

ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE MOLINOS ROTATORIOS A TRAVÉS DE SIMULACIONES MED

L. Magne¹, A. Gutiérrez², G. Titichoca¹

¹ Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile, Av. L.B. O'Higgins 3363, Santiago, Chile

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile, Av. L.B. O'Higgins 3363, Santiago, Chile

E-mail: lmagne@usach.cl

RESUMEN

La evolución de los molinos rotatorios, en tamaño y potencia instalada, ha traído consigo cambios importantes en los conceptos que definen la operación de estos equipos. De este modo, muchos parámetros que hace algunos años sólo definían condiciones de diseño, hoy son variables operacionales importantes para lograr el mejor desempeño de un molino, como es el caso de la velocidad de rotación, el tamaño de medios de molienda y el diseño del revestimiento.

El desarrollo en la Universidad de Santiago de Chile del simulador MillMED (Gutiérrez *et al.*, 2003) basado en el Método de Elementos Discretos, ha permitido analizar las características que presenta la carga interna de un molino rotatorio, pudiendo determinar los niveles de energía, fuerzas de impacto, interacción entre los diferentes componentes de la carga interna y del molino (frecuencias de impacto bola-bola, bola-mineral, bola-revestimiento; y en el caso de molienda semiautógena además de las anteriores, mineral-mineral, mineral-revestimiento), consumo de potencia debido al movimiento de la carga así como evaluar el comportamiento de estas variables con modificaciones en las condiciones operacionales (variaciones de velocidad, cambios en el tamaño de los medios de molienda, modificaciones en el diseño de los revestimientos).

En el presente artículo se presentan los resultados que se obtiene a través de la simulación del movimiento de la carga interna de molinos rotatorios, en particular en la simulación de la operación de un molino semiautógeno.

Palabras Claves

Método de Elementos Discretos, Molienda de Minerales, Molienda Semiautógena

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Conocer el comportamiento del material granulado al interior de un molino resulta equivalente a buscar un objeto perdido en un cuarto oscuro donde caen partículas de gran tamaño desde la parte superior. El conocer el comportamiento resulta incierto porque no se puede observar en forma directa y a su vez resulta de gran dificultad debido a los diferentes tipos de comportamiento que adquiere el material en su interior (sólidos, líquidos, gases). Al esquematizar un molino rotatorio en movimiento, es posible identificar en su interior varias áreas de diferente naturaleza, Figura 1. En la zona A las partículas, que son cuerpos rígidos, vuelan; en la zona B, las partículas ruedan por un plano inclinado de pendiente variable; en la zona C, en la parte baja terminada la cascada, se sitúa la zona de impacto y la que se considera de mayor importancia para la ocurrencia de eventos de reducción de tamaños; la zona D se sitúa en la parte baja de la carga, el comportamiento se asemeja a un fluido del tipo compresible, reconociendo zonas donde el movimiento es mínimo y además se produce segregación.

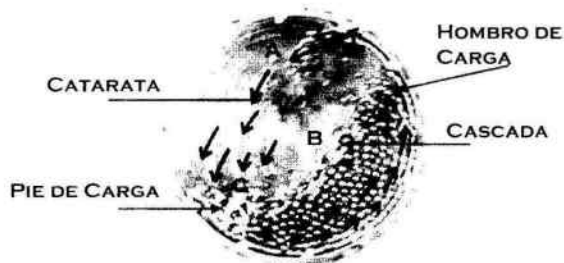


Figura 1. Características de la carga interna de un molino en movimiento.

