

4. Luz, Adão Benvindo da. Desativação de Minas. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1996. 18p.
5. Maia, Joaquim. Considerações Sobre a Prática de Lavra em Passagem, MG. Ouro Preto. Escola de Minas da UFOP. Tese de livre docência. 1948. 125p.
6. Oliveira Júnior, J. B. desativação de empreendimentos mineiros: estratégia para diminuir o passivo ambiental. São Paulo. Tese de Doutorado em Engenharia Mineral, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica. 2001. 179 p.
7. Rubio, Rafael Fernández. Minería y sustentabilidad Hoy. Belo Horizonte. X Congresso Brasileiro de Mineração. Anais. IBRAM. 2003.
8. Taveira, Ana Lucia Silva. Provisão de recursos financeiros para fechamento de empreendimentos mineiros. São Paulo. Tese doutorado. Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. 2003. 209 p.

ESTUDIO DE DESULFURIZACIÓN DE RELAVES GENERADORES DE DAR, ANTES DE SU DISPOSICIÓN FINAL, COMO ALTERNATIVA DE MANEJO Y MITIGACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

* **Dr.- Ing. Gerardo Zamora E.** - ** **M. Sc. Ing. Octavio Hinojosa C.**

*** **Dr.- Ing. Antonio Salas C.**

Es conocido que los relaves de las plantas concentradoras que procesan minerales sulfurosos son generadores de DAR. La industria minera ha desarrollado diferentes estrategias para evitar el efecto negativo del DAR sobre el medio ambiente. Una de estas estrategias es la “desulfurización ambiental”, como etapa previa a la disposición final de los relaves de un proceso, y consiste en separar los minerales sulfurosos remanentes en los relaves por un proceso de flotación no selectiva de sulfuros; así, producir una fracción de sulfuros, con menor porcentaje en peso y fuertemente reactiva o generadora de DAR (producto float); y otra fracción, mayoritaria en peso y con bajo contenido de sulfuros y por tanto no generadora de acidez (non float).

Este proceso de desulfurización permite entonces generar un producto “estable químicamente – non float”; qué en la etapa de cierre, no requiere de medidas ambientales; mientras que, el producto sulfuroso – float, debe ser manejado ambientalmente y requerirá medidas especiales en la etapa de cierre pero a un costo menor.

Para el estudio se ha considerado una muestra representativa de los relaves de una empresa minera de explotación de complejos Pb-Ag y Zn-Ag. Se ha llevado adelante la caracterización física; química, mineralógica y biológica. Asimismo, la muestra ha sido sometida a pruebas geoquímicas estáticas y dinámicas de predicción de DAR antes y después del proceso de desulfurización.

De los resultados obtenidos en el estudio es posible establecer que, mediante una etapa adicional bulk de flotación de sulfuros de los relaves estudiados, es posible eliminar la fracción sulfurosa; generando así, un residuo (non float) NO GENERADOR de DAR con cerca del 85% en peso que, en la etapa de cierre del sitio de disposición final del mismo, no requerirá medidas ambientales de rehabilitación. Esto implica un “ahorro enorme” en la fase de rehabilitación final del sitio minero. Por otra, la fracción sulfurada requerirá una disposición ambiental adecuada y emdidas de rehabilitación en la etapa del cierre.

It is known that the tailings of the concentrator plants that process sulphide minerals are generators of ARD. The mining industry has developed different strategies to avoid the negative effect of the DAR on the environment. One of these strategies is the "environmental desulfurization", as a previous stage to the final disposal of the tailings of a process, and consists in separating the remaining sulfur minerals in the tailings by a non-selective sulfide flotation process; thus, produce a fraction of sulfides, with a lower percentage by weight and strongly reactive or generator of DAR (float product); and another fraction, mostly in weight and with low sulfur content and therefore not generating acidity (non float).

