

UNIDAD III: MOLIENDA

INTRODUCCION

Los procesos de reducción de tamaño de minerales, tienen por objetivo liberar aquellas especies minerales útiles que se encuentran dispersos en una gran masa, la que generalmente carece de valor comercial. La molienda en particular, que genera un material fino como producto, requiere de una gran inversión de capital y es el área de máximo uso de energía y materiales resistentes a la abrasión. Los molinos, utilizan diferentes medios moledores, estos son levantados por la rotación del molino, para fracturar las partículas minerales por medio de la combinación de diferentes mecanismos de fractura, como impacto y abrasión. Los medios de molienda pueden ser el mismo mineral (autógenos), no-metálicos (naturales o manufacturados), de pebbles, (medios metálicos como barras o bolas).

En general el termino molino rotatorio incluye molinos de barras, molinos de bolas, molinos de pebbles y molinos autógenos. El molino rotatorio posee una forma cilíndrica o conico-cilíndrica que, rota en torno a su eje horizontal. La velocidad de rotación, el tipo de revestimiento, la forma y tamaño de los medios de molienda son seleccionados para proveer las condiciones deseadas de operación para cada aplicación específica de molienda.

La clasificación de los molinos rotatorios está basada en el tipo de medios de molienda utilizados, la razón largo-diametro y el método de descarga. Para molinos de barras, los medios de molienda consisten en barras de acero y el cilindro posee una relación largo-diámetro de 1,5:1 o mayor. Los molinos rotatorios que utilizan bolas de acero o de hierro fundido como medios de molienda, poseen una relación igual al a los molinos de barra. Los molinos rotatorios que utilizan partículas del mismo mineral (autógenos) como medios de molienda una relación largo-diámetro de 0,5:1.

La alimentación al molino rotatorio se realiza a través del orificio del muñón de entrada. El método de descarga del producto varía dependiendo del diseño de la descarga del molino. El método de descarga rápida o por rebalse permite al mineral molido pasar a través del orificio del muñón de salida del molino. En un molino con parrilla de retención en el interior del molino, el mineral debe ser molido a un tamaño tal que las partículas puedan pasar a través de la parrilla. En

este tipo de descarga, se pueden alcanzar velocidades de descarga intermedias y/o lentas.