Desde el punto de vista fenomenológico la conminución se realiza mediante tres mecanismos que se encuentran asociado con las áreas señaladas. Los eventos asociados a impacto, zona C, se ha considerado que es el que tiene mayor incidencia en la molienda. El fenómeno de atrición se genera por la presión que se ejerce sobre las partículas que se encuentran en la zona D, las partículas se fracturan y se debilitan internamente y dependiendo de cuál es su destino cuando salen a la superficie libre se tiene: las que van hacia la zona C se terminan por separar en múltiples trozos y los que van a la zona B, se disgregan por el roce que adquiere con las otras partículas. Del análisis del movimiento de la carga interna del molino, aparecen varias interrogantes, a saber:

- ¿Cuál de los mecanismos presentes es el que mayor aporta al proceso de conminución?
- ¿Cuál es el tamaño de bolas que favorece más al proceso?
- ¿Cuál es la granulometría de mineral que mejor se adapta al proceso?
- ¿Cuál es la velocidad de trabajo óptima para el proceso?
- ¿Cuál es la geometría de levantadores (lifter) apropiada (ángulo, altura, base) para no producir daño estructural y mejorar el proceso de molienda?
- ¿Cuál es el número de levantadores adecuados?, etc.

El presente trabajo muestra el desarrollo alcanzado en la simulación del movimiento de la carga interna de molinos rotatorios utilizando el Método de Elementos Discretos, y que permiten obtener resultados cualitativos y cuantitativos que apuntan a dar respuesta a las preguntas antes descritas.

2. EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (MED)

El MED es un método numérico que permite seguir trayectorias y rotación de todas las partículas y objetos (en coordenadas Lagrangianas) que componen un sistema. Además predice su comportamiento y la interacción con otras partículas y el entorno, considerándolas como cuerpos rígidos. Se puede simular una amplia gama de partículas en cuanto a tamaño (desde algunos metros hasta 500 micrones) y sus interacciones con objetos de formas complejas que forman parte del medio externo. La forma en que trabaja este método de cálculo, es mediante la discretización de las ecuaciones de movimiento de las partículas (consideradas esferas), las que son obtenidas de la integración de las ecuaciones de fuerza y torque que modelan las reacciones sobre cada una de las partículas. El método esencialmente consiste en detectar las colisiones producidas entre las partículas, con lo que se predice las fuerzas producidas entre éstas, y con estas fuerzas se determina el movimiento de las mismas. A las partículas se les permite producir un traslape ξ entre ellas. Las velocidades relativas normal V_n y tangencial V_t son las que determinan finalmente las fuerzas de impacto. Existen varios modelos disponibles para lograr una aproximación de estas fuerzas, por lo general no lineales. En el presente estudio se usará un modelo lineal convencional, presentado en la Figura 2.

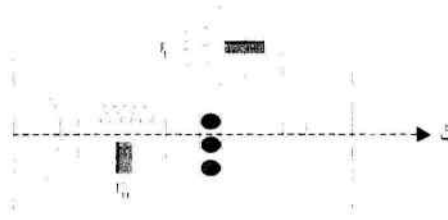


Figura 2. Modelo lineal de fuerzas.

En el modelo, la fuerza normal se encuentra en función del traslape y la velocidad relativa normal V_n , con sus correspondientes coeficientes de rigidez normal y de amortiguamiento respectivamente, la fuerza tangencial está en función de la velocidad relativa tangencial de acercamiento V_t , y de los coeficientes de rigidez tangencial y de amortiguamiento. Las ecuaciones que definen este modelo son:

$$F_n = -k_n \xi - c_n \dot{\xi} \quad (1)$$

$$F_t = \min \left\{ \mu F_n, k_t \int V_t dt + c_t V_t \right\} \quad (2)$$

En el modelo de fuerza normal de la ecuación 1, el primer término del lado derecho de la igualdad, proporciona la fuerza repulsiva de una colisión elástica, y el segundo término, corresponde a la parte plástica o viscosa del impacto, simulando las pérdidas y disipación energética asociada. En el modelo de fuerza tangencial de la ecuación 2, la fuerza tangencial alterna entre dos valores, tomando el mínimo entre los dos. El primer valor es la fuerza de rozamiento de Coulomb dada por el producto entre el coeficiente de fricción μ y la fuerza normal F_n , y el otro es la fuerza transiente, que es la originada cuando no se produce deslizamiento. En este último caso, la expresión con la integral está asociada a la deformación elástica ente las superficies en contacto, proporcionando la repulsión tangencial, y la segunda expresión $c_t V_t$, representa la deformación plástica y las pérdidas asociadas. La fuerza tangencial se encuentra relacionada con la fuerza normal por el modelo de Coulomb para la fricción. Esta se puede escribir de la siguiente manera:

