

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

***PRÁCTICAS DE LABORATORIO  
DE LA ASIGNATURA  
PREPARACIÓN MECÁNICA DE  
MINERALES***

***José de Jesús Huevo Casillas***

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN DE MINAS Y METALURGIA

HUEZO CASILLAS, José de Jesús. *Prácticas de laboratorio de la asignatura Preparación mecánica de minerales*. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 1996, 61 pp., ils.



APUNTE  
165-B  
1996  
G.-611606



*Prácticas de laboratorio de la asignatura Preparación mecánica de minerales*

Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial de esta obra por cualquier medio o sistema electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito del editor.

Derechos reservados

©1996, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.  
Ciudad Universitaria, México, D.F.

Primera edición, octubre de 1996.

Impreso en México.

# INTRODUCCIÓN

El laboratorio de la asignatura Preparación mecánica de minerales para alumnos de la carrera de Ingeniería de Minas y Metalurgia, comprende nueve prácticas programadas para complementar el curso teórico, las cuales se diseñaron para aprovechar los recursos disponibles actualmente en el Laboratorio de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería y proporcionar al alumno la oportunidad de obtener información experimental suficiente en un tiempo relativamente corto para ilustrar la conceptualización teórica, que se reforzará con la asistencia a las visitas industriales.

La realización del manual de prácticas es con el fin de que los alumnos puedan concretar y ampliar su aprendizaje, además de optimar en una forma más eficiente el tiempo disponible en el laboratorio.

La estructura didáctica de las prácticas permite enlazar los conocimientos de una manera secuencial y lógica, buscando un mejor aprovechamiento general, para lo cual presentan los siguientes elementos teóricos y procedimientos experimentales:

- Objetivos
- Fundamentos teóricos
- Ejemplos
- Ejercicios
- Desarrollo de la práctica
- Material necesario
- Discusión de resultados y conclusiones

En el objetivo se menciona el propósito que tiene la realización de la práctica. En los fundamentos teóricos, ejemplos y ejercicios, se enfatizan los elementos más relevantes de la teoría vinculados con la práctica, haciéndose comentarios y sugerencias para mejores resultados e indicándose las ecuaciones que se utilizarán para los cálculos con los que se obtendrán los resultados numéricos. Además se incluye una bibliografía para una consulta más amplia de los temas.

## Agradecimientos

Por sus valiosas observaciones, entusiasmo y constante dedicación encaminados al mejoramiento de las instalaciones del Laboratorio de Metalurgia y de esta obra, deseo expresar mi gratitud al M. en C. Jorge Ornelas Tabares y al Ing. Luis Guillermo Patiño Leal, a quien en su memoria dedico esta publicación como reconocimiento a su esfuerzo.

Finalmente, agradezco a la Unidad de Apoyo Editorial de la Facultad de Ingeniería la edición de este material, especialmente a la Lic. Amelia Guadalupe Fiel Rivera por la estructuración didáctica y la corrección de estilo, y al Sr. Juan Guillermo Hernández Martínez por la tipografía del texto.

**Ing. José de Jesús Huevo Casillas**  
Octubre 1996

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	III
<b>PRÁCTICA No. 1. MUESTREO DE UN YACIMIENTO EMPLEANDO EL MÉTODO DE POZOS</b> .....	1
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	1
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA .....	3
MATERIAL NECESARIO .....	3
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	4
<b>PRÁCTICA No. 2. COMPRAVENTA DE MINERALES</b> .....	5
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	5
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA .....	13
MATERIAL NECESARIO .....	15
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	15
<b>PRÁCTICA No. 3. MUESTREO MANUAL PARA MINERALES (sólidos)</b> .....	17
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	17
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA .....	18
MATERIAL NECESARIO .....	20
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	21
<b>PRÁCTICA No. 4. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE UN MINERAL</b> .....	23
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	23
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA .....	24
a) Caracterización macroscópica .....	24
b) Caracterización microscópica .....	25
MATERIAL NECESARIO .....	26
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	26
<b>PRÁCTICA No. 5. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR VÍA SECA</b> .....	27
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	27
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA .....	28
MATERIAL NECESARIO .....	29
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	29

<b>PRÁCTICA No. 6. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN LA TRITURACIÓN DE UN MINERAL</b> .....	31
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	31
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA .....	32
MATERIAL NECESARIO .....	35
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	35
<b>PRÁCTICA No. 7. MOLIENDA DE MINERALES EN UN MOLINO DE BOLAS DE LABORATORIO</b> .....	37
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	37
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA .....	40
MATERIAL NECESARIO .....	41
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	41
<b>PRÁCTICA No. 8. TIEMPO EFECTIVO DE MOLIENDA</b> .....	43
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	43
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA .....	44
a) Molienda en pasos .....	44
b) Comprobación del tiempo de molienda .....	46
MATERIAL NECESARIO .....	47
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	48
<b>PRÁCTICA No. 9. MOLIENDA BOND</b> .....	49
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	49
DESARROLLO DE LA PRÁCTICA .....	56
MATERIAL NECESARIO .....	58
DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	59
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	61

## PRÁCTICA No. 1

# MUESTREO DE UN YACIMIENTO EMPLEANDO EL MÉTODO DE POZOS

### OBJETIVO

El alumno conocerá el método de muestreo de pozos e identificará la posición del cuerpo mineralizado.

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El muestreo de yacimientos, ya sea cuando éstos se hayan *in situ* o cuando han sido depositados por diversas causas y condiciones en un lugar ajeno a su origen, tiene por objeto principal conocer sus valores y características para determinar, de acuerdo con el caso, la posibilidad de su explotación, tanto por lo que se refiere al sistema en sí como a la importancia desde el punto de vista económico.

En el muestreo de lotes minerales intervienen varios factores que dependen de las características del mineral, como lugar y forma en que han sido depositados, tamaño de partícula, grado de compactación a que han llegado debido a intemperismo o efectos mecánicos ajenos e involuntarios, propios de una explotación minera.

Con objeto de tener una idea del tonelaje de mineral depositado en un terrero, es necesario llevar a cabo un levantamiento topográfico que permita determinar aproximadamente el tonelaje depositado. A la vez, se deberán hacer zondeos para determinar tanto el grado de compactación como el tamaño de las partículas minerales en el depósito. Una vez obtenidos estos datos, se selecciona el método de muestreo que se seguirá, dependiendo en muchos casos de esta selección el éxito o fracaso del aprovechamiento de los minerales en estudio.

Con base en el tonelaje y el grado de compactación, se puede seleccionar el método de zanjas o pozos, siendo este último el más aconsejable para terreros, ya que generalmente su alto grado de compactación, permite hacer los pozos con uso limitado de madera, en cambio el primero es más común que se utilice para el muestreo de jales.

### Ejercicio 1.1

Se tiene un terreno cuyo volumen aproximado es de  $9\,500\text{ m}^3$ . Para efectuar el muestreo por el método de pozos, se definió una plantilla con sección  $1.5\text{ m}^2$ . Del depósito mineral se tomaron 15 muestras producto de los barrenos (con diámetro de  $50\text{ cm}$ ). En la tabla anexa se reportan la altura de cada barreno dado, localización y leyes ensayadas.

El peso volumétrico ( $P_v$ ) del mineral = 1.8

LOCALIZACIÓN DE BARRENOS	ALTURA DE BARRENO	LEYES REPORTADAS (%)		
		Pb	Zn	Cu
N 1	25 m	4.3	7.2	2.0
N 2	27 m	3.5	6.5	3.0
N 3	26 m	3.7	6.7	2.5
N 4	28 m	4.0	5.9	1.5
N 5	27.5 m	5.5	6.0	3.0
N 6	26.5 m	6.5	6.3	3.2
NE 1	25.5 m	3.7	6.4	2.8
NE 2	26 m	4.6	7.0	1.8
NE 3	27 m	4.2	6.6	2.2
NE 4	25 m	3.4	6.2	2.4
NO 1	26 m	3.8	7.3	1.6
NO 2	24.5 m	1.6	2.5	0.5
NO 3	25.5 m	3.5	4.6	1.4
NO 4	24.5 m	3.6	5.5	2.5
NO 5	25 m	3.9	5.0	2.0

a) Elabore la sección longitudinal y planta del terrero.

b) calcule:

- tonelaje depositado en el terrero,
- tonelaje de cada barreno,

- contenido de cada barreno,
- leyes medias de *Pb*, *Zn* y *Cu*,
- distribución para *Pb*, *Zn* y *Cu*.

## DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

1. Tome un yacimiento mineral (en este caso con plastilina).

Plastilina verde (cuarzo)  
Plastilina amarilla (galena)  
Plastilina roja (plata natural)  
Escala del modelo 1:1000

2. Establezca la plantilla de barrenación.

(cada 2 *cm*) 20 *m* ó  
(cada 1 *cm*) 10 *m*

3. Obtenga los barrenos.
4. Mida y analice los barrenos.
5. Construya los perfiles.
6. Calcule la ley media y tonelaje del yacimiento.

## MATERIAL NECESARIO

- Yacimiento (hecho de plastilina).
- Escalímetro.
- Escuadras.
- Cilindros para efectuar los barrenos.

## **DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

- Elabore la sección transversal y longitudinal del yacimiento, indicando la dirección y echado del cuerpo mineralizado.
  
- Calcule:
  - El tonelaje depositado.
  - El tonelaje y contenido de cada barreno.
  - Las leyes medias de los minerales de valor en el yacimiento y su distribución.
  
- Indique qué método de explotación sería el más adecuado para explotar el yacimiento y porqué.

## COMPRAVENTA DE MINERALES

### OBJETIVO

El alumno realizará la compraventa de un concentrado y elaborará la proforma de liquidación correspondiente.