Palabras Clave: desulfurización – disposición final – relaves

Docentes – Carrera de Metalurgia– Universidad Técnica de Oruro
Ciudad Universitaria – Zona Sud – Oruro – Bolivia

[*gerardozamoraachenique@yahoo.es](mailto:gerardozamoraachenique@yahoo.es) [**octahinojosacarrasco@hotmail.com](mailto:octahinojosacarrasco@hotmail.com) [***salasdeviaje@yahoo.es](mailto:salasdeviaje@yahoo.es)

ABSTRACT

This desulfurization process allows then to generate a product "chemically stable - non float"; what in the closing stage, does not require environmental measures; while, the sulfur - float product must be managed environmentally and will require special measures in the closing stage but at a lower cost.

For the study, a representative sample of tailings from a mining company operating Pb-Ag and Zn-Ag complexes was considered. The physical characterization has been carried forward; chemical, mineralogical and biological. Likewise, the sample has been subjected to static and dynamic geochemical tests of DAR prediction before and after the desulfurization process.

From the results obtained in the study it is possible to establish that, through a further bulk flotation stage of sulfides from the tailings studied, it is possible to eliminate the sulphurous fraction; thus generating a non-float residue with about 85% by weight that, in the closing stage of the final disposal site, will not require environmental rehabilitation measures. This implies a "huge saving" in the final rehabilitation phase of the mining site. On the other hand, the sulfur fraction will require an adequate environmental disposition and rehabilitation measures in the closing stage.

Keywords: desulfurization - final disposal – tailings

1. INTRODUCCIÓN

Es conocido que los relaves de las plantas concentradoras que procesan minerales sulfurosos para obtener concentrados de Zn-Ag y Pb-Ag, son generadores de DAR por presentar en su composición especialmente pirita. La industria minera ha desarrollado diferentes estrategias para evitar el efecto negativo del DAR sobre el medio ambiente. Una de estas estrategias es la “desulfurización ambiental”, como etapa previa a la disposición final de los relaves de un proceso, y consiste en separar los minerales sulfurosos remanentes en los relaves por un proceso de flotación no selectiva de sulfuros; así, producir una fracción de sulfuros, con menor porcentaje en peso y fuertemente reactiva o generadora de DAR (producto float); y otra fracción, mayoritaria en peso y con bajo contenido de sulfuros y por tanto no generadora de acidez (non float).

El estudio de desulfurización de relaves generadores de DAR, antes de su disposición final, como alternativa de manejo y mitigación de impacto ambiental, fue realizado siguiendo en principio una etapa de caracterización de las colas del proceso de una empresa minera; para luego, realizar el estudio de desulfurización mediante una etapa adicional de flotación bulk de sulfuros; y finalmente, presentar una propuesta de manejo ambiental.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS RELAVES ESTUDIADOS

Los resultados del análisis por difracción de rayos X de las muestras anteriormente citadas, se presentan en la Tabla 2.

| Mineral | Formula | M1 | M2 |
|---------------------------------|---|----|----|
| Esfalerita ferrosa | $(Zn_{0.984}Fe_{0.026})S$ | X | |
| Pirita | FeS_2 | X | X |
| Galena | PbS | X | |
| Tetratioantimoniato de Cobre(I) | $Cu_3(SbS_4)$ | | X |
| Monóxido de plomo | PbO | X | |
| Hidroxiantimoniato | $Sb_3O_6(OH)$ | | X |
| Dickite | $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ | | |
| Franklinita | $(Zn_{0.93}Fe_{0.07})(Fe_{1.95}Zn_{0.04})O_4$ | | |

La caracterización de los relaves objeto de investigación, se basa en el estudio de las características físicas, químicas y mineralógicas; además de la determinación del comportamiento geoquímico, a partir de Pruebas Geoquímicas Estáticas y Dinámicas, a objeto de determinar por una parte el Potencial de Generación de Drenaje Ácido (DAR) a través del test estático; y por otra, la determinación de la Tasa de Generación de DAR y la Carga de Metales Pesados que puede generar, debido a la presencia de sulfuros en su composición y su oxidación en presencia de agua y oxígeno.