$$F_t \leq \mu_s F_n \quad (3)$$

$$F_t = \mu_d F_n \quad (4)$$

La ecuación 3 representa la condición de fricción estática, en la cual no se contempla el deslizamiento entre los cuerpos. La ecuación 4 representa la fricción dinámica, y si considera el deslizamiento entre los cuerpos. En estas expresiones μ_s y μ_d corresponden a los coeficientes de roce estático y dinámico respectivamente. Normalmente se cumple que $\mu_s > \mu_d$, siendo ambos valores muy próximos. El MED, consta de tres etapas fundamentales:

- Desarrollar una lista de las partículas y sus partículas vecinas, que es construida con ayuda de un arreglo matricial, en que cada partícula está representada por una fila y una columna, activando las filas y columnas de acuerdo al contacto existente entre ellas. De esta forma se reduce considerablemente el número de operaciones realizadas, lo que es muy importante por el gran número de partículas con los que se suele trabajar.
- Determinar las fuerzas de impacto producidas en cada una de las partículas y sobre los bordes del sistema usando el método anterior de celdas y el modelo lineal de resorte y amortiguamiento ya mencionado.
- Obtener la fuerza neta sobre cada una de las partículas y objetos que limitan el sistema. Las ecuaciones resultantes de movimiento son integradas para determinar el cambio de posición y velocidad en el tiempo. Se ocupa un método de integración simple, donde los valores de posición y velocidad son determinados en función de los mismos valores, en el intervalo de tiempo anterior.

Es importante escoger correctamente los valores de las propiedades que se encuentran y gobiernan los impactos entre esfera-esfera y esfera-pared. Estos son:

- los coeficientes de rigidez, tanto normal como tangencial,
- los coeficientes de restitución, que condicionan los valores de los coeficientes de amortiguamiento y

- o el coeficiente de fricción.

La aplicación de este método es factible de hacer en cualquier sistema particulado. Para el presente artículo se realiza para la evaluación del movimiento de la carga interna de un molino semiautógeno industrial, analizando el efecto de modificar algunas variables operacionales y el diseño de los revestimientos del cilindro.

3. SIMULACIÓN DE MOVIMIENTO DE CARGA DE MOLINO SEMIAUTÓGENO

3.1. Molino Semiautógeno

Para realizar el estudio, se analiza tan solo la sección cilíndrica del molino, tal como se puede ver en la Figura 3. Esto significa que el movimiento de los medios de molinada y el material particulado en la dirección axial es despreciable. Desde el punto de vista cinemático el considerar una sección del molino, no afecta significativamente la cinemática general del sistema, debido a que el flujo en la dirección axial presenta valores muy pequeños considerados con el flujo de una sección radial. Se estima por otra parte que esta restricción no afecta significativamente a la dinámica del movimiento dado que por un lado el movimiento de proyectil que los cuerpos tienen, se encuentran sobre un plano, y por otro las fuerzas que se generan en la dirección axial son restringidas por los descansos del molino y no ejecutan trabajo y por lo tanto la energía asociada es mínima.



Figura 3. Espacio de trabajo en el cilindro del molino.

Para la presentación de este artículo se utiliza un molino industrial de 36 pies de diámetro (11 m) y 17 pies de largo efectivo (5,2 m). El nivel de llenado de bolas se fijó en 14%, el nivel de llenado de carga total de 27%. La velocidad de operación considerada fue de 9,7 rpm (76,1 % de la velocidad crítica).

3.2. Granulometría de Carga Interna y Distribución de Tamaño de Bolas

La granulometría del mineral y de bolas de molinada en la carga interna utilizada para las simulaciones se presenta en la Tabla I.

Tabla I. Distribución granulométrica del mineral y de bolas en la carga interna del molino.