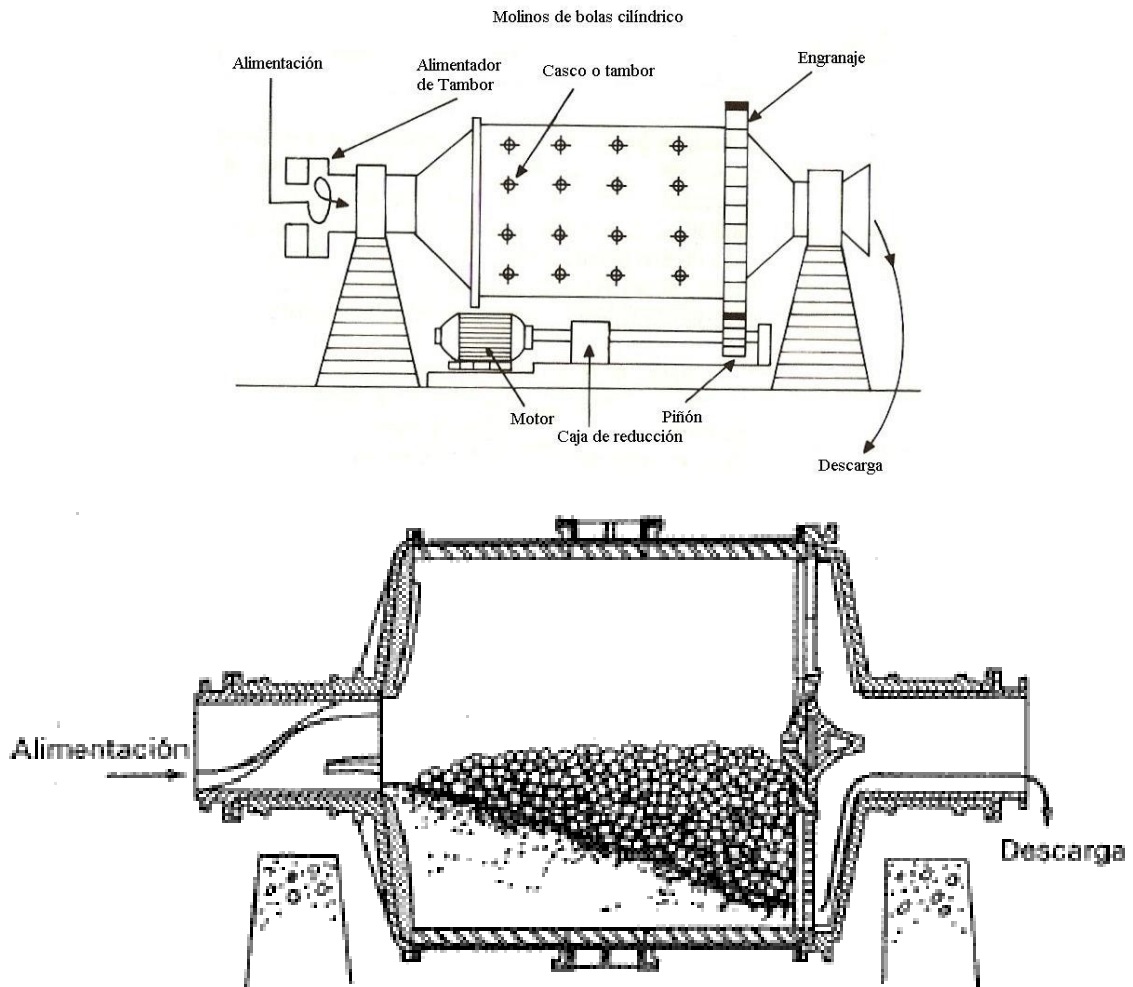


Figura 7.19 Molino con parrilla de descarga.

ELEMENTOS IMPORTANTES EN LA MOLIENDA

Existe una serie de elementos importantes que influyen en la molienda de los materiales. Estos son:

- Velocidad crítica
- Relaciones entre los elementos variables de los molinos
- Tamaño máximo de los elementos moledores
- Volumen de carga
- Potencia
- Tipos de molienda: húmeda y seca.

Velocidad crítica

La velocidad crítica para un molino y sus elementos moledores es aquella que hace que la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos moledores, equilibre el peso de los mismos en cada instante. Cuando esto ocurre, los elementos moledores quedan “pegados” a las paredes internas del molino y no ejercen la fuerza de rozamiento necesaria sobre el material para producir la molienda. El molino, entonces, dejara de trabajar a velocidades superiores a la crítica.

Relaciones entre los elementos variables

El diámetro del molino, su velocidad y el diámetro de los elementos moledores son elementos variables del proceso. Teniendo en cuenta que en la molienda se emplean elementos moledores de distintos tamaños, las relaciones entre los elementos variables son:

- A mayor diámetro de bolas, mayor es la rotura de partículas grandes (percusión)
- A menor diámetro de bolas, mayor es la molienda de partículas pequeñas por una mayor superficie de los elementos moledores (fricción)
- A mayor diámetro de bolas, mejora la molienda del material duro (percusión)

Tamaño máximo de los elementos moledores

En los molinos de barra y bolas, los elementos moledores no tienen todos el mismo tamaño, sino que a partir de un diámetro máximo se hace una distribución de los mismos en tamaños inferiores.

Volumen de carga

Los molinos de bolas y barras no trabajan totalmente llenos. La suma entre el volumen ocupado por los elementos moledores y el material a moler se denomina volumen de carga:

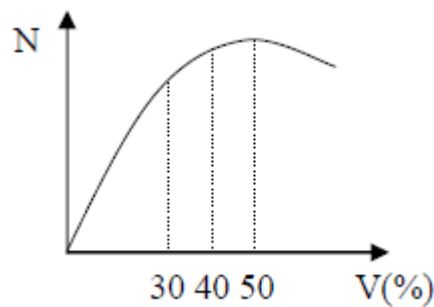
$$V(\%) = \frac{(V_{\text{material a moler}} + V_{\text{elementos moledores}})}{V_{\text{interior de cilindro}}} \times 100$$

$V_{\text{interior de cilindro}}$

Habitualmente este valor es del 30% al 50%.

Potencia

La potencia máxima se desarrolla cuando el volumen de carga sea del 50% aproximadamente, sin embargo, generalmente se trabaja entre un 30% y un 40%.