Se tomó una muestra fresca de los relaves de descarga de la planta de procesamiento mineral (M1), antes de su disposición final; además de, una muestra del dique de relaves (M2). En la tabla 1, se presentan los resultados del análisis químico de las muestras de relaves del proceso.

| PARAMETRO | UNIDAD | M1 | M2 |
|-----------|--------|-------|-------|
| Antimonio | % | 0,02 | 0,02 |
| Arsénico | % | 0,07 | 0,07 |
| Calcio | % | 0,89 | 0,45 |
| Cadmio | % | 0,002 | 0,005 |
| Cobre | % | 0,01 | 0,02 |
| Hierro | % | 3,25 | 3,68 |
| Plomo | % | 0,12 | 0,14 |
| Zinc | % | 0,31 | 0,71 |
| Azufre | % | 2,59 | 3,85 |
| Sulfato | % | 0,04 | 0,02 |

Tabla 1.- Análisis Químico de las muestras de COLAS DEL PROCESO

| GANGA | | | |
|--------------|--|---|---|
| Sílice | SiO ₂ | X | X |
| Anortita | CaAl ₂ Si ₂ O ₈ | X | |
| Muscovita | K(Al ₄ Si ₂ O ₉ (OH) ₃) | X | |

Tabla 2.- Resultados del Análisis de Difracción de Rayos X de las Muestras de las Colas del Proceso

Asimismo, se ha determinado el Potencial Neutro y el Potencial Ácido de las muestras de las Colas del Proceso a objeto de calcular el

Potencial Neto de Neutralización. La tabla 3, presenta los resultados obtenidos.

| | NNP (kgCaCO ₃ /t) AP Análisis | NP/AP Análisis |
|----|--|-------------------|
| M1 | -58.27 | 0.28 |
| M2 | -108.85 | 0.09 |

Tabla 3.- Resultados de la Prueba Geoquímica Estática de las Muestras de Relaves del proceso

La evaluación de los resultados obtenidos de acuerdo a los dos criterios conocidos, pueden resumirse que los residuos son “altamente generados de DAR”; puesto que, el NNP es menor a menos 20 kg CaCO₃/t (Primer Criterio); o la relación NP/AP, es menor a la unidad (Segundo Criterio).

relaves, se han desarrollando pruebas geoquímicas dinámicas en celdas dinámicas en las que se han realizado ciclos de humidificación con una duración de 7 días por ciclo (haciendo pasar 3 días de aire seco; 3 días de aire húmedo; y el último día, procediendo con el lavado con un volumen de agua similar al de máxima precipitación fluvial de la zona.

Para predecir las tasas de generación de DAR y la calidad de los lixiviados que generarán estos

La Tasa de Generación de DAR, a partir de los descensos del valor del pH, es presentada en la Tabla 4.

| Años | M1 g H ₂ SO ₄ /t | M2 g H ₂ SO ₄ /t |
|----------------|---|---|
| 1 | 19,554 | 0,98 |
| 2 | 0,001 | 2,46 |
| 3 | 0,001 | 0,02 |
| 4 | 0,002 | 0,01 |
| 5 | 0,003 | 0,00 |
| 6 | 0,002 | 0,01 |
| 7 | 0,002 | 0,01 |
| 8 | 0,004 | 0,01 |
| 9 | 0,005 | 0,01 |
| 10 | 0,020 | 0,03 |
| 11 | 0,004 | 0,00 |
| 12 | 0,004 | 0,00 |
| 13 | 0,008 | 0,01 |
| 14 | 0,010 | 0,01 |
| 15 | 0,012 | 0,02 |
| TOTALES | 19,632 | 3,60 |

Tabla 4.- Tasa de Generación de DAR de las Muestras del Relave Estudiado

Por otra parte, al graficar el contenido de calcio acumulado presente en las soluciones de enjuague versus el sulfato acumulado, y graficar el punto que representa las condiciones iniciales de Calcio y Sulfato en las muestras, éste se encuentra ubicado en la zona del sulfato; por lo que, se confirma que el **RESIDUO NO TIENE**

EL PODER NEUTRALIZANTE SUFICIENTE! Es decir, las muestras de relave estudiadas son “Inestables Químicamente”; por lo que, al finalizar la operación minera, deberá llevar adelante la “rehabilitación ambiental del sitio de disposición”.