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### Contrato de compraventa

##### a) Definiciones

**Contrato.** Se llamará contrato al documento donde se indican las normas de compraventa.

**Vendedor.** Persona moral o física que vende un lote.

**Comprador.** Persona moral o física que compra un lote.

**Lote.** Cantidad de material (mineral o concentrado) que se compra o vende.

**Ley.** Valor reportado por el laboratorio analítico como contenido de la muestra.

**Muestra.** Cantidad de material obtenido por medio de un muestreo equitativo, a fin de analizar las propiedades físicas o químicas del lote.

**Tercería.** Análisis de las propiedades físicas o químicas que se realiza a una muestra cuando los resultados del comprador y el vendedor están fuera de un intervalo de control.

**Intervalo de control.** Fracción del valor de un análisis en donde se toma como correcto cuando el valor reportado por el vendedor y el comprador está dentro de este intervalo.

**Contratantes.** Se llamará contratantes al vendedor o al comprador.

## **b) Procedimiento de compraventa**

Se realiza de la siguiente forma:

- Crear un contrato de compraventa, donde se indiquen las cantidades por comprarse, fecha y tipo de envío, forma en que se realizará el muestreo, el pago, la tercería, y cómo se acordarán las controversias.
- Conocer la proforma de liquidación en la cual se indican los costos de tratamiento, pagos de los valores y castigos por las impurezas en el proceso con que opera la planta de beneficio o la fundición, así como el costo de transportes e impuestos.
- Realizar la etapa de muestreo del lote.
- Calcular y comparar resultados.
- Realizar tercerías, si es necesario.
- Indicar los valores para compraventa.
- Calcular las utilidades que producirá el lote.

Otros factores que deben tomarse en cuenta son:

Las plantas de beneficio ~~tratan~~ minerales para producir concentrados que se enviarán a las fundiciones. En algunos casos, la planta de beneficio no compra el mineral, sino que solamente cobra la maquila, esto sucede cuando el minero tiene la facilidad de comerciar su concentrado con las fundiciones, es socio de alguna, o tiene interés en mantener su concentrado en su poder.

Las fundiciones, por lo regular, compran el concentrado a los productores.

Las utilidades obtenidas deben pagar los siguientes conceptos:

**1. Extracción**

Operaciones:

- Desarrollo
- Transporte interior
- Amortización de fondos
- Impuestos

**2. Beneficio**

Operaciones:

- Preparación
- Concentración

**3. Afinación y fundición**

Operaciones:

- Preparación
- Afinación
- Fundición
- Cargos indirectos

**4. Gastos de realización**

**5. Cargos indirectos**

- Conservación y reparaciones
- Depreciación y amortización
- Revisión social y seguridad
- Gastos generales

El uso industrial de los minerales no metálicos es:

Uso	Minerales
Cerámica	Kaolines, arcillas, óxidos de metales
Colorantes	Óxidos de metales
Construcción	Caliza, arcillas, cemento, dolomitas
Portadores de catalizadores	Diatomitas
Medicamentos	Kaolines, óxidos de fierro
Abrasivos	$Al_2O_3$ , $Ce_2O_3$
Refractarios	$Al_2O_3$ , $MgO$ , $Cr_2O_3$ , $ZrO_2$ , $SiO_2$
Vidrio	Bórax, $SiO_2$ , $CaO$ , feldespatos, óxidos metálicos

### Ejercicio 2.1

#### Contrato de compraventa

Empresa: Cía. Metalúrgica Peñoles, S. A.

Ubicación: Torreón, Coah.

Proceso: Refinación electrolítica de zinc.

Planta: Sin nombre.

Capacidad: 288 ton/día.

Materia prima: Concentrados de zinc.

#### a) Procedimiento

Se pesará el lote con todo y contenedor en una báscula previamente calibrada.

Se obtendrá una muestra por duplicado para obtener la humedad de la muestra.

El muestreo se efectuará a la vista del vendedor en las instalaciones del comprador.

De las muestras de secado obtenidas, se extraerán los materiales que servirán para el análisis químico, las muestras secas se nombrarán: Vendedor, Comprador, Tercería o Reserva y Oficina de Ensaye (SHCP).

Se analizarán por separado las muestras del comprador y el vendedor, cada una de ellas en el laboratorio del propietario.

Se compararán los resultados a fin de efectuar los pagos correspondientes.

Si se tiene un \_\_\_\_\_ de error en el contenido de \_\_\_\_\_ y un \_\_\_\_\_ en el contenido de \_\_\_\_\_ se tendrá que analizar la tercería.

Si la tercería es mayor o menor a los valores reportados por el vendedor y comprador y sale del intervalo, se tomará como ley de compraventa el promedio reportado de las leyes del comprador y vendedor.

Si la ley de la tercería queda en el intervalo de las leyes del comprador y del vendedor, se tomará esta ley como la de compraventa. El valor de la ley de los contratantes que se acerque más al valor de la tercería, no pagará el costo de la tercería. Si la ley queda en el intervalo y hay diferencia entre la ley de comprador y vendedor, se tomará el promedio de ambas leyes como ley de compraventa.

El muestreo se realizará en un lugar propio para este procedimiento, Se obtendrá una **muestra de 2 kg de material húmedo** por prueba de secado que se realizará por duplicado **por cada tonelada del lote** de concentrados que se encuentre encostalado, si es a granel por cada camión se obtendrán 10 muestras.

Para los análisis, se obtendrá de las muestras secas la serie de muestras necesarias.

Se pagará a la semana el costo del lote, con base en las leyes del comprador, reteniéndose el 40% si se encuentran diferencias en los análisis y es necesario realizar un ensaye de la reserva.

La reserva se analizará antes de 20 días hábiles. Se obtendrán los pagos y castigos para que el pago se realice al día siguiente de la entrega del análisis, disminuyendo el pago preliminar y corrigiendo por el pago de la tercería.

Los pagos finales estarán afectados por los impuestos.

En el momento del pago, se harán las modificaciones al contrato para corregir los problemas.

Como solución primaria se prorrateará entre los contratantes el problema.

\_\_\_\_\_  
COMPRADOR

\_\_\_\_\_  
VENDEDOR

**b) Costo de tratamiento (en dólares)**

Se cobran \$151.01 por tonelada métrica seca de concentrados cuando el precio por tonelada métrica "Good Ordinary Brand" de Londres "Producer's Price" sea de \$352.50. Este cargo se aumentará o disminuirá en \$0.08511 y \$0.04255, respectivamente, por cada dólar que aumente o disminuya el precio sobre la base de \$352.50 por tonelada métrica. Además, se hará un cargo de \$140.00 por tonelada de zinc contenido, basado en el costo actual de la energía eléctrica.

**c) Humedad**

Para obtener el peso seco de los productos, se deducirá la humedad efectiva según el resultado obtenido de la muestra correspondiente, con la sola salvedad de que la deducción mínima nunca bajará de 1%.

**d) Pagos**

**Zinc:** Se pagará por el 85% del contenido con deducción mínima de 8 unidades, al precio de zinc L.A.B. Torreón. Se determinará con base en la cotización promedio que resulte de las ventas efectuadas por Met-Mex Peñoles, S.A. de C.V. de zinc metálico, deduciendo los premios o sobrepuestos que resulten por ventas de aleaciones o productos especiales, y considerando como productos especiales cualquier tipo de zinc que tenga un promedio o sobre precio marcado.

Cualquier variación en los conceptos de fletes, manejos, comisiones y seguro será por cuenta del vendedor.

**Plata:** Se descontarán 150 gramos del ensaye respectivo y se pagará por el 60% del contenido resultante al 95% del promedio aritmético mensual de las cotizaciones "Handy & Harman" de New York y "London Spot" publicadas en el Metals Week, aplicables para la plata contenida en productos sin afinar menos 1% y menos 0.125 cts. de dólar por onza troy.

**Cadmio:** Del contenido total, se deducirá un kilogramo y se pagará por el 60% del contenido resultante a la cotización promedio publicada en el Metals Week para lotes mayores de una tonelada, menos \$0.50 dólares por libra.

**e) Deducciones (en dólares)**

Castigos por impurezas:

**Fierro:** 8% libre, exceso a razón de \$4.50 por cada 1%.  
**Cloro:** 0.05% libre, exceso a razón de \$1.00 por cada 0.01%.  
**Flúor:** 0.05% libre, exceso a razón de \$1.00 por cada 0.01%.  
**Arsénico:** 0.1% libre, exceso a razón de \$1.00 por cada 0.1%. Máximo permisible 0.3%.  
**Antimonio:** 0.2% libre, exceso a razón de 20 centavos por cada 0.01%.

**Níquel:** 0.05 libre, exceso a razón de 25 centavos por cada 0.01%.  
**Cobalto:** 0.005% libre, exceso a razón de 25 centavos por cada 0.001%.

El comprador se reserva el derecho de rehusar concentrados de zinc con un contenido de plomo de 2% más y/o 12.5% de hierro, y/o 0.3% de antimonio, y/o 0.01% de cobalto, y/o 0.09% de flúor.

**f) Período de cotizaciones.** El promedio de las cotizaciones diarias del mes siguiente al mes en que se cierran los lotes en la planta de Torreón, Coah.

**g) Impuestos.** Los impuestos de cualquier naturaleza que fuere y que están en vigor en la fecha de cierre del lote, serán por cuenta del vendedor.

**Acta de pesaje**

Concepto	Vendedor	Comprador	Compraventa
Factor de corrección de la balanza.			
Peso del lote húmedo con tara.			
Peso de la tara.			
Peso del lote húmedo.			
Peso de la muestra húmeda.			
Peso de la muestra seca.			
Porcentaje de humedad.			
Peso del lote seco.			

