

Estudio de la calidad de un yacimiento de feldespato

Quality study of a feldspar deposit

J. TABOADA*, A. VAAMONDE**, A. SAAVEDRA** y A. ARGÜELLES*

(*) Dpto. de Explotación de Minas, Univ. de Vigo

(**) Dpto. de Estadística e I. O., Univ. de Vigo

Fecha de recepción: 14-VI-99

Fecha de aceptación: 23-VIII-99

ESPAÑA

RESUMEN

Este trabajo describe un yacimiento de pegmatita compuesto por varios filones, que varían entre 50 y 800 metros de longitud y casi 15 metros de ancho. Con el fin de evaluar el potencial de explotación, se caracteriza la calidad del producto vendible. Esto se lleva a cabo mediante un procedimiento de muestreo, clasificación granulométrica, separación magnética, proceso de flotación y análisis mineralógico. Para establecer el proceso de flotación más eficaz, se ha experimentado con varios procedimientos, cuya breve descripción se incluye. Posteriormente, y con el fin de establecer el porcentaje de feldespato vendible en el yacimiento, se realizó un estudio geoestadístico para identificar tanto las categorías de calidad como su distribución en el yacimiento.

SUMMARY

This work describes a pegmatite mineral deposit composed by some veins of a length between 50 and 800 meters and a width of almost 15 meters. With the purpose to evaluate the potential exploitation, we have characterized the quality of the selling product, through a sampling procedure, granulometric classification, magnetic separation, flotation process and mineralogical analysis. In order to establish the more able flotation process, we have tested different methods, that we also include here. Later on, and with the finality to establish the selling feldspar percentage in the deposit, we realized a geoestatic study in order to identify, not only the different qualities but also its distribution in the deposit.

INTRODUCCIÓN

Las reservas de feldespato en España, según el Inventario Nacional de Recursos de Feldespato del Instituto Tecnológico Geominero de España (I. T. G. E.), son de 32,5 M de t. Estas reservas se distribuyen entre las tres diferentes formaciones rocosas que, preferentemente, proporcionan feldespato y que son: pegmatitas, arenas feldespáticas y rocas ígneas.

En Galicia existen numerosos filones pegmatíticos, aunque los únicos que han sido objeto de aprovechamiento se localizan en las provincias de Pontevedra y Lugo. En Lugo en los municipios de Planto (Valle del Oro) y Muras, en los parajes de Escoiras, al norte de la Sierra de Gistral y Silán. En general, se trata de filones de pequeño tamaño, con corridas de algunos centenares de metros y potencias inferiores a los 15 m.

Los cuatro yacimientos de mayores reservas de Galicia son: Silán con 5 millones de toneladas y Santitxu, Fronceira y Quinta con 400.000 toneladas cada uno.

Debido a lo anterior, se ha seleccionado el yacimiento de Silán como el yacimiento más importante en cuanto a reservas y desarrollo futuro de Galicia. En la selección del yacimiento también se ha considerado que es el más rico en feldespato, con unos contenidos medios del 70%, contra contenidos alrededor del 20% en los otros yacimientos.

Estamos, pues, ante un yacimiento filoniano de pegmatita, compuesto de varios filones de longitud entre 50 m y 800 m, y menos de 15 m de potencia, con una dirección de 10° a 30° E.

Las pegmatitas se caracterizan por su tamaño de grano,

pobreza en elementos micáceos y cristalización muy tardía del cuarzo. La proporción feldespato potásico/plagioclasa es variable. El primero es microclina y el segundo albita con maclas polisintéticas muy finas que a veces se acuñan. Se observa la rotura de cristales. Como accesorios hay: granate, biotita, opacos en pajuelas y apatito.

Para conocer las posibilidades de explotación de este yacimiento se ha caracterizado la calidad del producto vendible mediante un proceso de muestreo, preparación de muestras, flotación, análisis de laboratorio y caracterización geoestadística que definimos a continuación.

METODOLOGÍA

El trabajo se ha estructurado en las siguientes fases de investigación:

. Toma de muestras de los diferentes filones mediante perforación y voladura, para obtener muestras de roca no alterada.