Tamaño, plg	Tamaño, mm	Retenido parcial de mineral, %	Retenido parcial de bolas, %
+ 6	152,4	2	-
5	127,0	8	25
4	101,6	11	35
3	76,2	14	40
- 2	- 50,8	65	-

4. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en las simulaciones se analizan tanto de manera cualitativa como cuantitativa. Para los resultados cualitativos se despliegan simulaciones de operación del molino en forma gráfica, en donde se presenta el comportamiento de la carga mediante videos. Los resultados cuantitativos se derivan en valores numéricos que se obtienen de los cálculos numéricos realizados, presentándose mediante gráficos, tablas e imágenes.

4.1. Resultados cualitativos

Para cada simulación realizada es posible desarrollar una secuencia dinámica a modo de video, en las cuales es posible apreciar diferentes cualidades de la carga en movimiento, entre estas:

- distribución de las partículas al interior de la carga en movimiento, donde el atributo destacado es el tamaño de las partículas
- distribución de energías al interior de la carga interna en movimiento, donde el atributo destacado es la velocidad relativa de las partículas
- distribución de materiales al interior de la carga interna en movimiento, donde el atributo destacado es si corresponde a mineral o medio de molienda.

Distribución granulométrica en la carga interna en movimiento. La carga interna en movimiento provoca que los diferentes tamaños de partícula se distribuyan en su interior por efecto de las condiciones del medio. De esta forma a través de las simulaciones es posible visualizar el posicionamiento temporal de los diferentes tamaños de bolas y de mineral, permitiendo cuantificar diferentes características del sistema, como por ejemplo, cuál es el tamaño de bola y/o de material que más vuela; de qué tamaño son las partículas que más impactan en los revestimientos; dónde se ubican las partículas de mayor tamaño; cuál es la trayectoria que siguen las partículas de un tamaño determinado, etc. (Figura 4a).

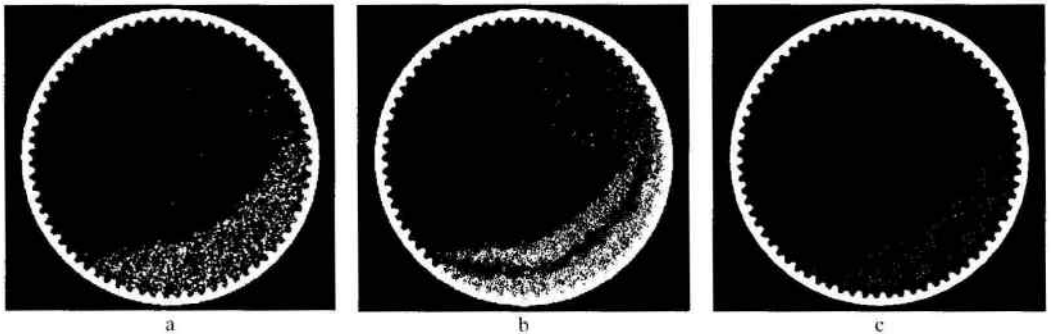


Figura 4. a) Distribución de los diferentes tamaños de partícula en la carga interna en movimiento. La escala de colores indica: rojo son partículas de mayor tamaño, 6 μg ; azul son partículas de menor tamaño, 2 μg . b) Distribución de velocidades en el lecho de carga interna en movimiento. La escala de colores indica: rojo partículas con máxima velocidad; azul partículas con menor velocidad. c) Distribución de mineral y medios de molienda en la mezcla generada en la carga interna en movimiento.

Velocidad de las partículas en movimiento. Los resultados de las simulaciones realizadas permiten determinar el campo de velocidades de cada una de las partículas. De esta manera, es posible discriminar entre zonas con mayor y menor movimiento en la carga, lo que asociado a las características de distribución por tamaños, permiten analizar las características de moliendabilidad que se tendrá por zona de la carga en movimiento y por tamaño de partícula asociado. En este caso, en la Figura 4b, se observa en azul la zona que presenta la menor energía, esto significa que las bolas que se encuentran en dicha zona se mueven más lento que el resto. En la parte media izquierda se puede ver en color rojo una zona dónde la energía cinética es máxima, debido al impacto de las bolas en el lecho. Como medida de verificación de los resultados, se observa que en la zona cercana a las paredes todos los cuerpos tienen el mismo color (verde claro), debido a que mantienen la velocidad de rotación del molino.