Tipos de Molienda: Molienda Húmeda y Molienda Seca

La molienda se puede hacer a materiales secos o a suspensiones de sólidos en líquido (agua), el cual sería el caso de la molienda húmeda. Es habitual que la molienda sea **seca** en la fabricación del cemento Portland y que sea **húmeda** en la preparación de minerales para concentración. En la molienda húmeda el material a moler es mojado en el líquido elevando su humedad, favoreciéndose así el manejo y transporte de pulpas, que podrá ser llevado a cabo por ejemplo con bombas y cañerías. En la molienda húmeda moderna, luego del proceso de desintegración, la clasificación de partículas se llevará a cabo en hidrociclones y si se desea concentrar el mineral se podrá hacer una flotación por espumas. El líquido, además, tiene un efecto refrigerante a los calores generados en el interior del molino.

MOLINO DE BARRAS

El molino de barras está formado por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, que en su interior cuenta con barras cilíndricas, sueltas, dispuestas a lo largo del eje, de longitud aproximadamente igual a la del cuerpo del molino.

Las barras se elevan, rodando por las paredes del cilindro hasta una cierta altura, y luego caen efectuando un movimiento que se denomina “de cascada”. La rotura del material que se encuentra en el interior del cuerpo del cilindro y en contacto con las barras, se produce por frotamiento (entre barras y superficie del cilindro, o entre barras), y por percusión consecuencia de la caída de las barras desde cierta altura.

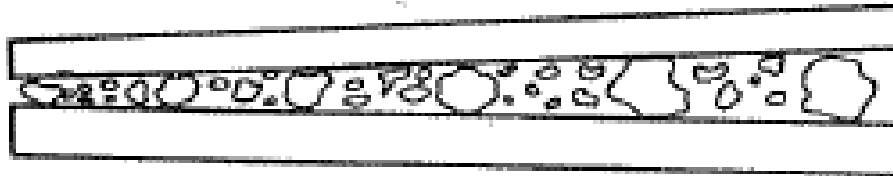


Figura 7.18 Acción de molienda de las barras.

El material ingresa por el eje en un extremo del cilindro, y sale por el otro extremo o por el medio del cilindro, según las distintas formas de descarga: por rebalse (se emplea en molienda húmeda), periférica central, y periférica final (ambas se emplean tanto en molienda húmeda como en seca).

La parte cilíndrica, los fondos y la cámara de molienda, están revestidos interiormente por placas atornilladas de acero al manganeso o al cromo-molibdeno. Las caras internas del molino consisten de revestimientos renovables que deben soportar impacto, ser resistentes a la abrasión y promover el movimiento más favorable de la carga. Las barras generalmente, son de acero al carbono.

Otro aspecto que es necesario enfatizar, es que los molinos de barras, en general, son equipos que se utilizan para la molienda primaria, que operan en circuito abierto y su producto de molienda constituye la alimentación a un sistema de molienda-clasificación, donde el proceso de reducción de tamaño se realiza utilizando bolas como medios de molienda, para generar finalmente un producto de una fineza adecuada para el siguiente proceso de concentración.

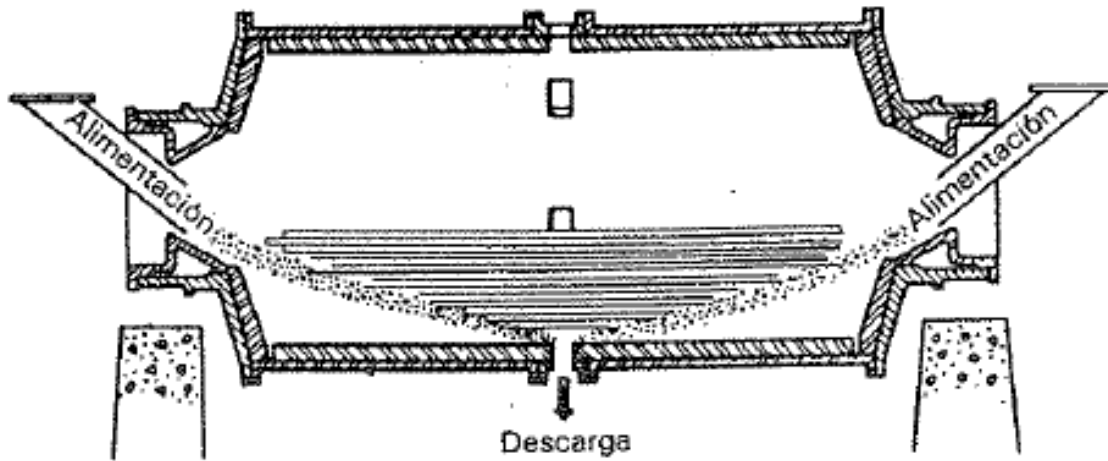


Figura 7.15 Molino de descarga periférica central.

