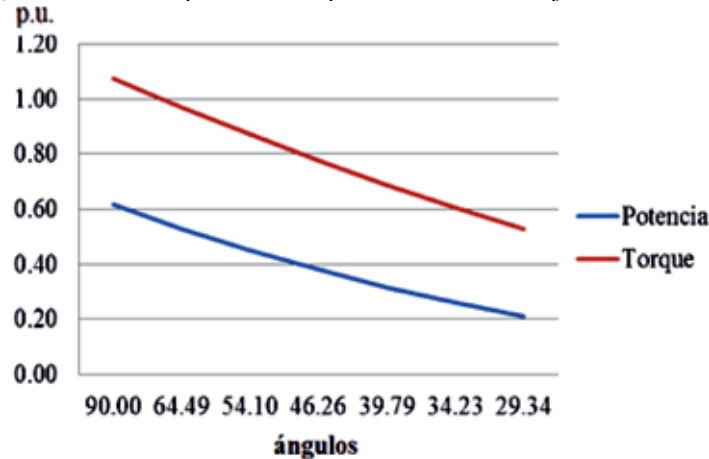


FIGURA 3. Potencia y torque del molino en función del ángulo de levantamiento.

Con base a los resultados obtenidos (Tabla 6) se elige un moto-reductor comercial de 5 hp.

En la Tabla 7 se muestran las condiciones en las que opera un motor-reductor de una potencia de 5 hp, 730 Nm de torque nominal y una velocidad de salida de 43 rpm. Los datos son para un modelo comercial con base a los parámetros de diseño arrojados por el programa BM-Crush.

Con el empleo del método de Bond fue posible estimar inicialmente las dimensiones iniciales del molino y la potencia

necesaria, mediante la creación de un programa numérico BM-Crush, evitando con esto construir molinos pilotos hasta donde esto es posible. Esto ha sido demostrado ampliamente en este y en otros campos de la ciencia y la tecnología en donde las ventajas de los métodos y simulaciones numéricas son evidentes (Ocampo *et al.*, 2011; Fernández *et al.*, 2014; Ocampo *et al.*, 2014).

Finalmente se muestra en la Figura 4 el diseño conceptual del molino de bolas en donde se ha supuesto un espesor de 19,1 mm.

TABLA 6. Potencia de un molino a diferentes velocidades con un 40% de llenado

Porcentaje	velocidad (rpm)	Ángulo	kW	hp	w (rad/s)	Torque (Nm)
100	54,878	90,00	5,766	8,226	5,747	1 003,764
95	52,134	64,49	4,944	7,053	5,460	905,897
90	49,390	54,10	4,204	5,997	5,172	813,049
85	46,647	46,26	3,541	5,057	4,885	725,219
80	43,903	39,79	2,952	4,212	4,597	642,409
75	41,159	34,23	2,433	3,470	4,310	564,617
70	38,415	29,34	1,978	2,822	4,023	491,844

Los datos técnicos del motor - reductor de eje hueco comercial de (60 mm) son los siguientes.

Tabla 7. Condiciones de operación de la selección de un motor – reductor

Velocidad nominal [rpm]	1750
Velocidad de salida [rpm]	43
Torque [Nm]	730
Torque máximo [Nm]	832
Potencia [hp]	5
Tensión [V]	220
Corriente [A]	12.1
Peso total [kgf]	85



² OCAMPO, A.; URRIOLAGOITIA, G.; MERCHÁN, E.; CRUZ, HERNÁNDEZ, D.: "Aproximación discreta para ecuaciones diferenciales ordinarias usando C++", En: IV Congreso Internacional sobre la Enseñanza y Aplicación de las Matemáticas, 2011.