Proforma de liquidación

Cuadro de resultados:

Concepto	Comprador	Vendedor	Tercería	Compraventa
Peso del lote (húmedo) Humedad % Peso del lote seco Leyes: <i>Zn</i> <i>Ag</i> <i>Cd</i> <i>Fe</i> <i>Cl</i> <i>F</i> <i>As</i> <i>Sb</i> <i>Ni</i> <i>Co</i>				
Costo de transporte unitario Distancia (km)				
Impuestos: Metales preciosos Metales comunes Impuestos de producción				

Cotizaciones:

Metal	Precio
<i>Ag</i> (Handy and Harman) <i>Ag</i> (London Spot) <i>Zn</i> <i>Cd</i>	

Cuadro de cálculos:

Concepto	Cálculos	Costos	
		Subtotal	Total
Pagos: Zn Ag Cd			
Castigos: Fe Cl F As Sb Ni Co			
Maquila Transporte			
Utilidades brutas			
Impuestos			
Utilidades netas			

**Bibliografía:**

- Ochoa Ravize, Alfonso. *Contabilidad de industrias extractivas (Minera, Petróleo y Ganadería)*. México, UTEHA, 1985.
- *Ley de minas*. México. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, 1981.
- Proformas de liquidación.

**DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**

Realice los pasos necesarios para obtener los datos de compraventa de un lote dado.

1. Pese el concentrado con tasa.
2. Reste el peso de la tara.
3. Pese los elementos y haga las correcciones y cálculos necesarios.
4. Realice la proforma de liquidación de acuerdo con las condiciones establecidas en la proforma de liquidación de plomo.
5. Elabore el contrato de compraventa.
6. Al finalizar, coloque el material y equipo en las mismas condiciones en que lo encontró.

### **Proforma de liquidación de plomo**

#### **a) Pagos (en dólares)**

**Plomo:** Se pagará por el 90% del contenido con deducción mínima de 8 unidades, al promedio aritmético de la cotización publicada por "Metals Week" (35 centavos por libra al 11/05/93).

**Plata:** Se descontarán 3 onzas del ensaye respectivo y se pagará por el 70% del contenido resultante, al 95% del promedio aritmético de las cotizaciones Handy and Harman de Nueva York (437 centavos por onza troy al 11/05/93), aplicables para la plata contenida en productos sin afinar, menos 1% y menos 0.125 centavos por onza troy.

#### **b) Deducciones (en dólares)**

Cargo por beneficio: Se cobrarán \$109.50 por tonelada.

Castigo por impurezas.

Arsénico: Tolerar 0.1% sin cargo; cargar \$1.2 por cada 0.1% de As contenido.

Bismuto: Tolerar 0.05% sin cargo; cargar \$1.00 por cada 0.01% de exceso.

NOTA: Todos los pagos se hacen en base seca.

### **MATERIAL NECESARIO**

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Muestra de concentrado (formado de cuentas de colores).</li><li>• Báscula.</li></ul> |
|--|

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

Elabore:

- Contrato de compraventa.
- Acta de pesaje.
- Cédula de pagos, castigos, cargo por beneficio (Proforma de liquidación).
- Indique si la compraventa es rentable.



## MUESTREO MANUAL PARA MINERALES (sólidos)

### OBJETIVO

Mediante un proceso manual, el alumno obtendrá una muestra representativa de un lote de mineral y la utilizará posteriormente para efectuar pruebas metalúrgicas, ensayos o análisis químicos.

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para lograr una muestra representativa, se pueden seguir varios sistemas manuales:

- I . Si el lote de mineral lo constituyen 25 toneladas o más, es necesario traspalearlo y de cada diez paladas sacar una, seleccionándola como muestra. Esta operación se repite hasta traspalear todo el lote de mineral.
- II. Si el volumen de mineral es mayor, se puede obtener una muestra, haciendo canales o pozos uniformemente distribuidos.

Los fragmentos del mineral deberán tener un tamaño conveniente (4" máximo) para manejarlos con la pala, si hay fragmentos mayores será necesario quebrarlos.

- III. Para reducir el peso de una muestra, Taggart y H. Richard, aplicando el "criterio del tamaño-peso muestra", aconsejan lo siguiente:

Tamaño del mineral (pulgadas)	Peso de la muestra (kg)
8	8,698
6	4,892
5	3,398
4	2,174
3	1,223
2.5	849
2	544
1.5	306
1.25	212
1	136
3/4	77
1/2	34
6 mallas	9
8 mallas	2
10 mallas	1.178
100 mallas	0.005
200 mallas	0.001

Si se quiere reducir a 50 kg el peso de la muestra, primero se debe quebrar a 1/2".

En cada paso de reducción del peso de la muestra, ésta debe manejarse de acuerdo con el tamaño adecuado, reduciendo sus fragmentos en quebradoras, hasta llegar al tamaño requerido. A continuación se explica el procedimiento que debe seguirse.

### **DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**

1. Homogeneice bien el mineral, para ello tome la primera palada y deposite en un lugar donde se formará una pila. La segunda palada deposítela en la parte superior de la pila que se está formando, buscando que al verterla, el mineral se distribuya uniformemente por toda la pila; así continúe hasta traspalear todo el lote.

Esta operación cuando menos debe repetirse tres veces.

2. Haciendo uso de la pala, distribuya el mineral en forma radial. Comience desde la cúspide de la pila, dando vueltas en torno a la pila, hasta conseguir un montón con forma circular

y un espesor o altura aproximadamente de 10 *cm* como máximo, o bien, llegar a una altura mayor que la del tamaño de los fragmentos más grandes que contenga el mineral.

3. Divida el montón en cuatro partes iguales, o sea, marque un diámetro y a 90 grados marque otro; por regla general se utiliza el mango de una escoba, la que posteriormente nos servirá para recoger los fragmentos pequeños y ponerlos en la pala. A continuación saque dos cuadrantes opuestos diagonalmente, entresacando estas partes con la pala y recogiendo los "finos" con la escoba. Este volumen de mineral constituye la "muestra principal" y el resto se guarda como duplicado, al cual se le puede ir agregando lo que se rechace de las posteriores reducciones.

Con la muestra principal, repita las operaciones 1, 2 y 3, tantas veces como sea necesario, hasta llegar al peso de muestra deseado, cuidando de triturarla previamente hasta obtener el tamaño requerido según el peso a que se quiere llegar. Puede triturarla de una vez a -10 mallas para obtener finalmente 1 *kg* de muestra en cada lado de partidor.

Si 1 *kg* se usa para pruebas metalúrgicas, la otra parte, o el otro kilogramo, se puede reducir para análisis químico en el pulverizador de discos a un tamaño de -100 mallas para 5 *g* de muestra, o se muele a -200 mallas para 1 *g* de muestra.

Si el pulverizador de discos no da las 200 mallas, se tendrá que pasar por el metate.

Para obtener la "muestra" que se utilizará en el análisis químico ("análisis de cabezas"), será necesario verter este kilogramo en una tela de plástico de 0.60 × 0.60 *m* que nos servirá para mezclarla uniformemente, para conseguirlo se toman dos esquinas opuestas; se levanta una esquina, y la muestra rodará en el plástico hacia un lado, para regresarla se levanta la otra esquina. El siguiente paso es tomar las otras dos esquinas y levantarlas también en la forma anterior, logrando con ello hacer rodar la muestra en un ángulo de 90 grados respecto al movimiento anterior. Esta operación se repite unas cuatro veces mínimo.

Finalmente, la muestra bien mezclada y homogénea permanece en el plástico, formando una pila pequeña que se extiende horizontalmente con una espátula para obtener una altura de aproximadamente 1 *cm*. Con la punta de la espátula se procede a tomar pequeñas porciones de toda el área en forma indiscriminada, buscando una muestra representativa hasta obtener unos 10 *g* aproximadamente, depositándolos en una bolsa-sobre.

La muestra así obtenida se remite al laboratorio químico para su análisis.

A continuación se procede a mezclar el sobrante en la forma señalada anteriormente y con la espátula se saca otra muestra "a piquete", la cual servirá para la fase de "caracterización del mineral". El sobrante se quedará como testigo, por si es necesario sacar más muestras, como lo hacen las fundiciones o las plantas maquiladoras de mineral, las que se denominan muestras para "comparación" o para "tercería".

En forma verbal se explicará cuál será el uso de los paquetes de comparación y tercería, cuáles son las condiciones de compra de mineral y con cuáles leyes se liquida un lote, utilizando los resultados de los análisis de tercería.

## **MATERIAL NECESARIO**

Para la realización de la práctica, se pedirá al laboratorista:

- Marro.
- Juego de contrapesos para la báscula.
- 3 charolas de peltre.
- Brocha.
- Espátula.
- 2 cucharones.
- Partidor Jones con sus tres recipientes.
- 2 palas.
- Escoba.
- 2 cubetas.
- Imán.

Para protección personal de cada alumno:

- Gafas.
- Respirador.
- Par de guantes.

Todos los materiales se entregarán mediante vale y se regresarán al laboratorista el mismo día, después de hacer la limpieza necesaria.

- 5 kg de mineral que conseguirá el o los alumnos durante sus visitas de práctica a las Unidades.

## **DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

Presente un informe de la práctica de acuerdo con el formato señalado por el profesor del laboratorio.

## CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE UN MINERAL

### OBJETIVOS

El alumno:

- Determinará los minerales de mena y de ganga, así como sus asociaciones.
  
- Definirá si en las partículas de mineral con los minerales de ganga a la molienda de 100 mallas hay liberación total o parcial, considerando como base los minerales de valor económico.