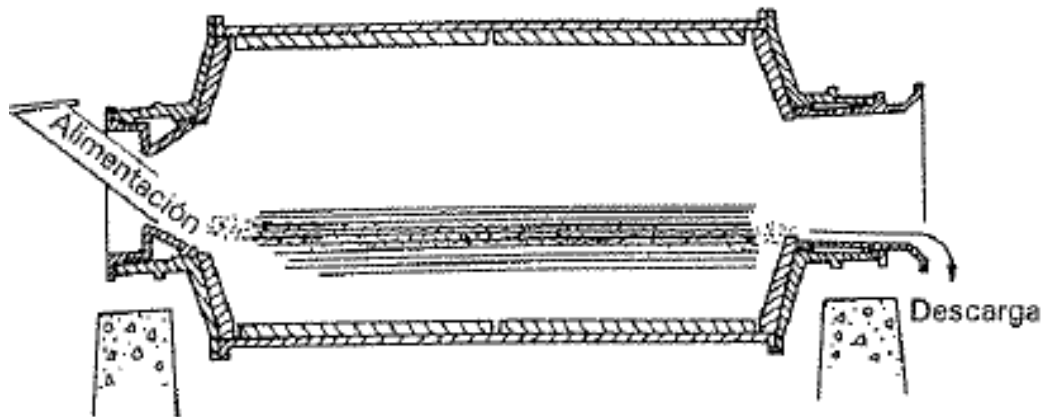


Figura 7.17 Molino de derrame.

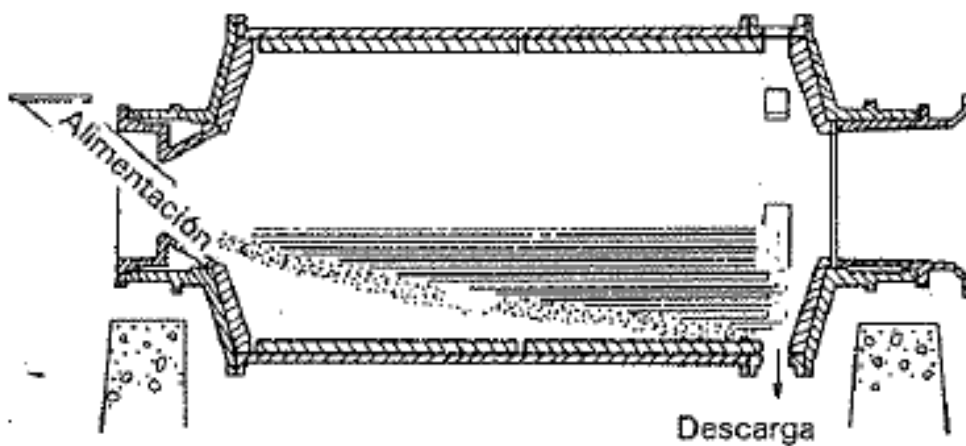
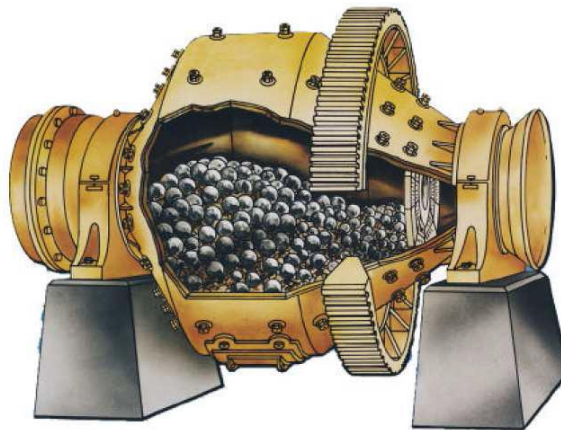
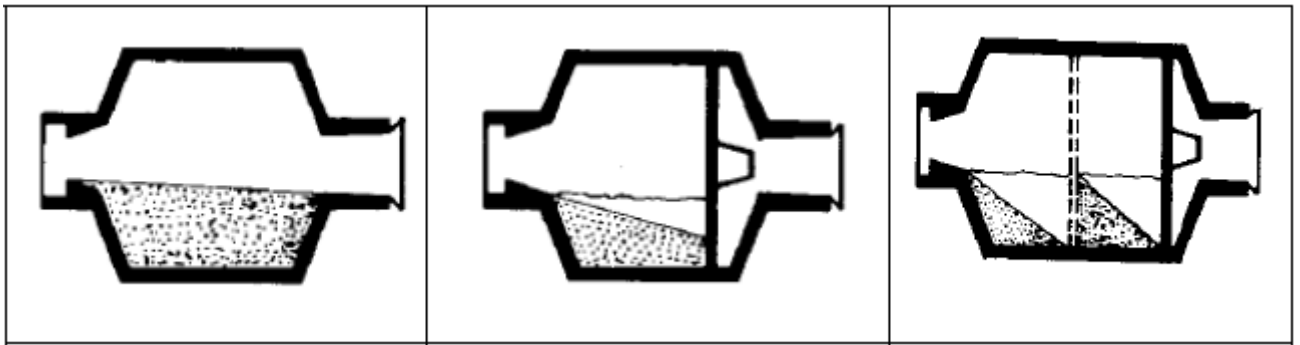