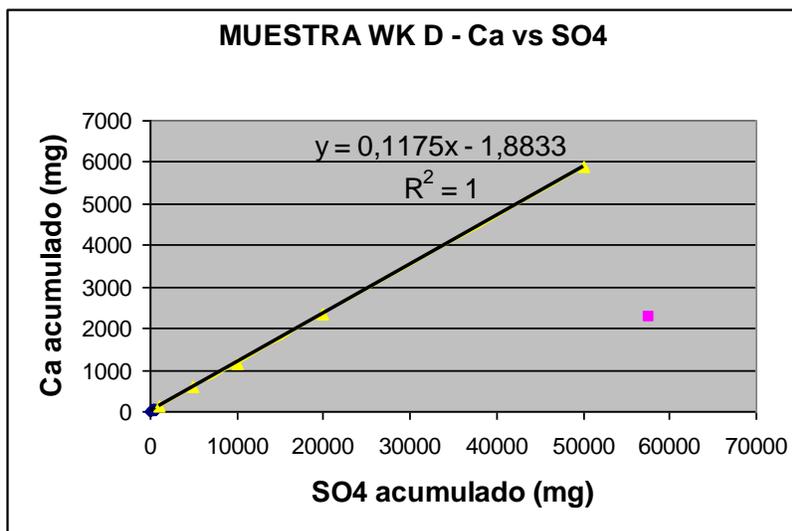


Figura 1.- Proyección de la Correlación entre Ca versus Sulfato acumulados de las Prueba Geoquímica Dinámica de la Muestra M1

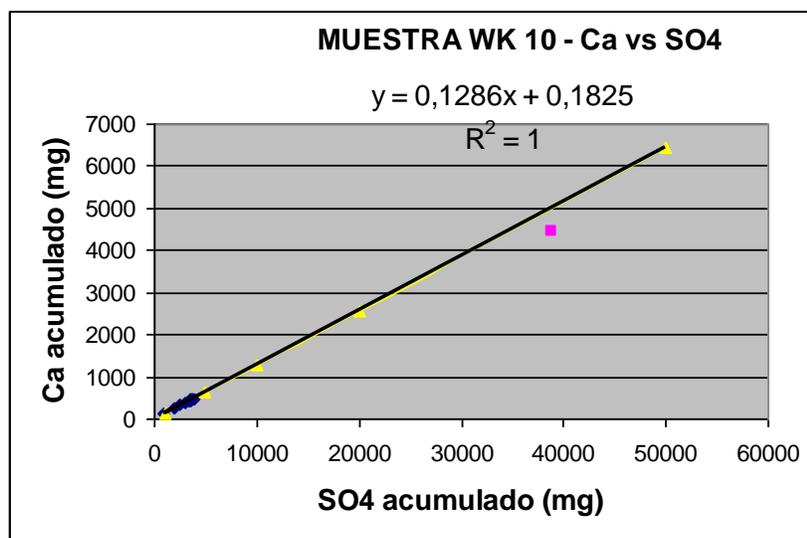


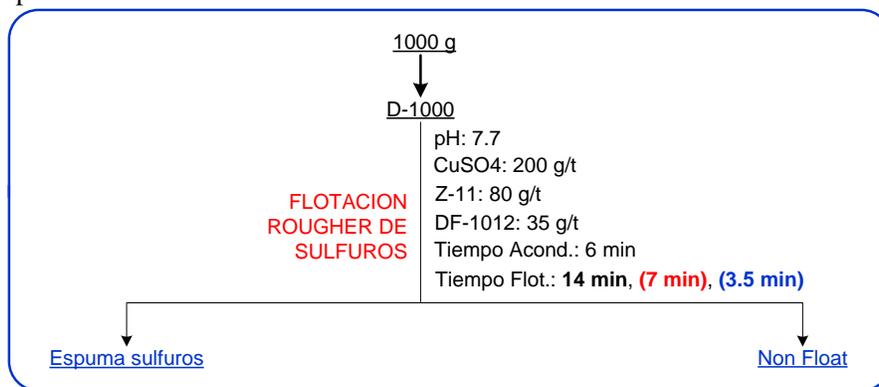
Figura 2.- Proyección de la Correlación entre Ca versus Sulfato acumulados de las Prueba Geoquímica Dinámica de la Muestra M2

3.- ESTUDIO DE LA DESULFURIZACIÓN DE RELAVES DEL PROCESO

El estudio de desulfurización se basa en la eliminación de sulfuros por procesos de flotación de muestras de las colas del proceso metalúrgico a objeto de disminuir su grado de inestabilidad

química o aptitud de generación de DAR; y así, considerar un manejo ambiental de una pequeña fracción como “colas generadoras de acidez (concentrado sulfuroso) que requerirá una disposición final ambientalmente apropiada y con requerimiento de restauración final; y otra fracción mayoritaria, “colas estables químicamente”, para una disposición final sin medidas ambientales costosas y sin un requerimiento posterior de restauración.