Segregación Mineral – Bola. En la Figura 4c se presenta la distribución que alcanza la mezcla mineral – bolas de molienda, con el propósito de determinar cual es la ubicación del material particulado que es susceptible de moler y las bolas como elemento molidor. Su representación es bicolor: de color rojo se representan los medios de molienda y en azul el mineral a moler. En esta imagen se conserva el tamaño de los elementos involucrados.

4.2. Resultados Cuantitativos

Desde el punto de vista cuantitativo se presentan dos grupos de resultados, el primero muestra la variación de la potencia necesaria para hacer rotar el molino, esta potencia se calcula determinando el centro de masa de las partículas y bolas que se encuentran en contacto, integrando toda su masa y multiplicando el brazo de la fuerza equivalente por la velocidad de rotación. El segundo grupo evalúa la cantidad de partículas que se encuentran en el aire, con el propósito de cuantificar los efectos de impacto.

Potencia. La Figura 5a muestra la variación de la potencia que requiere el molino desde el reposo hasta alcanzar la velocidad de régimen para las condiciones de 30% de llenado de carga total con un 12% de llenado de bolas y una velocidad de rotación de 9,9 rpm. Se observa un peak de la potencia inicial, lo cual se debe a la distribución inicial que presenta la carga en el interior del molino. Conforme pasa el tiempo se estabiliza las características del movimiento de la carga reflejando un consumo de potencia estable.

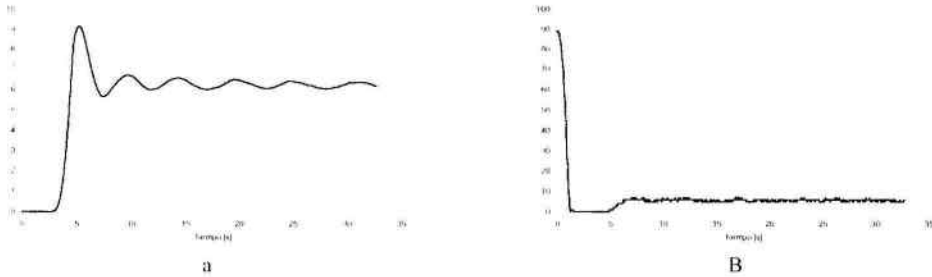


Figura 5. a) Variación de la potencia consumida por la carga en movimiento, b) Variación de la cantidad de material que se encuentra en suspensión cuando el molino está en movimiento.

Se debe indicar que los valores de potencia obtenidos sólo consideran la necesaria para mover la carga, faltando por incorporar todos los efectos de pérdidas de potencia debido a efectos mecánicos como roce en los descansos e imperfecciones geométricas. Para el análisis de los resultados de potencia se considera el promedio a partir de los 15 segundos de operación.

Material suspendido en el aire. La Figura 5b muestra la variación del porcentaje de partículas libres desde la puesta en marcha hasta alcanzar la velocidad de régimen del molino. Como resultado (promedio después de 15 s de movimiento) se obtiene que un 5,7% del total de partículas se encuentran en el aire, es decir, no tienen contacto con otras partículas o paredes cuando se encuentra en régimen estacionario. Este índice, altivamente bajo respecto a lo que se espera inicialmente, da una idea de la importancia relativa que tiene el impacto en el proceso y representa una cota superior de contribución de este mecanismos de molienda en la cominución. De esta forma es posible dimensionar que sólo una pequeña fracción de las partículas que se encuentran suspendidas en la “catarata” producen fragmentación por impacto, siendo el resto de la cominución debido a la atrición y abrasión presente en la “cascada”.