. Clasificación granulométrica. El mineral procedente de la mina se ha sometido a una trituración en machacadora de mandíbulas y a continuación a una molienda en un molino de cilindros. Después con una criba vibratoria se ha obtenido una granulometría entre 0,5 y 0,074 mm.

. Separación magnética para eliminar los minerales férricos que acompañan al mineral: granates, micas, turmalina, etc., mediante campos magnéticos de alta intensidad, de valores superiores a 15 Kgauss (Ver (6) para más detalles).

. Flotación en espuma. Se han ensayado diversos procedimientos de flotación hasta encontrar el más idóneo debido a las dificultades de la separación del cuarzo y feldespato por su semejante estructura química (Ver (6) para más detalles).

. Análisis mineralógico de las muestras flotadas por difracción de rayos X, comprobando el grado de enriquecimiento del feldespato y el porcentaje de recuperación de la pegmatita.

. Estudio geoestadístico del porcentaje de feldespato vendible. Se calculó el semivariograma experimental de los datos correspondientes a cada muestra y se llegó a un sistema de kriging mediante el cual, una vez resuelto, se determinaron los grupos de calidad y su distribución en el yacimiento.

. Elaboración de mapas de calidad de yacimiento respecto al porcentaje de feldespato vendible, correspondientes a los diferentes filones.

ENSAYOS DE FLOTACIÓN

Para determinar los parámetros idóneos para la flotación de las muestras se han hecho varios tipos de ensayos diferentes con los que se trataba de investigar qué reactivos serían los mejores, sus concentraciones, velocidad de agitación, dilución de la pulpa y tiempos de acondicionamiento del mineral, con el fin de obtener la máxima recuperación de feldespato de las muestras, como puede verse en (5).

Las primeras muestras ensayadas se hicieron con una máquina de flotación Humboldt a una velocidad de rotación entre 1.000-2.000 r.p.m., pero debido al pequeño diámetro del rotor del agitador, el acondicionamiento era defectuoso y el mineral recuperado en la flotación era muy bajo y, por tanto, se desechó la máquina.

Debido a lo anterior, se diseñó e hizo construir una máquina de flotación con un rotor de mayor diámetro y se le acopló un variador de velocidad digital para poder regular la velocidad de giro de revolución en revolución desde 0 hasta 2.000 r.p.m. El eje del agitador dispone de una válvula para la apertura y cierre del acceso del aire necesario para la flotación (Ver (7)).

Todos los métodos ensayados que se exponen a continuación fueron realizados con la misma muestra para que los resultados fuesen comparativos.

MÉTODO 1

A) Acondicionado del mineral: 60% Sólidos + 40% Agua.

Se tomaron 2.000 g de mineral y 1.330 ml de agua. A esta pulpa se le adicionó ácido fluorhídrico (FH – 1.000 g/t) y se acondicionó durante 4 minutos. Posteriormente se adicionó amina (300 g/t) a la pulpa y se acondicionó 4 minutos más.

B) Flotación: 30% Sólidos + 70% Agua.

Al mineral acondicionado anteriormente se le añadió 4.666 ml de agua y aceite de pino (50 g/t) y se realizó la flotación.

En esta primera flotación se obtuvo una cantidad de flotado de 434 g que es aproximadamente un 25% del mineral de partida, considerándose un porcentaje aceptable.

C) Acondicionado del mineral 2: 50% Sólidos + 50% Agua.

A continuación se pasó al acondicionamiento del hundi-do anterior al que se le añadió ácido fluorhídrico (FH– 50 g/t) y se acondicionó durante 3 minutos. Tras esto se le adicionó amina (100 g/t) continuando el acondicionado 3 minutos más.

D) Flotación 2: 25% Sólidos + 75% Agua.

Al mineral acondicionado se le añadió el agua correspondiente y aceite de pino (15 g/t) y se realizó la flotación.

En esta segunda flotación la recuperación fue muy baja y la espuma era poco consistente.

Este proceso se repitió con los mismos parámetros varias veces, pero como salían resultados similares que se desechó este método.

MÉTODO 2

En este método se trató de conseguir, con una única flotación, la máxima recuperación de feldespato y la depresión total del cuarzo.