Figura 7.16 Molino de descarga periférica extrema.

MOLINO DE BOLAS

Concentrando la observación en el comportamiento de la fractura, el modo de operación de un molino rotatorio de bolas es el siguiente; la rotación lleva bolas

y pulpa alrededor del molino. Cuando las bolas caen en tumbos en el molino, golpean partículas atrapadas entre otras bolas. Por otra parte, el movimiento general de las bolas en el lecho frota partículas entre ellas. Se ha observado que pueden suceder diferentes tipos de eventos. En primer lugar, el impacto masivo produce desintegración completa de una partícula (fractura). En segundo lugar, un golpe de refilón puede astillar una esquina (astillamiento). En tercer lugar, la fricción produce desgaste de las superficies (abrasión). Astillamiento y abrasión conducirán a la producción de material fino y sus efectos combinados dan origen a la atrición. A una velocidad de rotación baja las bolas tienen acción de volteo relativamente suave y existe una tendencia de la masa de bolas a ser levantada por la acción de rotación de las paredes del molino y a deslizarse hacia atrás como una masa compacta. A una velocidad de rotación mas alta, una cantidad mayor de las bolas son lanzadas de la superficie a lo alto del molino y se forma una catarata de bolas.



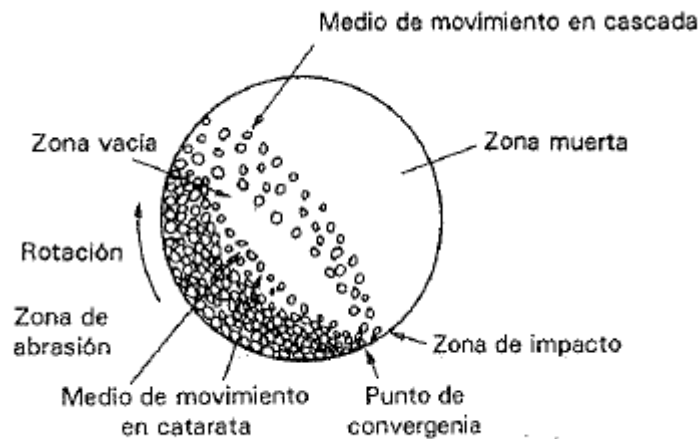


Figura 7.2 Movimiento de la carga en un molino de rodamiento de carga.

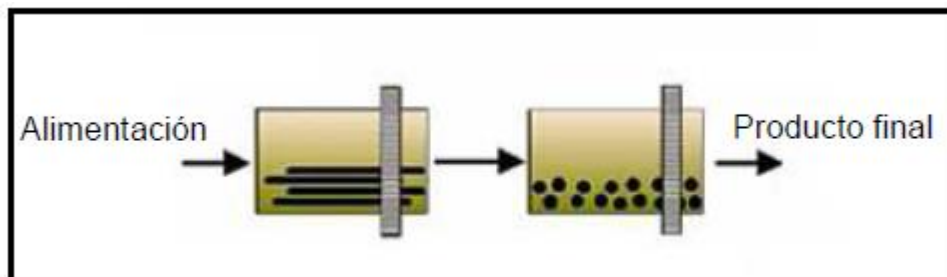
MOLIENDA EN CIRCUITOS

Los circuitos se dividen en dos amplias clasificaciones: Abierto y Cerrado.