Distribución de la energía de impacto. El concepto de energía de impacto, se asocia a la energía que se transmite en la carga al interior del molino. Considerando los elementos que interactúan al interior del molino, los impactos se clasifican en 5 tipos:

- Impacto entre medios de molienda (Bola-Bola, BB)
- Impacto entre medios de molienda y mineral (Bola-Mineral, BM)
- Impacto entre mineral (Mineral-Mineral, MM)
- Impacto entre medios de molienda y el revestimiento (Bola-Revestimientos, BR)
- Impacto entre el mineral y el revestimiento (Mineral-Revestimientos, MR).

En el gráfico de la Figura 6 se muestra la distribución de la energía transmitida en impacto en la carga, la cual se mide a partir de los 25 segundos de operación (movimiento de carga en estado estacionario). Estos resultados consideran solamente las partículas de simulación (sección 2D) sin extrapolar el resultado para todo el largo del molino. Para la simulación realizada se observa que la energía disipada en impacto Bola-Bola es aproximadamente 40% de toda la energía que se transmite en los impactos. De igual forma se tiene que el impacto Bola-Mineral transmite 37% de la energía total y para Mineral-Mineral se alcanza un 17,4%. Mientras que los impactos que presenta el menor nivel de disipación de energía son los Bolas-Revestimiento y Mineral-Revestimiento, siendo de un 1,4% y 4,4% respectivamente.

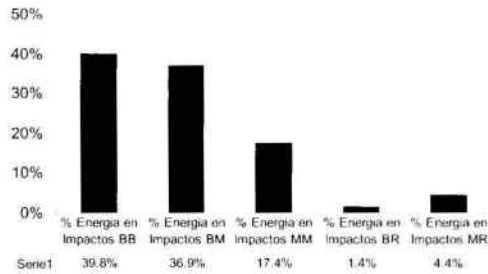


Figura 6. Distribución porcentual de la energía de impacto en los diferentes eventos que ocurren en la carga en movimiento.

Considerando la definición anterior, se derivan dos nuevos conceptos: Energía Útil de Impacto y Frecuencia de Impactos. Estos conceptos pueden ser empleados para realizar análisis de sensibilidad de casos simulados y se definen a continuación.

Energía útil de impacto. Considerando que el objetivo de la molienda está dado por reducir el tamaño de mineral mediante impacto, se puede decir que los impactos que se buscan favorecer son los que involucran el mineral, de tal forma que: la energía útil de impacto es la suma de las energías de impactos Bola-Mineral, Mineral-Mineral y Mineral-Revestimientos. Bajo este mismo concepto, se considera que los impactos entre bolas y de bolas con revestimientos, son contraproducentes al objetivo de molienda. Aplicando este concepto a los resultados presentados en la tabla anterior se tiene que 58,7% de la energía disipada en impacto se aprovechada para moler mineral, y lo restante se consume en desgaste de bolas y revestimientos. Además de la fracción porcentual de la energía de impacto, interesa conocer el valor numérico, el cual se obtiene como la suma acumulada a partir de los 25 s de simulación.

Frecuencia de impactos útiles. Además de conocer cómo se distribuye la energía de los impactos al interior del molino, será importante conocer con qué frecuencia se distribuye esa energía. Esto se relaciona con la cantidad de impactos que se registran en el sistema. A diferencia de la energía, la frecuencia de impactos requiere de un controlador numérico, que diferencia el contacto simple de un impacto. Debido a esto, se ha definido arbitrariamente que los impactos contados para determinar la frecuencia de impactos útiles, son filtrados con la condicional de que la velocidad relativa que alcanzan las partículas debe ser superior al equivalente al de una caída libre de 1 metro ó 4,43 m/s.

Para una misma distribución de energía se presenta la siguiente analogía: Un mineral de mayor dureza requiere que la energía de impacto se distribuya en una menor cantidad de impactos, asegurando que la cantidad de energía por unidad de impacto sea mayor. Mientras que un mineral más blando se puede moler con impactos de menor energía que un mineral más duro, por lo cual interesa que la energía de impacto se distribuya en un mayor número de impactos. La Figura 7 presenta un gráfico con la frecuencia de impactos registradas para la condición simulada.