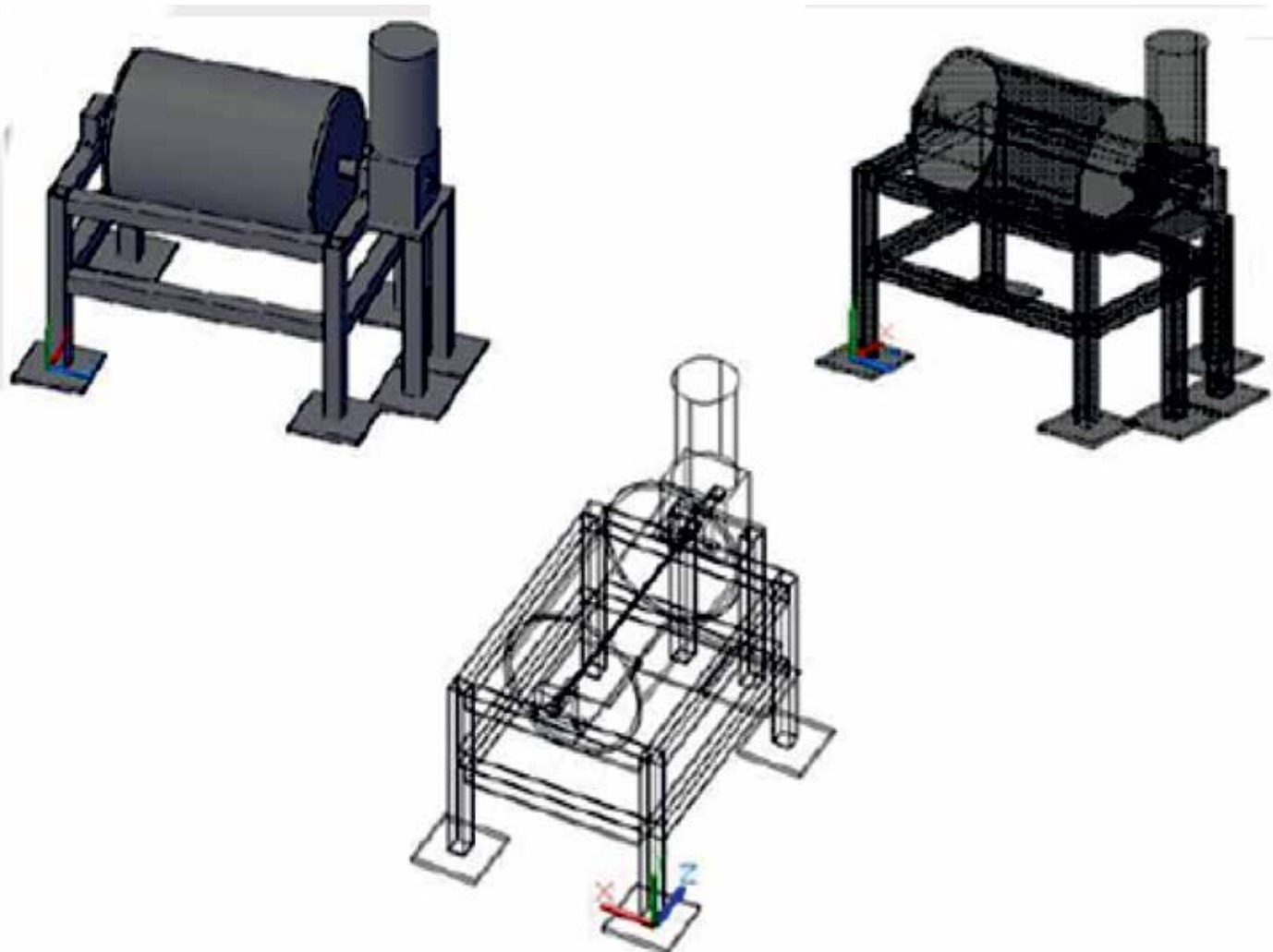


FIGURA 4. Diseño conceptual del molino de bolas.