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Todo mineral productivo puede considerarse formado por los componentes: los minerales valiosos o valores y los componentes de desecho o ganga. Los minerales complejos son los que contienen más de un mineral de valor.

Es esencial en esta etapa comprender el hecho de que cada mineral es único, y como consecuencia de ello no existen procedimientos estándar para el procesamiento de minerales, aun cuando algunos pueden parecer muy similares. Por lo que, tener un conocimiento completo de la mineralogía de un mineral no sólo sirve para efectuar el diseño de una planta, sino también para el programa de investigación que reúne datos para ser usados en el diseño de la planta. Una vez que la planta se pone en marcha, continúa siendo esencial la evolución regular de la mineralogía para afinar el proceso y mantener la eficiencia de recuperación. Esto se debe a que los cuerpos de mineral no son homogéneos, por lo que son normales las variaciones en la mineralogía de la alimentación, y éstos pueden ocurrir a un grado, tal que será necesario hacer modificaciones importantes en los circuitos.

Es indispensable tener ciertos conocimientos básicos de mineralogía, como: la ley del mineral en función de los minerales de valor, tamaño de grano de los minerales, combinaciones de los

minerales presentes, forma relativa y la asociación de los minerales, presencia de cantidades menores de minerales potencialmente valiosos.

En el caso del elemento de valor, no es suficiente el análisis químico; parte de los valores pueden existir en una forma mineralógica, tal que impida su recuperación o que por lo menos requiera de un segundo método de separación que aproveche alguna otra propiedad; alternatively, es posible que el análisis químico de un mineral complejo permanezca constante y que su composición mineralógica cambie notablemente.

Es necesario conocer también los detalles de las interrelaciones entre los valores y la ganga. Cuando la liberación es incompleta, tiene que sacrificarse ya sea la ley o la recuperación, a menos que resulte práctico hacer una molienda más fina. Existe la posibilidad de que dos minerales en particular estén entrelazados en tal forma que ningún grado de molienda los libere adecuadamente. Sin el análisis mineralógico, puede resultar imposible determinar si una separación deficiente se debe a molienda inadecuada o a las características del mineral.

Es esencial hacer la identificación de todos los componentes que forman el mineral, ya que esto puede conducir a la recuperación de subproductos con un gran valor comercial.

El microscopio óptico es el instrumento principal que se utiliza para el examen mineralógico y aunque tecnológicamente lo ha desplazado la microsonda electrónica, el costo particularmente alto y la complejidad del nuevo instrumento indican que se seguirá utilizando el microscopio todavía por algún tiempo.

## **DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**

La caracterización la dividiremos en dos partes: la primera se hará macroscópicamente y la segunda microscópicamente.

### **a) Caracterización macroscópica**

Para ello tome muestras en forma aleatoria de tamaños gruesos de mineral y, después de una minuciosa observación, determine cuáles son las especies mineralógicas presentes, tanto las de mena como las de ganga. De ser posible, señale tamaños y asociaciones mineralógicas en forma de relación, colocando al principio los minerales que se presentan con mayor frecuencia e indicando sus características más sobresalientes, forma, aspecto, etc.; investigue, a partir de su

mineralogía, su cristalización más común, dureza, componentes, contenido del metal base que lo componga, etc.

## b) Caracterización microscópica

1. Esta caracterización la realizará utilizando el sobre (con los 100 g aproximadamente) de mineral molido a -100 mallas, obtenido en el muestreo de la práctica No. 3.

Parte de esta muestra la vierte en un "plato de tentadura", al cual le agrega agua y le imparte un movimiento circular excéntrico, junto con un golpeteo con una de las manos. Este procedimiento tiene por objeto lograr una diferenciación de los minerales según sus densidades y tamaños; los "gruesos" se quedarán en el plato y los finos, "lamas", se derramarán a una charola.

Esta operación la repite varias veces, hasta obtener en el plato de tentadura los minerales más pesados que pueda observar con claridad sin interferencia de las lamas.

Ya preparada la muestra de la manera anterior, la lleva al microscopio binocular para obtener la siguiente información:

- Determine los minerales de mena y los de ganga, así como sus asociaciones, señalando donde se alojan en el plato de tentaduras y elaborando una relación de estos minerales, como se hizo en la caracterización macroscópica. Además, indique si los minerales están liberados a esta molienda de -100 mallas; filtre los dos productos, gruesos y lamas, por separado y péselos calculando su distribución.
  - Defina si la molienda a que está el producto fue suficiente para liberar las especies, si están perfectamente liberadas, o si fue excesiva la molienda. Esto último se puede calificar, observando el volumen del producto fino (lamas).
2. Junte los gruesos y lamas y proceda a efectuar un análisis de mallas en húmedo, utilizando las mallas 100, 120, 150 y 200 para conocer la distribución de tamaños de los valores, mediante revisión ocular y pesando los productos.

Grafique y calcule esta información para saber a cuántas micras está el producto (80% del acumulado).

## **MATERIAL NECESARIO**

Los estudiantes solicitarán al laboratorista el siguiente equipo:

- Plato de tentaduras.
- 3 charolas de peltre.
- Microscopio binocular.
- Lámpara de rayos ultravioleta.
- Espátula.
- Brocha.
- 3 frascos gotero con  $HCl$ ,  $HNO_3$  y  $H_2SO_4$ .
- 5 cribas con los tamaños 100, 125, 150 y 200 mallas, tapa y fondo para cribar en húmedo.
- Tina de lámina.
- Vidrio de reloj.
- Imán.

## **DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

Presente un informe de la práctica de acuerdo con el formato señalado por el profesor del laboratorio.

## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR VÍA SECA

### OBJETIVOS

El alumno:

- Determinará la distribución de los tamaños de una muestra de mineral para calcular su tamaño medio en micras, información necesaria para encontrar los parámetros de un mineral en trituración y molienda.
- Observará a partir de los datos experimentales, cuál distribución empírica representa mejor la distribución de Rosin-Rammler o Schumman y determinará parámetros.
- Determinará la media y la variancia de la distribución de Rosin-Rammler o Schumman.

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El análisis granulométrico con cribas es uno de los métodos más viejos de análisis de tamaños y se realiza haciendo pasar sucesivamente un peso dado de material de muestra conocida a través de una serie de cribas cada vez más finas y pesando la cantidad que se colecta sobre cada criba para determinar el porcentaje en peso de cada fracción de tamaño. El cribado se realiza con material seco o húmedo y las cribas se agitan para exponer todas las partículas a las aberturas.

Actualmente se usa gran variedad de tamaños de aberturas de criba, siendo las más populares: la norma alemana, DIN 4188 (German Standard DIN 4188); norma ASTM, E11 (ASTM Standard, E11); las series americanas Tyler (The American Tyler Series); las series francesas AFNOR (The French Series AFNOR) y la norma inglesa BSS410 (The British Standard, BSS410).

Hasta hace poco se designaron las cribas de alambre tejido por número de malla, y éste se refiere al número de alambres por pulgada, que es lo mismo que el número de aberturas cuadradas por pulgada. Este método se utilizó mucho tiempo y hasta 1962 fue la designación básica en la BSS410; sin embargo, tiene la seria desventaja que el mismo número de malla en las diversas medidas estándares corresponde a diferentes tamaños de abertura, dependiendo del espesor del alambre que se usa en la tela de alambre tejido. Actualmente, las cribas se designan por el tamaño de la abertura, que ofrece directamente el operario la información que necesita.

El análisis de tamaño es muy importante en la evaluación del funcionamiento de los circuitos de trituración y molienda.

## **DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**

1. Con la muestra de mineral señalada en el punto 3 del procedimiento de la práctica No. 3, cuyo tamaño es de  $-4"$ , antes de pasarlo a las quebradoras para determinar sus parámetros de trituración, es necesario que conozca su granulometría, o sea, investigue la distribución de los diferentes tamaños en que están los fragmentos de mineral, que es una característica individual de los minerales cuando se les fragmenta, debido a que los minerales que lo constituyen, por regla general, varían en proporción y, por lo tanto, variará también la distribución de su granulometría.
2. Para efectuar este análisis granulométrico, utilice una serie de mallas de diferentes tamaños, colocando la de abertura mayor en la parte superior y las otras debajo de la primera, formando una columna en orden decreciente de abertura. Utilice las cribas de 3", 2", 1", 1/2", 1/4" y 10 mallas.
3. Alimente la muestra de mineral por la parte superior de la serie de mallas.
4. Coloque la serie en el *rot tap*, o aparato vibrador, teniendo el cuidado de colocar al final de la columna una charola para recoger los finos. Llene la criba superior con muestra, coloque la tapa y haga funcionar por espacio de 10 minutos esta máquina; llene cuantas veces sea necesario la criba superior, hasta terminar la muestra; es conveniente ir descargando las cribas que se llenen a charolas, para permitir el paso de los fragmentos de la muestra a través de las cribas.
5. Retire la serie de cribas del *rot tap*, y los productos retenidos de cada una de las mallas vacíelos en charolas, coloque una etiqueta a cada una de ellas, donde se señalará a qué

producto corresponde de la siguiente manera: se toman como positivos (+) los retenidos, o sea, los fragmentos que no pasaron por las mallas, y como negativos (-) los fragmentos que pasaron, quedando las etiquetas, por ejemplo:

- 4" + 3"  
- 3" + 2"  
.....  
.....  
- 1" + 1/2"  
- 1/2" + 1/4".

6. Pese los productos y con ellos elabore la gráfica para obtener el tamaño medio en micras (que corresponde al 80% del acumulado).