La experimentación metalúrgica en sí, se llevó a cabo de acuerdo a las siguientes operaciones unitarias: Secado - Homogeneización, cuarteo y obtención de muestras representativas para las diferentes pruebas de desulfurización por flotación - Pruebas de flotación de acuerdo a las condiciones siguientes:



Los mejores resultados que se alcanzaron en las pruebas de desulfurización por flotación a partir

de la muestra de relaves de descarga del proceso, es resumida en la tabla siguiente:

| Producto | % Peso | % S | % Distrib. De Sulfuro |
|-----------------|--------|-------|-----------------------|
| Espuma sulfuros | 15,75 | 18,14 | 74,18 |
| Non Float | 84,25 | 1,18 | 25,82 |
| Alimentación | 100,00 | 3,85 | 100,00 |

Tabla 5.- Balance Metalúrgico de la prueba de flotación N° 1, a un tiempo de flotación de 14 minutos

Por tanto, a la la misma granulometría de procedencia de las colas es posible disminuir a 1.18% el contenido de sulfuros en el producto non float.

non float” obtenidos después de la flotación bulk de sulfuros realizada a 14, 7 y 3 minutos, respectivamente; y a partir de dichos valores, se ha determinado el Potencial Neto de Neutralización. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.

Posteriormente, se han determinado el Potencial Neutro y el Potencial Ácido de los “productos

| | NNP (kgCaCO3/t) AP Análisis | NP/AP Análisis |
|--------------|-----------------------------|----------------|
| M2 | -108.85 | 0.09 |
| M2 - 14 Min | -28.02 | 0.24 |
| M2 - 7 Min | -31.58 | 0.20 |
| M2 - 3.5 Min | -36.77 | 0.17 |

Tabla 6.- Resultado de la Determinación del Potencial Neto de Neutralización de la Muestra Colas de Descarga y Productos Non Float de la Desulfurización

La evaluación de los resultados obtenidos, de acuerdo a los dos criterios ya anteriormente señalados, muestran que todos los productos “non float” **SON GENERADORES DE DAR.**

Las Pruebas Geoquímicas Dinámicas, con los Productos Non Float de la Desulfurización por Flotación, fueron realizadas en celdas húmedas;

considerando, ciclos de humidificación con una duración de 7 días por ciclo. La Tasa de Generación de DAR, a partir de los valores del pH obtenidos en las soluciones de enjuague, es presentada en la Tabla 7. Estos valores han sido referidos a gramos de H₂SO₄ por tonelada de residuo minero.

| Años | M2 g H ₂ SO ₄ /t | M2 - 14 Min g H ₂ SO ₄ /t | M2 - 7 Min g H ₂ SO ₄ /t | M2 - 3.5 Min g H ₂ SO ₄ /t |
|----------------|---|--|---|---|
| 1 | 19,554 | 0.002 | 0.001 | 0.002 |
| 2 | 0,001 | 0.003 | 0.001 | 0.001 |
| 3 | 0,001 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 4 | 0,002 | 0.005 | 0.004 | 0.004 |
| 5 | 0,003 | 0.012 | 0.010 | 0.012 |
| TOTALES | 19,632 | 0.024 | 0.018 | 0.022 |

Tabla 7.- Tasa de Generación de DAR de los Productos Non Float del proceso de Desulfurización

Para averiguar si, en función del tiempo, la materia básica de los productos non float obtenidos del proceso de desulfurización por flotación, será suficiente para neutralizar la acidez generada a partir de la presencia de sulfuros de la muestra, fue necesario graficar la cantidad de Ca acumulada versus la cantidad de 5, muestran el resultado del procedimiento descrito.