CONCLUSIONES

- Con el empleo del método de Bond fue posible estimar inicialmente las dimensiones iniciales del molino y la potencia necesaria, mediante la creación de un programa numérico BM-Crush, evitando con esto construir molinos pilotos hasta donde esto es posible. Esto ha sido demostrado ampliamente en este y en otros campos de la ciencia y la tecnología en donde las ventajas de los métodos y simulaciones numéricas son evidentes.
- Se desarrolló la metodología general para calcular la potencia mecánica y las dimensiones necesarias del molino con base a cualquier cambio en las condiciones de operación.
- Se establece la distribución de los medios moledores y sus dimensiones óptimas.
- Se estima la velocidad crítica con base en esto se establece la velocidad optima con la que debe girar el molino de bolas.
- Se desarrollan las ecuaciones necesarias para estimar la potencia eléctrica necesaria para mover el molino de bolas a una velocidad determinada con base a su torque y se incluyen en el programa BM-Crush para su comparación entre la potencia calculada mediante el método de Bond y ésta.
- Es necesario incluir una metodología dentro del programa BM-Crush que incluya el cálculo del espesor del molino con base a los criterios de falla de Von-Mises.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOND, F.C.: "Crushing and Grinding Calculations", *British Chemical Engineering*, ISSN-0007-0424, 6 (1): 378-391, 1960.
- CÁRDENAS, J.C.; MAYA, D.L.; LÓPEZ, M.C.: "Métodos experimentales y participativos para el análisis de la acción colectiva y la cooperación en el uso de recursos naturales por parte de comunidades rurales", *Cuadernos de desarrollo rural*, ISSN-0122-1450, 50: 63-96, 2011.
- DUDA, W.: *Manual Tecnológico del Cemento*, [en línea] Ed. Técnicos Asociados SA, pp. 348, ISBN-9788471460950, España., 1977. Disponible en: <http://www.casadellibro.com/libro-manual-tecnologico-del-cemento/9788471460950/214371> [Consulta: 12 de septiembre de 2014].