Para flotar el feldespato utilizamos la amina, que actúa como colector, y el aceite de pino, que actúa como espumante, y, para deprimir el cuarzo, empleamos ácido fluorhídrico (Ver referencia (8)).

En este método la velocidad de rotación de la máquina fue de 1.200 r.p.m.

A) Acondicionado del mineral: 60% Sólidos + 40% Agua.

Se tomaron 2.000 g de mineral y 1.330 ml de agua. A esta pulpa se le adicionó ácido fluorhídrico (FH 48%– 1.930 g/t) y se acondicionó durante 5 minutos. Posteriormente se adicionó amina (2.600 g/t) a la pulpa y se acondicio-nó 5 minutos más.

B) Flotación: 30% Sólidos + 70% Agua.

Al mineral acondicionado anteriormente se le añadió 4.666 ml de agua y aceite de pino (400 g/t) y se realizó la flotación.

El tiempo requerido para la flotación en este método fue muy corto, alrededor de 1 minuto.

Los resultados obtenidos en los ensayos, en el curso de los cuales las concentraciones de ácido fluorhídrico, amina y aceite de pino fueron modificadas alrededor de

los valores dados anteriormente, permitieron extraer las conclusiones siguientes:

. La distribución de cuarzo y feldespatos en el flotado y hundido depende de la granulometría de los productos de partida o todo uno.

. La recuperación de feldespato está en relación directa con la concentración de amina presente en la pulpa. La recuperación de cuarzo en el rechazo permanece casi constante e independiente de la concentración de amina.

. La cantidad de ácido fluorhídrico influye sobre la selectividad de la separación:

- Para $\text{pH} > 3$ (concentraciones de FH < 750 g/t) el efecto depresivo del ácido fluorhídrico sobre el cuarzo es nulo, lo que provoca la flotación conjunta del cuarzo y feldespato.

- Para $\text{pH} = 3$ (concentraciones de FH = 1.000 g/t) se nota un cierto efecto depresivo sobre el cuarzo pero la flotación es poco selectiva.

- Para $\text{pH} < 3$ (concentraciones de FH > 1.000 g/t) aumenta el efecto depresivo sobre el cuarzo.

En los análisis de Difracción por Rayos X efectuados sobre los ensayos realizados, se ha observado que se obtienen porcentajes de cuarzo en el flotado entre un 10-15% y porcentajes de feldespato en el hundido de un 70-80%, lo cual invalidaba el método.

Se intentó aumentar la concentración de amina llegando a 3.000 g/t, pero se observó que aunque aumentaba la recuperación de los feldespatos también aumentaba el porcentaje de cuarzo.

A continuación reflejamos el análisis de Difracción por Rayos X de uno de los ensayos, siendo todos muy similares:

	% CUARZO	% MICROCLINA	% ALBITA	% MOSCOVITA
TODO UNO	20	22	53	5
FLOTANDO	12	11	74	3
HUNDIDO	19	30	47	4

MÉTODO 3

A) Acondicionado del mineral: 65% Sólidos + 35% Agua.

A la pulpa se le adicionó ácido fluorhídrico (FH– 750 g/t) y se acondicionó durante 10 minutos.

B) Flotación: 20% Sólidos + 80% Agua.

Al mineral acondicionado anteriormente se le añadió el agua. Seguidamente se adicionó ácido sulfúrico hasta conseguir que el pH fuera aproximadamente 2.

Posteriormente se añadió amina (750 g/t) a la pulpa y se realizó la flotación.

C) Acondicionado del mineral 2: 50% Sólidos + 50% Agua.

A continuación se pasó al acondicionamiento del hundi-do anterior al que se le añadió ácido fluorhídrico (FH – 750 g/t) y se acondicionó durante 10 minutos.

D) Flotación 2: 20% Sólidos + 80% Agua.

Al mineral acondicionado se le añadió el agua correspondiente y se le adicionó ácido sulfúrico hasta conseguir que el pH fuera aproximadamente 2.

Posteriormente se añadió amina (750 g/t) a la pulpa y se realizó la flotación.

. Para llegar a los parámetros definitivos se han hecho numerosas variaciones en cuanto a diluciones, concentraciones de los reactivos, tiempos de acondicionamiento, velocidades de rotación, etc., llegándose a las siguientes conclusiones:

. Los tiempos de acondicionamiento por debajo de 10 minutos son insuficientes, ya que los reactivos no son plenamente absorbidos por el mineral provocando recuperaciones muy bajas en el proceso de flotación.