## MATERIAL NECESARIO

Solicite al laboratorista:

- 7 charolas de peltre.
- Serie de cribas de 3", 2", 1", 1/2", 1/4" y 10 mallas.
- Tapa.
- Fondo para realizar el análisis granulométrico en seco.
- Brocha.
- Cronómetro.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Presente un informe de la práctica de acuerdo con el formato señalado por el profesor del laboratorio.

## DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN LA TRITURACIÓN DE UN MINERAL

### OBJETIVO

El alumno obtendrá, mediante pruebas de laboratorio, los parámetros en la trituración de un mineral para determinar:

- a) Peso volumétrico y densidad del mineral
- b) Relación de trituración
- c) Potencia en  $kW$
- d) Capacidad en  $t/h$  de la quebradora
- e) Consumo de energía ( $W$ )
- f) Índice de trabajo ( $Wi$ )

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La trituración es la primera etapa mecánica en el proceso de la conminución, en la cual el principal objetivo es la liberación de los minerales valiosos de la ganga.

Generalmente, la trituración es una operación en seco y normalmente se realiza en dos o tres etapas. En la mayor parte de las operaciones, el programa de la trituración primaria es el mismo que el de minado. Cuando la trituración primaria se realiza bajo tierra, esta operación es responsabilidad del departamento de minado; cuando es sobre la superficie, el departamento de minado entrega la mena a la trituradora y el departamento de procesamiento de minerales tritura y maneja la mena desde este punto a través de las operaciones unitarias sucesivas de procesamiento de minerales.

La trituración puede ser en circuito abierto o cerrado, dependiendo del tamaño del producto. En la trituración a circuito abierto, el material fino de la criba se combina con el producto de la trituradora y se envía a la siguiente operación; la trituración de esta manera se usa en las etapas de trituración intermedia o cuando la planta de trituración secundaria está produciendo una

alimentación para el molino de barras. Si la trituradora está produciendo alimentación para el molino de bolas se emplea el circuito cerrado, en el cual los finos de la criba es el producto terminado; el producto de la trituradora se recicla en la criba, de manera que cualquier material grueso se recircula.

La trituración de minerales se efectúa normalmente por compresión, fracturándose éstos en el momento de llegar a su límite elástico. Para llegar a ese punto, es necesario transmitir a la superficie de los minerales una fuerza de tal intensidad que permita traspasar el límite mencionado. En estas condiciones, cada vez que un mineral se tritura hay un consumo de energía proporcional a la nueva superficie producida.

## **DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**

### **a) Peso volumétrico**

Llene un recipiente de volumen conocido ( $V_m$ ) con mineral, reste el peso de la tara primero y luego obtenga el peso del mineral ( $P$ ).

$$\text{Peso volumétrico} = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} \text{ t/m}^3 \quad (1)$$

se incluye el volumen de los "huecos", que se producen cuando el material está fracturado, lo cual se denomina "abundamiento".

### **b) Densidad del mineral**

En el mismo recipiente de volumen ( $V_m$ ), llénelo con mineral muestra. Añádale agua suficiente hasta que llegue a la superficie del mineral ( $V_{agua}$ ) para conocer el volumen de los "huecos" del mineral quebrado. Calcule la densidad, utilizando el peso que se obtuvo del mineral en el inciso anterior.

$$\text{Peso específico} = \frac{\text{Peso}}{V_m - V_{agua}} \text{ t/m}^3 \quad (2)$$

$$\text{Densidad del mineral} = \frac{\text{Peso específico del mineral}}{\text{Peso específico del agua}} \text{ (adimensional)}$$

**c) Tamaño de Alimentación**

1. Efectúe un análisis granulométrico de la muestra, utilizando una serie de cribas de 4" hasta 10 mallas.
2. Calcule su distribución, el acumulado al 80% corresponderá al tamaño de alimentación en micras (alimentación  $F$ ).

**d) Potencia consumida al triturar el mineral**

1. Utilice la quebradora de quijada 4" × 6" del laboratorio para reducir el tamaño del mineral a una relación de trituración entre 4 y 9 (que son las relaciones con que se trabaja industrialmente).
2. Mida con el voltiamperímetro el voltaje ( $V$ ) de la línea trifásica en las terminales del switch de cuchillas de la quebradora de quijadas.
3. Prepárese para medir con el voltiamperímetro las intensidades de corriente en una de las líneas; accione la quebradora sin carga (en vacío) y mida el amperaje ( $I_v$ ).
4. Alimente a la quebradora un peso conocido de mineral ( $P_m$ ), tratando de no sobrecargarla y tampoco permita que se quede vacía. Mida las intensidades de corriente cada 5 segundos de intervalo, o varíe el tiempo de esta medida para obtener cuando menos tres lecturas de corriente con carga. Promedie aritméticamente el valor de estas intensidades ( $I_c$ ).
5. De manera simultánea, obtenga el tiempo efectivo de la trituración, expréselo en minutos ( $t$ ).
6. El consumo de energía durante la trituración en  $kW$  estará dado por:

$$kW = \frac{\sqrt{3} (I_c - I_v) V}{1000}$$

### e) Relación de trituración

1. Efectúe un análisis granulométrico del mineral triturado, utilizando como primera criba el tamaño del mineral que se espera tener como máximo; termine la serie con la malla 20 y calcule la distribución; el acumulado al 80% corresponderá al tamaño del producto ( $P$ ) en micras.
2. La relación de trituración ( $RT$ ) será:

$$RT = \frac{F}{P}$$

### f) Cálculo de la capacidad de la quebradora

Como conocemos el peso del mineral triturado ( $Pm$ ) en  $kg$  y el tiempo que se utilizó para quebrarse ( $t$  en minutos), se puede calcular la capacidad de la quebradora en  $t/h$ :

$$Pm/t \times 60 \times 1/1000 = \text{Capacidad en } t/h.$$

### g) Cálculo del índice de trabajo $Wi$

Si consultamos el folleto editado por la Facultad de Ingeniería *Teoría y prácticas de trituración y molienda*, desde la página 40 en adelante, se señala que a partir del consumo de energía se puede calcular el índice de trabajo del mineral mediante la siguiente fórmula:

$$Wi = W \left[ \frac{\sqrt{RT}}{\sqrt{RT - 1}} \right] \left[ \sqrt{\frac{P}{100}} \right]$$

El ingeniero Fred C. Bond señala que cuando se llegue a variar la relación de trituración del mismo mineral para conocer la energía que se consumirá, ya no es necesario efectuar otra prueba, sino que se puede obtener con la siguiente fórmula:

$$W = W_i \left[ \frac{\sqrt{RT} - 1}{\sqrt{RT}} \right] \left[ \sqrt{\frac{100}{P}} \right]$$

## MATERIAL NECESARIO

- 7 charolas de peltre.
- Serie de cribas de 4", 3", 2", 1", 1/2" y 10 mallas.
- 2 cubetas.
- Brocha.
- Voltiamperímetro.
- Cronómetro.
- Ejemplar del folleto *Teoría y prácticas de trituración y molienda*.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Presente un informe de la práctica de acuerdo con el formato señalado por el profesor del laboratorio.

## MOLIENDA DE MINERALES EN UN MOLINO DE BOLAS DE LABORATORIO

### OBJETIVO

El alumno determinará las constantes:

- a) Velocidad de trabajo
- b) Carga de bolas
- c) Tamaño de bola máximo
- d) Distribución inicial de los tamaños de bola

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### a) Velocidad de trabajo

Para determinar este parámetro, será necesario conocer primero la "velocidad crítica" del molino, es decir, la velocidad a la cual una bola en el interior del molino se adhiere al blindaje por efecto centrífugo y no cae para fragmentar el mineral por impacto y molerlo por rodamiento.

La velocidad crítica está dada por:

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{d}} \text{ rpm} \quad d = \phi \text{ int. del molino en } m$$

$$V_c = \frac{76.62}{\sqrt{d}} \text{ rpm} \quad d = \phi \text{ int. del molino en } ft$$

Se ha observado que la mayor eficiencia en una molienda se logra cuando las bolas caen al formar un ángulo de 135 grados con la horizontal, medido en el sentido de las manecillas del reloj; por lo cual, la velocidad de trabajo será:

$$V_t = 0.75 V_c$$

Sin embargo, y conforme a las necesidades de trabajo e índole del mismo, la velocidad de trabajo varía entre 70 y 80% de la velocidad crítica. Al respecto, consulte lo señalado en el folleto *Teoría y prácticas de trituración y molienda*.

### **b) Carga de bolas**

Es un factor importante en la molienda de minerales. En términos generales, se considera que la carga apropiada de bolas es la que ocupe un volumen correspondiente a un tercio del diámetro de trabajo del molino, cuyo volumen estará afectado por el 30% de huecos, quedando:

$$Cb = 0.2044 Vd$$

donde:

$Cb$  = carga de bolas

$V$  = volumen del molino en  $m^3$

$d$  = peso específico de las bolas:

7.85  $t/m^3$  para fierro

2.72  $t/m^3$  para guijarros

### **c) Tamaño máximo de bola**

Es necesario señalar que está en función del tamaño de alimentación y del diámetro interior del molino. En la página 63 del folleto antes mencionado, se proporciona un ejemplo de este fundamento, en donde se calcula el diámetro máximo de la bola por medio de la fórmula:

$$B = \left[ \frac{F}{K} \right]^{1/2} \left[ \frac{Sg \times Wi}{(\% Cs) \times d} \right]^{1/3}$$

Además, en forma "empírica", se puede estimar este diámetro máximo de la bola, en función del tamaño de alimentación de mineral al molino, mediante la siguiente relación:

$$\phi = D^2$$

en donde:

$D$  = diámetro de la bola en pulgadas

$\phi$  = tamaño de la alimentación de mineral expresado en *mm*

Estas condiciones deben vigilarse de cerca cuando la molienda se efectúe en dos pasos y principalmente cuidarla en los molinos que estén trabajando como secundarios.