- FERNÁNDEZ, D.V.; HERNÁNDEZ, L.H.; BELTRÁN, J.A.; OCAMPO, A.R.; FERNÁNDEZ, D.V.: "Evaluación numérico-experimental de los esfuerzos principales en la corteza del fruto de la guayaba (*Psidium guajava* L) variedad enana roja", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 23(1): 60-68, 2014.
- FUEYO, L.: *Equipos de Trituración, Molienda y Clasificación: Tecnología, Diseño y Aplicación*, [en línea] Ed. Rocas y Minerales, 2a. ed., pp. 371, ISBN-9788492312849, Madrid, España, 1999. Disponible en: <http://www.casadellibro.com/libro-equipos-de-trituracion-molienda-y-clasificacion-tecnologia-dis-eno-y-aplicacion-2-ed/9788492312849/900178> [Consulta: 12 de septiembre de 2014].
- NORTON, R.L.: *Diseño de maquinaria*, [en línea] Ed. McGraw Hill, 4a. ed., pp. 888, ISBN-9786073205894, 2011. Disponible en: <http://www.freelibros.org/ingenieria/diseño-de-maquinaria-síntesis-y-análisis-de-máquinas-y-mecanismos-4ta-edición-robert-l-norton.html> [Consulta: 12 de septiembre de 2014].
- OCAMPO, A.R.; HERNÁNDEZ, L.H.G.; FERNÁNDEZ, D.V.; FERNÁNDEZ, D.V.; CERVANTES, R.: "Análisis estático de los esfuerzos y deformaciones de la estructura de un Invernadero tipo «Ventila Cenital» ubicado en Veracruz", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 23(4): 10-16, 2014.
- OROZCO CARDONA, J.C.; ZULUAGA, I.M.; FORERO SOSSA, P.A.; ARANGO ARANGO, P.J.; RESTREPO PARRA, E.: "Síntesis y caracterización de la hidroxiapatita natural obtenida del hueso de cerdo", *Revista Colombiana de Materiales*, ISSN-2256-1013, 5: 165–171, 2014.
- OSORIO, A.; BUSTAMANTE, O.; MARIN, J.M.; RESTREPO, G.: "Evaluación del uso de poliacrilamida como modificador reológico en la molienda de pulpas de cuarzo", *Revista Colombiana de Materiales*, ISSN-2256-1013, 5: 244–249, 2014.
- OSSA, G.I.L.; RIVERA, I.; QUINTERO, F.; BUSTAMANTE, O.: "Aplicación de un modelo de balance poblacional a un molino de bolas en la industria del cemento", *Ingeniería y Ciencia-ing. cienc.*, ISSN-1794-9165, 10 (19): 163–177, 2014.
- PARDAVE, W.L.: *Reciclado industrial de metales*, [en línea] Ed. ECOE, 1a. ed., vol. 1, pp. 135, ISBN-9586484238, Bogotá, Colombia, 2006. Disponible en: http://books.google.com/cu/books/about/Reciclado_industrial_de_metales_Una_apro.html?id=nu9UzHorkZYC&redir_esc=y [Consulta: 12 de septiembre de 2014].
- ROMERO, H.O.; MUÑOZ, N.D.; ROMERO, H.S.: *Introducción a la Ingeniería, un Enfoque Industrial*, [en línea] Ed. Cengage Learning, 01 ed., pp. 358-408, ISBN-9706865551, 2006. Disponible en: <http://www.elsotano.com/libro-introduccion-a-la-ingenieria-un-enfoque-industrial-10220315> [Consulta: 12 de septiembre de 2014].
- ROSE, H.E.; SULLIVAN, R.M.E.: *A Treatise on the Internal Mechanics of Ball, Tube, and Rod Mills*, [en línea] edit. Constable, Ed. Chemical Pub, pp. 258, ISBN-9780094553200, 1958. Disponible en: http://www.google.com/cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fbooks.google.com%2Fbooks%2Fabout%2FA_treatise_on_the_internal_mechanics_of.html%3Fid%3DJM1BAQAIAAJ&ei=2lMTVLqZLqalsQSy_oHABw&usg=AFQjCNGuJJdroamx8rXWu0_n3JeVNtYuiA&bv=75097201.d.cWc [Consulta: 12 de octubre de 2014].
- SHIGLEY, J.E.; MITCHELL, L.D.: *Diseño en ingeniería mecánica*, [en línea] Ed. McGraw Hill, pp. 915-918, ISBN-968451607X, 1989. Disponible en: http://isbn2book.com/968-451-607-X/diseño_en_ingeniería_mec%C3%A1nica/ [Consulta: 12 de octubre de 2014].
- SOLÓRZANO, J.; PEREA, J.; TORO, E.; VANEGAS, O.: "Reducción del impacto ambiental de un residuo peligroso de la industria del cobre", *Revista Colombiana de Materiales*, ISSN-2256-1013, 5: 277–282, 2014.
- VALENCIA, A.G.; GALLO, M.H.G.: "Diagnóstico ambiental y técnico mecánico del sector volquetas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá", [en línea] *Producción Más Limpia*, ISSN-1909-0455, 5 (1), 2010. Disponible en: <http://www.lasallista.edu.co/xfcul/media/pdf/RevistaLimpia/Vol5n1/39-57.pdf> [Consulta: 12 de octubre de 2014].
- WANG, Y.; ZHANG, Z.; XU, Y.; XI, Y.: "Tensile Fracture Simulation in Rock Using Augmented Virtual Internal Bond Method", [en línea] *Rock Mechanics and Its Applications in Civil, Mining and Petroleum Engineering*, ISBN-978-0-7844-1339-5, pp. 13-19, Ed. American Society of Civil Engineers, 2014. Disponible en: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784413395.003> [Consulta: 12 de octubre de 2014].
- ZAFRA MEJÍA, C.A.; PEÑA VALBUENA, N.Á.; ÁLVAREZ PRIETO, S.: "Contaminación por metales pesados en los sedimentos acumulados sobre el corredor vial Bogotá-Soacha", *Revista Tecnura*, ISSN-0123-921X, 17(37): 99–108, 2013.

Recibido: 13/11/2014.

Aprobado: 19/04/2015.

Publicado: 14/06/2015.

Arturo Ocampo Ramírez, Ing., Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Ciudad de México, México. Correo electrónico: ingaor@hotmail.com

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.