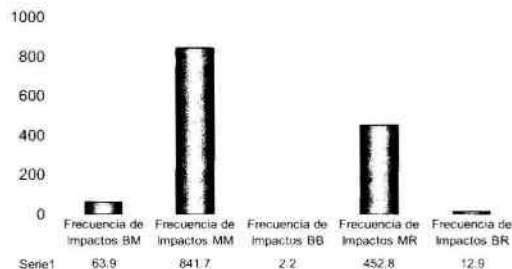


Figura 7. Distribución de frecuencia de impactos, medidos como impactos/segundo.

Considerando que los impactos útiles son los que se produce en Bolas con Mineral, Mineral con Mineral y Mineral con Revestimientos. Para el resultado presentado en la tabla se tienen **1358 impactos/s** que producen daño al mineral, mientras que hay 15 impactos/s que generan daños a la carga de bolas o al revestimiento.

Fuerzas de impacto sobre revestimientos. Los resultados anteriores permiten tener información valiosa para evaluar el proceso de conminución del mineral. Sin embargo, además es posible estimar el daño producido sobre el revestimiento. La Figura 8 muestra en forma gráfica la distribución de fuerzas para los impactos ocurridos sobre el cilindro del molino. El eje horizontal corresponde a la posición angular sobre el cilindro siendo desde 0° hasta 360° , mientras que el eje vertical corresponde a las fuerzas registradas en [N] para valores alcanzado mayores a 1000 [N]. Los resultados obtenidos, permiten indicar que el promedio de fuerzas de impactos, para este caso, es de 194 kg, lo que equivale a 1903 N.

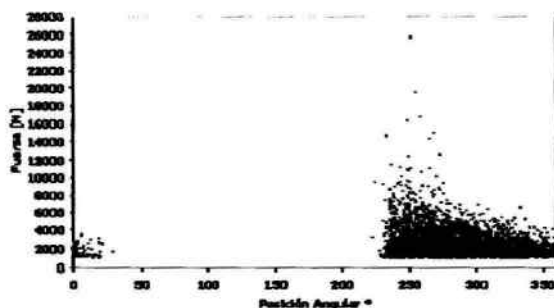


Figura 7. Distribución de fuerzas de impacto sobre el manto cilíndrico del molino.

5. CONCLUSIONES

- El programa de simulación MillMED desarrollado en la Universidad de Santiago de Chile, permite realizar simulaciones del movimiento de la carga interna de un molino rotatorio, obteniendo resultados que pueden ser analizados en forma cualitativa y cuantitativa. Esto ha permitido a la fecha responder a interrogantes como las condiciones óptimas de operación de molinos semiautógenos, dadas determinadas características del proceso, o encontrar el diseño de revestimientos óptimo para condiciones de carga interna determinados.
- Existen una serie de parámetros que son ingresados como datos al programa computacional, como son el coeficiente de roce y coeficiente de restitución, que tienen gran influencia en el comportamiento del sistema. Dichos valores deben ser ajustados en forma específica a cada estudio particular.
- Ha sido posible concluir que la cantidad de partículas que se encuentran en vuelo, y que pueden actuar a través de eventos de impacto es mucho menor que el considerado a la fecha, dejando de manifiesto que la fractura por impacto es importante pero no en la magnitud que se considera normalmente. Un aporte importante lo representa la conminución del mineral en el lecho de la carga por atrición.
- Ha sido posible determinar el requerimiento de potencia asociada al movimiento de la carga interna del molino.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef) de la Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, su financiamiento a través del proyecto D0211077 "Sistema de Control Optimizante para Plantas de Molienda Semiautógena".

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gutiérrez, A., Magne, L., Ortiz, A., Análisis de Movimiento de Carga en Molinos para la Minería Mediante el Método de los Elementos Discretos, Workshop SAG'2003, Viña del Mar.