#### d) Distribución inicial del tamaño de las bolas

Cuando se va a iniciar la operación en un molino, es indispensable tener la distribución adecuada de cada tamaño de bola y, en nuestro caso, también en los molinos de prueba, para conseguir la mayor efectividad en el impacto de la cascada y molienda con el rozamiento de las bolas.

En el molino de laboratorio, Taggart nos aconseja las siguientes distribuciones para tres tamaños máximos de bola y los demás indicados:

Tamaño	(% peso)	1 1/4"	1"	3/4"	1/2"	1/4"	1/8"
1 1/4"	100	54.5	26.0	13.5	5.0	1.0	
3/4"	100			79.5	18.5	2.0	
1/2"	100				78.0	19.0	3.0

En un molino industrial de 7' × 10' y alimentación de 1/2", Taggart recomienda para la carga inicial la distribución siguiente:

Tamaño		Peso %	F <sub>3</sub> (d)
Pulgadas	mm		
5	127.0	10.5	100.0
4 1/2	114.3	14.0	89.5
4	101.6	8.5	75.5
3 1/2	88.9	9.0	67.0
3	76.2	9.5	58.0
2 1/2	63.5	23.0	48.5
2	50.8	12.0	25.5
1	25.4	13.5	13.5
		100.0	

Posteriormente, una vez iniciada la operación de molienda, como existe consumo de bolas es necesario reponer este desgaste con bolas del diámetro mayor, en este caso de 5", para que el molino no pierda su elemento básico de molienda o medio.

### **DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**

1. Determine para el molino de laboratorio las constantes mencionadas en los fundamentos teóricos.
2. Calcule, de acuerdo con la distribución de Schumann, el valor de  $\alpha$  para los tamaños de 1 1/4", y con este valor verifique las distribuciones para 3/4" y 1/2".
3. Determine, de acuerdo con la distribución de Schumann, el valor de  $\alpha$  para el molino industrial y compárelo con el obtenido para el molino de laboratorio.
4. Calcule, según los tamaños que se tengan en el laboratorio, la distribución de la carga, así como el número de bolas para cada tamaño.

## **MATERIAL NECESARIO**

- Cronómetro.
- Báscula para pesar las bolas.
- Molino de bolas de prueba.
- Bolas para molino de diferentes tamaños, según su distribución.

## **DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

Presente un informe de la práctica de acuerdo con el formato señalado por el profesor del laboratorio.

## TIEMPO EFECTIVO DE MOLIENDA

### OBJETIVOS

El alumno:

- Determinará el tiempo que debe permanecer trabajando un mineral en el molino para llegar al tamaño en el que quedan liberados los minerales de valor comercial y posteriormente realizará las pruebas metalúrgicas de concentración.
- Efectuará la comprobación.
- Con el tiempo efectivo de molienda como dato, calculará las dimensiones de un molino industrial para una capacidad dada.

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La molienda es la última etapa en el proceso de conminución de las partículas minerales, en esta etapa se reduce el tamaño de las partículas por una combinación de mecanismos de quebrado de impacto y abrasión, ya sea en seco o en suspensión en agua. Esto se realiza en recipientes cilíndricos rotatorios de acero, los que contienen una carga suelta de cuerpos de trituración, el medio de molienda libre para moverse dentro del molino y pulverizar las partículas de mena. El medio de molienda puede ser: bolas o barras de acero, roca dura y en algunos casos la misma mena (molienda autogéna). En el proceso de molienda, las partículas entre 5 y 250 mm se reducen de tamaño entre 10 y 300  $\mu m$ .

El propósito de la sección de molienda es ejercer un control estrecho sobre el tamaño del producto, por lo que la molienda correcta es la clave de un buen procesamiento del mineral. Una molienda gruesa de la mena produce un producto demasiado grueso, con bajo grado de liberación para una separación económica, en la etapa de concentración se obtienen recuperaciones y enriquecimientos medianos. La sobremolienda innecesaria reduce el tamaño de partícula por abajo del tamaño necesario para la separación eficiente, por lo que se desperdicia mucha

energía en el proceso. En un estudio sobre la energía consumida en varias concentradoras de cobre en Canadá, se mostró que el consumo de potencia promedio en  $kWh/t$  fue de 2.2 para la trituración, 11.6 para la molienda y 2.6 para la flotación; como la molienda tiene el costo de operación más grande, el mineral de la mena no debe molerse más fino que lo que se justifique económicamente y con base en el tamaño de liberación.

## DESARROLLO DE LA PRÁCTICA

### a) Molienda en pasos

1. En la práctica No. 7 se determinaron las constantes de nuestro molino de pruebas, entre las que se encuentra la carga de bola adecuada para obtener su mayor eficiencia.
2. Pese 1 kg de mineral molido a  $-10$  mallas y tamícelo a  $-65$  mallas (se supone que es el tamaño de liberación del mineral), para saber qué porcentaje de las cabezas se encuentra a este tamaño ( $b$ ), dato que nos servirá para extrapolarlo, calcule como primer tanteo el tiempo necesario de molienda ( $tn$ ) para moler el 100% del mineral a  $-65$  mallas, mediante la fórmula:

$$\frac{t}{a - b} = \frac{tn}{100 - b}$$

donde:  $t$  = tiempo de molienda en minutos  
 $tn$  = tiempo necesario para moler el 100% a  $-65$  mallas  
 $b$  = porcentaje de origen a  $-65$  mallas  
 $a$  = porcentaje a  $-65$  mallas después de moler el tiempo  $t$   
 $a - b$  = porcentaje efectivamente molido a  $-65$  mallas en el tiempo  $t$   
 $100 - b$  = porcentaje por moler a  $-65$  mallas (en el tiempo  $tn$ )

Se tiene conocimiento de que para relacionar las pruebas de laboratorio con el funcionamiento de un molino industrial, la alimentación del molino de prueba debe ser de 10 mallas, la cual corresponde a una alimentación de  $1/2''$  en el molino industrial; además, la dilución del mineral debe ser de 1:1, o sea, que para moler una tonelada de mineral se utiliza una

tonelada de agua. En nuestro caso, 1 *kg* de mineral debe molerlo con 1 *lt* de agua para conseguir la dilución de la pulpa antes citada.

3. Cargue el molino con el +65 mallas y el -65 mallas (1 *kg*), agregando 1 *lt* de agua. Trabaje el molino durante 5 minutos.

Destape el molino, descargue y, después de lavar las bolas, recoja el mineral en una cubeta, la cual se decanta un poco.

4. Destare el tamiz de 65 mallas (o el que sea correspondiente al tamaño de liberación) y tamice el mineral (en húmedo).

Pese el tamiz junto con el +65 mallas que queda sobre él. Restando la tara del tamiz, sabemos el peso del +65 mallas, su diferencia a 1 *kg* expresada en porcentaje nos da el porcentaje de mineral que pasó la malla después de los 5 minutos de molienda (*a*).

5. Aplicando la fórmula para extrapolar, calculamos *tn*:

$$tn = \frac{t (100 - b)}{a - b}$$

Grafique para ir verificando los datos obtenidos.

6. Vacíe en el molino el +65 mallas y le agrega mineral suficiente para completar el kilogramo, y además un litro de agua. El -65 mallas decantado vaya apartándolo en una charola. Haga trabajar el molino otros 5 minutos, y repita el procedimiento señalado anteriormente.
7. Repita las operaciones anteriores con intervalos de 5 minutos de molienda, hasta que la suma de los productos obtenidos en cada etapa sea mayor a 1 *kg*.

Grafique esta información y calcule el tiempo de molienda para obtener 1 *kg* de mineral molido.

En esta operación tenemos un error debido a que inicialmente pesamos el mineral en seco y restituimos el mineral suficiente también en seco a completar 1 kg, aunque el tamiz y el mineral retenido se pesan húmedos. Por lo tanto, se hace necesario que verifiquemos el tiempo de molienda.

## **b) Comprobación del tiempo de molienda**

### **Objetivo particular**

El alumno verificará si el tiempo de molienda a que se llegó en la "molienda por pasos" es efectivamente el tiempo óptimo o efectivo para lograr el paso del 100% del mineral por el tamiz de prueba. En caso contrario, realizará los ajustes necesarios.

1. Cargue el molino de laboratorio con 1 kg de mineral a -10 mallas y agregue 1 lt de agua para obtener una dilución de 1:1.
2. Haga trabajar el molino un tiempo igual al que se determinó en la molienda por pasos.
3. Al producto de la molienda anterior, practíquelo un análisis granulométrico que se comparará con el resultado esperado, o sea:

Si la molienda no fue suficiente, tendrá que aumentar el tiempo de molienda; en caso contrario, si la molienda fue más fina de lo que se deseaba, tendrá que reducir el tiempo.

4. Se recomienda que guarde el mineral molido para utilizarlo en las prácticas posteriores, por lo que tendrá que filtrarlo, secarlo y guardarlo en una bolsa de plástico con su etiqueta respectiva.

## MATERIAL NECESARIO

- 2 kg mínimo de mineral triturado a -10 mallas.
- Molino de bolas.
- Carga correspondiente de bolas.
- Malla para descargar el molino y lavar bolas.
- Malla correspondiente al tamaño de liberación (determinar su tara).
- Cubeta.
- 4 charolas.
- Cucharón.
- Brocha.
- Cronómetro.
- Tapa y fondo para tamizarlo en húmedo.
- Tina.