. En algunas de las muestras ensayadas, en concreto las muestras de color rojo (más alteradas), el tiempo de 10 minutos de acondicionado era insuficiente, por lo que lo elevamos a 15 minutos. Esto provocó que la recuperación del feldespató en el flotado aumentara alrededor de un 10-15%.

. También se observó que por encima de los 15 minutos de acondicionado de la muestra el efecto sobre la recuperación es casi inapreciable.

. Al aumentar la concentración de amina por encima de 750 g/t se observó que se incrementaba el porcentaje de cuarzo en el flotado.

. Al subir la concentración de ácido fluorhídrico por encima de 750 g/t se observó que aumentaba el porcentaje de feldespató en el hundido.

. El valor óptimo del pH para la recuperación del feldespató está entre 2-2,1.

. El tiempo de flotación de la muestra está alrededor de los 4 minutos, aunque en las muestras de color rojo el tiempo se incrementaba de 1 a 3 minutos.

. La velocidad de rotación del rotor idónea oscila entre 900-1.200 r.p.m.

. Se han ensayado diversas diluciones de la pulpa estimando que la idónea es la señalada en el método 3.

. La altura de la espuma óptima es de unos 7 centímetros.

PARÁMETROS DE FLOTACIÓN

Por tanto, a la vista de los resultados obtenidos en estos ensayos, hemos adoptado los parámetros del método 3 por haber conseguido con ellos los mejores resultados.

También se han realizado ensayos tratando de flotar el cuarzo deprimiendo el feldespató, pero los resultados aún fueron peores.

El proceso de extracción por flotación de las muestras se desarrolla en dos fases bien diferenciadas:

- . Acondicionado del mineral.
- . Flotación del mineral.

El acondicionado de la muestra de mineral se realiza con un 65% de sólidos, un 35% de agua en peso y 750 g de ácido fluorhídrico por tonelada de mineral.

Tomando como muestra inicial 1.375 g de mineral, le corresponde 740 ml de agua y 20, 6 ml de ácido fluorhídrico diluido al 5%.

Se introducen las cantidades indicadas en el recipiente de la celda de flotación, se programa en la máquina las revoluciones deseadas, que en nuestro caso son 300 r.p.m., y se pone en marcha la máquina.

La duración del acondicionado es de 10 minutos.

Una vez finalizada la fase de acondicionado, se escurre el mineral acondicionado con ayuda de un tamiz de malla 0,074 mm, para perder la mínima cantidad de mineral.

Seguidamente se pasa a realizar la flotación.

La flotación se realiza con un 20% de sólidos, un 80% de agua y 750 g de amina por tonelada de mineral.

Se introduce la pulpa escurrida en el recipiente de la celda y se le añaden 5.500 ml de agua. A continuación, tras programar en la máquina las revoluciones, que para la flotación, al requerirse mayor velocidad, son 900 r.p.m., se pone en marcha la celda. Se mide el pH del agua y, con ácido sulfúrico, ajustamos el pH entre 2 y 2,1.

Una vez conseguido el pH adecuado se le añaden 20,6 ml de amina diluida al 5%, y se abre el aire para que comience la flotación del mineral.

Después de la flotación se pesa el "flotado", del que posteriormente, tras secarlo en el horno, se envía una muestra a analizar para conocer el feldespato recuperado.

Como todo el feldespato de la muestra inicial de mineral no ha flotado, el "hundido" vuelve a flotarse, para lo cual se tiene que repetir el proceso, es decir, el acondicionado y la flotación.

En el segundo acondicionado (acondicionado del hundido) el porcentaje en peso de sólidos y agua es distinto al anterior: 50% de sólidos y 50% de agua.

El mineral hundido se pesa en una balanza, se introduce en el recipiente de la celda de flotación y se le añade la cantidad de agua (igual al peso del mineral) y los mililitros de ácido fluorhídrico que le corresponden, considerando que se le tiene que adicionar al mineral 750 g de ácido fluorhídrico por tonelada de mineral. A continuación se programan las revoluciones de la máquina que en este acondicionado están entre 500-600 r.p.m., y se pone en funcionamiento la celda.