1. Circuitos abiertos:

Un molino puede trabajar en circuito abierto con un clasificador cuando el rechazo de la criba (tamaños gruesos y no admisibles para la posterior concentración) no vuelve al molino.

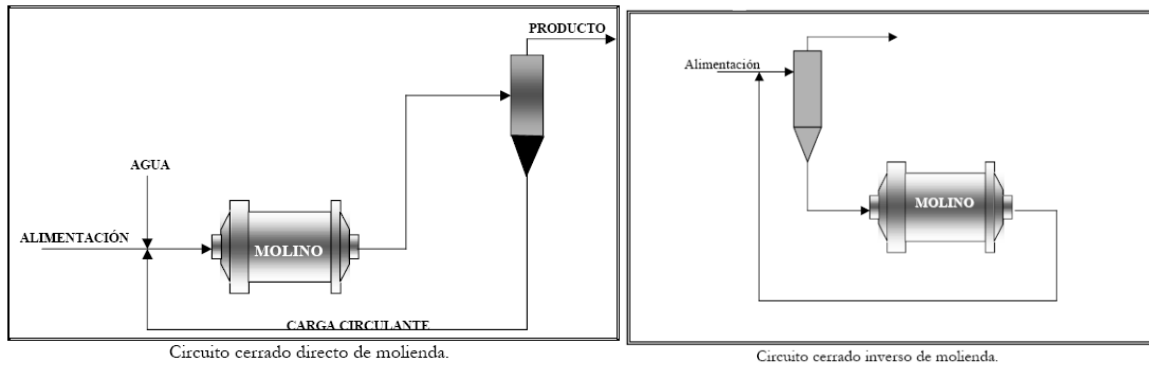
Generalmente los circuitos abiertos funcionan de la siguiente manera: las partículas entregadas por un molino de barras ingresan directamente como alimentación a un molino de bolas, y la descarga de este último se envía a una etapa de concentración.



2. Circuitos cerrados:

Son los circuitos más comunes en el procesamiento de minerales, en la industria minera casi siempre se presenta en circuito cerrado. Estos circuitos consisten en uno o más molinos y clasificadores mediante los cuales se entrega en forma eficiente el producto que se desea. En este caso se puede controlar el tamaño

máximo del producto y minimizar la sobremolienda. El material que descarga del molino, se separa en fracciones gruesas y finas en el clasificador. El fino es el producto final y va a la etapa siguiente del proceso, en tanto el material grueso o sobretamaño retorna al molino. El material que regresa al molino por el clasificador se conoce como carga circulante.



a) Circuitos cerrados de una etapa:

Estos circuitos se utilizan en molienda primaria y pueden estar compuestos por molinos de barras o de bolas. Son utilizados más frecuentemente, cuando tenemos como alimentación un producto relativamente fino, proveniente de una etapa de trituración terciaria.

b) Circuitos cerrados de multietapas:

Estos consisten en uno o más molinos con una o más etapas de clasificación. La característica principal de estos, es que tienen un alto grado de libertad, para seleccionar el punto de funcionamiento, dependiendo de la aplicación específica.

Además, todos estos circuitos tienen mayor eficiencia debido a que la conminución del material se realiza en varias etapas.

El circuito cerrado multietapas más común, es el que utiliza un molino de barras como primario y un molino de bolas como secundario. Es el circuito básico de molienda de las plantas que tratan mineral proveniente de la trituración primaria o secundaria.

Ejercicios:

1. Un molino SAG tiene un largo de 6m y un diámetro de 10m. La densidad del mineral es de $2,61 \text{ t/m}^3$.

Calcular:

- a. El volumen del molino considerando que es un cilindro perfecto.
- b. El volumen del mineral, si la carga de llenado es del 37%.
- c. Las toneladas de mineral que caben en el molino

2. Un molino tiene un largo de 7,5 m y un diámetro de 15 pies. La densidad del mineral es de $1,87 \text{ t/m}^3$.

Calcular:

- a. El volumen del molino considerando que es un cilindro perfecto.
- b. El volumen del mineral si la carga de llenado es del 41%
- c. Las toneladas de mineral que caben en el molino.