### Ejercicio 8.1

Calcule qué tamaño de molino industrial es el apropiado para moler 500 t en 24 h del mineral considerado, aplicando la fórmula\*:

$$\frac{T}{t} = \frac{D^{2.6} \times L}{d^{2.6} \times l}$$

donde:

$T$  = capacidad del molino industrial

$t$  = capacidad del molino de laboratorio

$D \times L$  = dimensiones interiores del molino industrial (diámetro  $\times$  largo)

$d \times l$  = dimensiones interiores del molino de laboratorio (diámetro  $\times$  largo)

Nota: Las unidades deben ser congruentes.

---

\*Consulte la página 68 del folleto *Teoría y prácticas de trituración y molienda*.

## **DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

Presente un informe de la práctica de acuerdo con el formato señalado por el profesor del laboratorio.

**PRÁCTICA No. 9**  
**MOLIENDA BOND**

**OBJETIVO:**

Al finalizar la práctica, el alumno será capaz de desarrollar la mecánica de operación para calcular el  $W_i$  de molienda mediante el método Bond.

**FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Fred C. Bond desarrolló, en 1951, un método empírico para determinar el requerimiento de energía al conminuir un material mediante la operación de molienda.

El método básicamente establece que la carga circulante, es decir, la relación arenas/finos, debe ser de 250%.

El desarrollo experimental permite obtener los datos necesarios para que sean sustituidos en la siguiente fórmula:

$$W_i = \frac{(44.5)}{(P_i)^{0.23} (Gbp)^{0.82} \left[ \frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right]} \text{ kWh/s. ton}$$

donde:

$W_i$  = índice de trabajo en kWh/tonelada corta

$Gbp$  = producto neto producido en gramos por revolución del molino de bola estándar

$P_i$  = tamaño de descarga en micras ( $\mu m$ ), seleccionado para la prueba

$F$  = tamaño de alimentación en micras

$P$  = tamaño de descarga abajo de la malla de prueba seleccionada

El valor del índice de trabajo obtenido es usado para calcular la energía requerida para producir un tamaño de descarga dado, a partir de un tamaño de mineral alimentado a un circuito de molienda industrial, para lo cual se aplica la misma fórmula que en trituración:

$$W = \frac{10 W_i}{\sqrt{P}} - \frac{10 W_i}{\sqrt{F}} = W_i \frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}$$

$$W_i = kWh /tonelada corta, 1 tonelada métrica = 1.1 toneladas cortas$$

El molino de Bond, o molino estándar para este tipo de determinación, es un molino de bolas de 12" × 12" con blindaje liso y una puerta de 4" × 8" para el cambio de mineral y carga de bolas. El molino está equipado con un contador de revoluciones y opera a 70 rpm (91% de su velocidad crítica). La carga de bolas consiste de 285 bolas que pesan 44.4802 lb (20,149.53 g).

Para la práctica se utiliza un molino de 8" × 8 1/2" de placa de acero con una tapa por donde se carga o descarga; por lo que algunas características van a cambiar, lo cual será indicado por el profesor.

### **Ejemplo 9.1**

Se pesó el volumen de 700 cc de mineral, que equivalió a 1 027 g, a los que se les hizo un análisis de malla.

**Tabla 1. Análisis de malla para alimentación (F) de molienda**

Malla	Peso g	% Peso	Acum. (-)
+ 20	84.0	8.2	100
-20 + 35	350.0	34.1	91.8
-35 + 50	150.5	14.7	57.7
-50 + 65	191.5	18.6	43.0
- 65	<u>251.0</u>	<u>24.4</u>	24.4
	1027.0	100.0	

$F = 520\mu$ , se determinó gráficamente (véase figura 1).

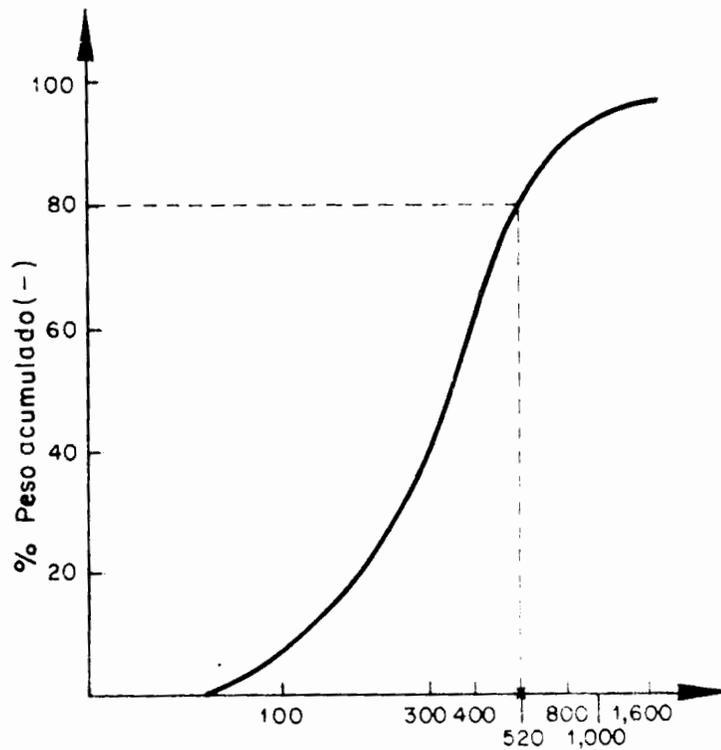


Figura 1. Determinación de la alimentación ( $F$ )

Se tiene:

$$G + f = 1\ 027$$

$$\frac{G}{f} = 2.5; G = 2.5 f$$

$$2.5 f + f = 1\ 027$$

$$3.5 f = 1\ 027$$

$$f = 293.4\text{ g}$$

$$G = 733.6\text{ g}$$

Estos son los gruesos y finos teóricos que deberá haber para tener una carga circulante de 250%.

En este caso, se utilizó un tamiz de trabajo de 65 mallas, y se obtuvo 776 g a +65 mallas.

Se tiene entonces en la alimentación 251 g de finos, los que se reemplazaron por carga fresca. Como

se sabe mediante el análisis de malla que hay 24.4% a -65 mallas, o sea, finos para este caso, en 251 g se estarán alimentando 61.2 g de finos.

Se hicieron 4 corridas, es decir, 3 ciclos para obtener 250% de carga circulante deseada. Dichos datos se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2. Resumen de datos de molienda**

Ciclo	Finos alimentados (gramos)	Finos obtenidos (gramos)	Gruesos obtenidos (gramos)	Finos producidos (gramos)	No. revoluciones	Gramos finos producidos por revolución	% Carga circulante
0	61.2	218.2	808.8	157	100	1.57	370
1	* 53.2	293.4	733.6	240.2	240.2/1.57	228/153	265
	**	281.2	745.8	228	153	1.49	
2	* 68.6	293.4	733.6	224.8	224.8/1.47	225.2/151	250
	**	293.8	733.2	225.2	151	1.49	
3	* 71.68	293.4	733.6	221.7	221.7/1.49	222.3/149	249
	**	294	733	222.3	149	1.50	

1. Finos alimentados. Finos que van en la carga fresca para ser restituida. En este caso es el 24.4%.
  2. Finos obtenidos. Después de moler, es la cantidad de mineral que pasa por la malla de trabajo.
  3. Gruesos obtenidos. Después de moler, es la cantidad de mineral que queda en la malla de trabajo.
  4. Finos producidos. Son los finos reales producidos en la molienda y se obtienen al restar los finos alimentados a los finos obtenidos.
  5. No. revoluciones. Revoluciones a las cuales se obtendrán los finos deseados.
  6. Gramos finos producidos por revolución. Son los finos producidos divididos entre el número de revoluciones a las que se molieron.
  7. % Carga circulante. Es el resultado de dividir los gruesos entre los finos.
- \* Teóricos.  
\*\* Reales.

En el ciclo 0 (primera corrida), se molió a 100 revoluciones y se obtuvo un total de 218.2 g de finos y 808.8 g de gruesos. Como al restituir los finos por carga fresca, en ésta iban 61.2 g de finos, en realidad se produjeron 157 g a -65 mallas. Como se molió por 100 revoluciones, se produjeron 1.57 gramos por revolución, y si dividimos los gruesos entre los finos obtenidos, tendremos 370% de carga circulante.

Para el ciclo 1 (segunda corrida), los finos obtenidos 218.2 g se restituyen por carga fresca, la cual llevará, como sabemos el 24.4% de finos, o sea, 53.2 g. Teóricamente, se sabe también que deberán obtenerse 293.4 g de finos y 733.6 g de grueso para tener una carga circulante del 250%; entonces, si se están poniendo en el molino 53.2 g de finos (al reponer los gruesos) y se necesitan obtener 293.4 g, es necesario producir por lo tanto, 240.2 g de finos. Para esto se tendrá que aumentar el número de revoluciones. Se sabe que se produjeron 1.57 gramos por revolución de finos, al dividir 240.2 entre 1.57 se obtendrán las revoluciones teóricas para producir 240.2 g de finos, resultando 153 revoluciones.

Después de haber molido a 153 revoluciones, se pasó el mineral por el tamiz de trabajo y se obtuvo experimentalmente 281.2 g de finos y 745.8 de gruesos, o sea, que se produjeron realmente 228 g de finos y si éstos los dividimos por el número de revoluciones, tenemos que se produjeron 1.49 gramos por revoluciones: la carga circulante fue de 265%.

Para el ciclo 2 (tercera corrida) se restituyen los finos 281.2 g por carga fresca, que llevan 68.6 g de finos, y se procede con los cálculos de la misma forma.