El segundo acondicionado del mineral se realiza durante 10 minutos.

Al finalizar el acondicionado, se escurre el mineral utilizando la misma criba y se aborda la siguiente flotación.

La segunda flotación se realiza con los mismos porcentajes en peso que en la primera flotación: 20% de sólidos y 80% de agua.

El proceso a seguir en esta flotación es igual que en la anterior.

Se introduce en el recipiente la pulpa acondicionada ya escurrida y se le añade el agua que le corresponde (peso de mineral multiplicado por cuatro). Seguidamente se le programan las revoluciones a la máquina, 900 r.p.m., y se pone en marcha. Se introduce en el agua el electrodo del

pHmetro y se ajusta el pH entre 2 y 2,1 con ácido sulfúrico. Enseguida se le agrega la cantidad de amina correspondiente, 750 g de amina por tonelada de mineral, y se abre el aire procediendo a la flotación.

Finalizada la flotación, se pesa el mineral flotado y el hundido y se introducen en el horno muestras representativas de los mismos. Tras doce horas en el horno a una temperatura de 105 °C, las muestras del mineral ya están secas y se envían al laboratorio para que las analicen mineralógicamente.

Después de realizar algunas flotaciones, determinadas muestras no flotaban como cabría esperar y ello era debido a que la composición mineralógica de las muestras varía de un filón a otro. Por ello, a estas muestras, se las acondicionaba durante 15 minutos en el primer acondicionado, obteniéndose mejores resultados.

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DEL PORCENTAJE DE FELDESPATO VENDIBLE

Tras el proceso de flotación ensayado se han obtenido los porcentajes muestrales de feldespato vendible. Procedemos ahora a la determinación y estudio de la posible dependencia espacial de este porcentaje.

Puesto que tenemos asignado un valor de índice a cada elemento muestral recogido podremos hacer un estudio estructural. El paso previo a todo estudio geoestadístico consiste en procurar un sistema de coordenadas asociado a la muestra. Este sistema será la referencia de toda medida de dependencia espacial del índice de calidad.

Procedemos ahora a calcular el semivariograma experimental y a su posterior ajuste por medio de una función continua que denominamos semivariograma teórico. Esta última será la función de referencia, la utilizada en todas las interpretaciones sobre el comportamiento de la calidad y la que se implementa en los cálculos de extrapolación realizados en el sistema de kriging.

Encontramos una estructura de dos semivariogramas anidados. Uno de ellos se corresponden a una función de tipo exponencial y el segundo es un efecto pepita puro. Los forma de los dos semivariogramas señalados se detalla a continuación (Ver (2)):

$$\gamma(h) = 40.5953 + 100.795 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{48}\right)\right), h \geq 0$$

donde el valor de pepita es de 40.5953. El alcance de la estructura exponencial es de 48 metros. Esto quiere decir que las extrapolaciones pueden llevarse a cabo para puntos que disten entre sí 48 metros, como máximo, de alguno de

los elementos que sí ha sido considerado dentro del estudio geoestadístico. Otra característica de la estructura exponencial es su meseta, con valor de 100.795. Los valores de meseta se presentan sólo en los modelos llamados de transición, como son los modelos esféricos, exponenciales y gaussianos. Este valor se corresponde con la varianza de los datos. Estos modelos de transición pueden aplicarse cuando el comportamiento de la variable (calidad en nuestro caso) nos indique que a partir de una cierta distancia, que denominamos alcance o rango, las observaciones son incorreladas (Ver (3) para más detalles).

En la Figura 1 se puede observar el semivariograma experimental (representado mediante puntos) y la función semivariograma teórico que mejor lo ajusta. Es importante señalar que este ajuste debe ser más preciso cuanto menor sea la distancia entre observaciones. Por esta razón, a la hora de determinar el semivariograma teórico, es el buen ajuste realizado en el entorno del origen el que determina la estructura definitiva.

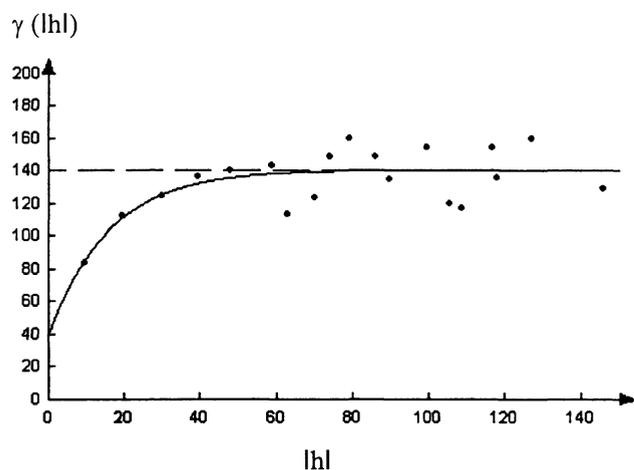


Figura 1.- Semivariograma experimental y teórico.

Además del efecto pepita, el comportamiento del semivariograma, más concretamente de la pendiente del mismo, en el origen dan lugar a información adicional sobre el tipo de dependencia espacial del fenómeno estudiado. Los modelos exponenciales tienen, todos ellos, un comportamiento lineal en el origen. Este es en realidad el comportamiento más observado en la práctica y suele estar acompañado por un efecto de pepita. El comportamiento lineal en el entorno del origen indica, en contraposición con los modelos de comportamiento parabólico, un comportamiento no muy continuo o irregular.

Mediante la utilización de estos semivariogramas anidados llegamos a un sistema de kriging mediante el cual, una vez resuelto, se determinan los grupos de calidad. Se han realizado cada una de estas extrapolaciones por separado

para cada uno de los siete filones analizados, utilizando el programa GSLIB, (ver (4)). Los valores obtenidos mediante la resolución de los sistemas de kriging han dado lugar a extrapolaciones del porcentaje de feldespato vendible en la medida que el alcance del semivariograma nos lo permitía. Uno de los mapas de las extrapolaciones de este porcentaje, para tres venas del depósito de feldespato de Silán, es el que se muestra en la Figura 2.

CONCLUSIONES

Tras el estudio de investigación realizado se ha llegado a las conclusiones que adjuntamos a continuación:

Para realizar la flotación del mineral, la granulometría del mismo tiene que estar entre 0,5-0,074 mm.

Los resultados obtenidos de las flotaciones han sido aceptables, ya que se han alcanzado, en la gran mayoría de las muestras, unos resultados válidos en lo que a recuperación de feldespato se refiere. Hay que considerar que en una planta real de flotación, el número de flotaciones por el que pasa el mineral es muy superior a dos, que es el número de flotaciones realizadas a las muestras, por lo que se estima que la recuperación de feldespato en un proceso industrial será mayor de la conseguida en el estudio.

El porcentaje de cuarzo presente en el feldespato vendible está, salvo en un filón, por debajo del estándar de calidad deseable para el feldespato vendible, alrededor del 15%.

Por consiguiente, concluimos que los filones investigados son totalmente explotables por flotación, según el método descrito en el estudio realizado.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Bulin, N.J. A study of feldspar flotation. *Erzmetall*, 36(9)(1983) pp 427-432.
- (2) Cressie, N.A.C. *Statistics for spatial data*. John Wiley (1993).
- (3) Davis, J.C. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley (1986).
- (4) Deutsch, C.V. And Journel, A.G. *GSLIB geostatistical software library and user's guide*. Oxford University Press (1992).
- (5) Katayanagi, A. A new feldspar flotation process without hydrofluoric acid. *Ceramics Japan* 8(1)(1973) pp 58-61.
- (6) López Gómez, F.A. Possibilities for the recovery of feldspar and quartz in pegmatitic rocks by magnetic separation and flotation. *Bolletino della Associazione Mineraria Subalpina XXII* (1-21) (1985) pp 172-180.
- (7) Mathieu, G.I. and Sirois, L.L. New processes to float feldspathic and ferrous mineral from quart. *Reagents in the mineral industry*. Institution of Mining and Metallurgy. Jones J. and Blatt R. (1984) pp 239-243.
- (8) Watson I. Feldspathic fluxes the rivalry reviewed. *Minerais* 16 (1981) 3 pp 21-45.