En el ciclo 3 (cuarta corrida), la carga circulante se aprecia repetitiva. Entonces, podemos dar por terminados los ciclos para proceder con los siguientes pasos que consisten en efectuar el análisis de malla de los finos obtenidos en la última y penúltima corridas.

**Tabla 3. Análisis de malla para producto (P) de molienda**

Malla	Peso g	% Peso	Acum. (-)
+ 100	218.0	37.0	100
-100 + 150	132.2	22.0	63
-150 + 200	76.0	13.0	41
-200 + 325	116.0	20.0	28
- 325	<u>47.0</u>	<u>8.0</u>	8
	589.2	100.0	

$P = 150 \mu$ , que también se obtuvo mediante gráfica (véase figura 2).

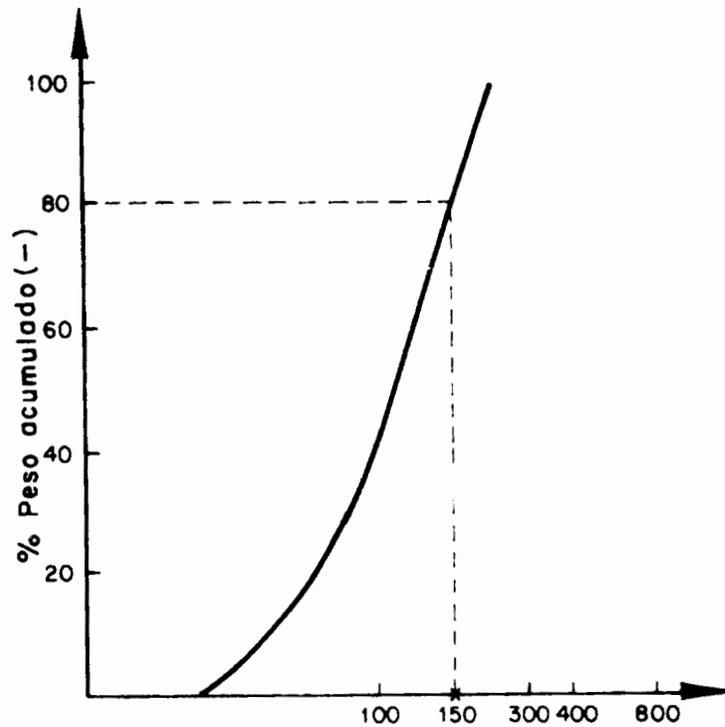


Figura 2. Determinación del producto (P)

Sustituyendo en la ecuación para encontrar el  $W_i$ ,

$$W_i = 44.5 / \left[ (212)^{0.23} \times (1.5)^{0.82} \times \left[ \frac{10}{\sqrt{150}} - \frac{10}{\sqrt{10}} \right] \right]$$

$$W_i = 24.6 \text{ kWh/Ton}$$

**Resumen:**

Peso g de carga al molino (700 cc)	1 027 g
Carga circulante por establecer	250 %
Peso (g) de carga circulante en equilibrio	733.6
Peso (g) de producto A-P <sub>1</sub> en equilibrio	293.4
F: medida en micras en la que se encuentra el 80% de carga alimentada	520
P: medida en micras en la que se encuentra el 80% del producto A-P <sub>1</sub>	150
W <sub>i</sub> : índice de trabajo	24.6

**Aplicaciones:**

Es necesario conocer el índice de trabajo en la molienda ( $W_i$ ) para cálculos, y seleccionar el molino y el motor adecuados para moler el mineral a las condiciones requeridas.

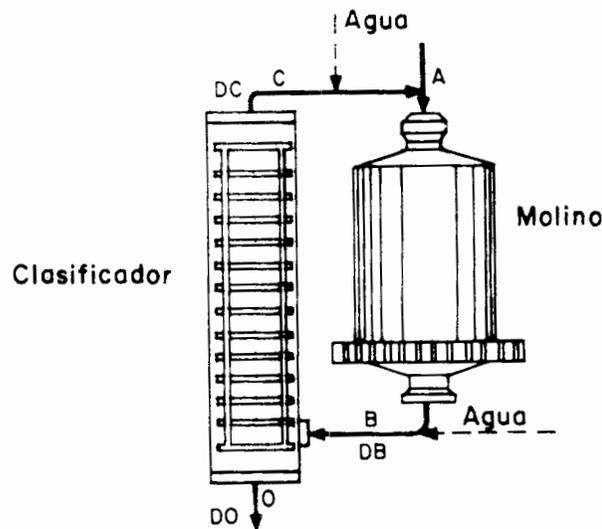
**Ejemplo 9.2**

Un molino instalado en circuito cerrado con un clasificador recibe 300 toneladas secas mineral crudo por día, y los porcentajes de sólidos son, respectivamente, 25, 50 y 84% en el derrame del clasificador, en la alimentación del clasificador y en la arena; porcentajes que equivalen a las relaciones de líquido a sólido 3.0, 1.0 y 0.19 (véase figura 3).

$$\text{Relación de carga circulante} = \frac{3.0 - 1.0}{1.0 - 0.19} = 2.47 = 247\%$$

y

$$\text{Tonelaje de carga circulante} = 2.47 \times 300 = 741 \text{ toneladas.}$$



**Figura 3. Diagrama del conjunto "molino-clasificador"**

En la figura,

- A = tonelaje de mineral que se alimenta al molino.
- B = tonelaje de mineral que descarga el molino.
- C = tonelaje de arena.
- O = tonelaje de mineral que descarga el clasificador por el derrame.

Si

- $D_C$  = relación de líquido a sólido de la arena.
- $D_B$  = relación de líquido a sólido de la alimentación al clasificador.

y

$D_O$  = relación de líquido a sólido del derrame del clasificador.

$$\text{Relación de carga circulante} = \frac{D_O - D_B}{D_B - D_C}$$

y

$$\text{Tonelaje de carga circulante} = A \frac{D_O - D_B}{D_B - D_C}$$

## **DESARROLLO DE LA PRÁCTICA**

1. Muela aproximadamente 5 kg de muestra mineral a -10 mallas.
2. Homogeneice el mineral, cuártalos y obtenga una muestra para análisis de cribas.
3. En una probeta graduada de 1 lt, compacte mineral hasta obtener 700 cc.
4. Pese los 700 cc. Este peso será el del mineral que alimentará al molino.
5. Elija la malla de prueba en la que se realizará la molienda, inferior a la malla 28.

6. Para iniciar la prueba, muele en el molino los 700 cc de mineral enunciados en los pasos 3 y 4, durante 100 revoluciones en seco.
7. Después de moler, clasifique o pase el mineral por la malla de prueba.
8. Pese el mineral fino y efectúe los siguientes cálculos:

8.1. Producción ideal =  $\frac{\text{Peso de los 700 cc}}{3.5}$

8.2. Producción neta = material cribado (fino) - material que inicialmente está a menos la malla de prueba.

8.3. Gramos molidos por revolución (*Gbp*) = Producción neta / No. de revoluciones.

8.4. Aparte los finos y alimente una cantidad igual en peso de mineral fresco para que se mantenga estable el circuito, como se indica en la figura 3.

8.5. Determine la cantidad de material que trae el mineral fresco a un tamaño inferior a la malla de prueba, que será igual al peso de finos por el porcentaje a la malla de prueba determinado en el punto 2.

8.6. Producción neta requerida en el siguiente período = Producción ideal - resultado del punto 8.5.

8.7. Número de revoluciones = Punto 8.6 / Punto 8.3.

8.8. Si *Gbp* es constante hasta centésimos, realice un análisis de cribas al mineral que se apartó en el punto 8.4 para determinar *P*, y calcule el *Wi*, de lo contrario regrese al punto 7.

Para mayor facilidad, complete la siguiente tabla:

Peso de 700 cc de mineral =  
 $F$  =  
 % a menos malla de prueba =  
 $P_i$  =  
 $P.P.I.$  =  
 $P$  =  
 $W_i$  =

Ciclo	Peso de min. a menos malla de prueba en alimentación fresca	Peso de finos después de moler	Producción neta	Gbp	Producción neta requerida	Carga circulante (%)
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

**MATERIAL NECESARIO**

- 5 kg mineral triturado a -10 mallas.
- Molino de bolas.
- Carga de bolas.
- Criba de 60 mallas.
- Cubeta.
- Cucharón.
- Brocha.
- Cronómetro.
- Tapa y fondo para tamizar en seco el mineral.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Presente un informe de la práctica de acuerdo con el formato señalado por el profesor del laboratorio.



FACULTAD DE INGENIERIA

G-611666

# BIBLIOGRAFÍA

ESPINOSA DE LEÓN, L. y LÓPEZ ABURTO, V.M., *Teoría y prácticas de trituración y molienda*. México, Facultad de Ingeniería, 1984.

KELLY, E.G. y SPOTTIWOOD, D.J., *Introduction to Mineral Processing*. USA, John Wiley & Sons, 1982.

TARJAN, G., *"Mineral Processing"*. Vol. 1: *Fundamentals, Comminution, Sizing and Classification*. Budapest, Hungarian Academy of Sciences, 1981.

WILLS, B.A., *Tecnología de procesamiento de minerales*. México, Limusa, 1989.

**APUNTE  
165-B  
1996  
G.-611606**

**FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.**



**\*611606\***

Esta obra se terminó de imprimir  
en septiembre de 1997  
en el taller de imprenta del  
Departamento de Publicaciones  
de la Facultad de Ingeniería,  
Ciudad Universitaria, México, D.F.  
C.P. 04510

**Secretaría de Servicios Académicos**

El tiraje consta de 100 ejemplares  
más sobrantes de reposición.