sulfato acumulada de las soluciones de enjuague de los diferentes ciclos. Luego, determinar en la gráfica, el contenido de Ca total inicial presente en la muestra que ha sido sometida a la prueba geoquímica dinámica; además del contenido inicial de azufre total de la muestra inicial, expresado en cantidad de sulfato. Las figura 3 a

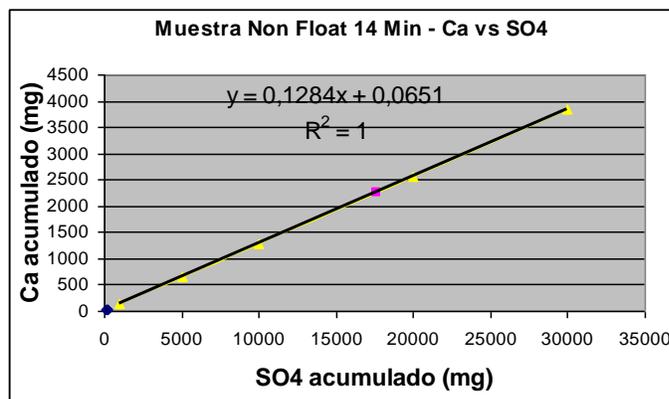


Figura 3.- Proyección de la Correlación entre Ca versus Sulfato acumulados de las Prueba Geoquímica Dinámica de la Muestra del Non Float M2 - 14 Min

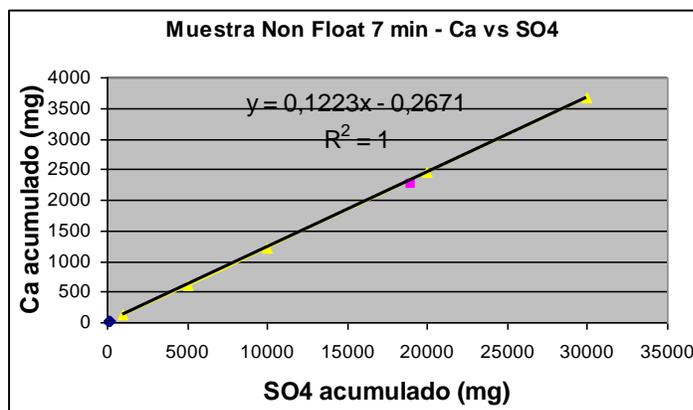


Figura 4.- Proyección de la Correlación entre Ca versus Sulfato acumulados de las Prueba Geoquímica Dinámica de la Muestra del Non Float M2 - 7 Min

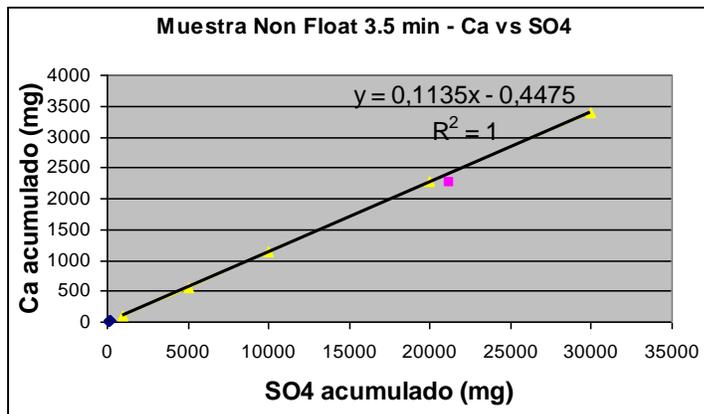


Figura 5.- Proyección de la Correlación entre Ca versus Sulfato acumulados de las Prueba Geoquímica Dinámica de la Muestra del Non Float M2 - 3.5 Min

De las figuras 3 al 5 presentadas, es posible deducir los siguientes aspectos:

- Si bien fue posible, a través de la desulfurización por flotación, la respectiva eliminación de sulfuros, los productos non float obtenidos después de 14, 7 y 3.5 minutos, todavía estos son Residuos Generadores de DAR; puesto que, en todos los casos, el punto de que representa las condiciones iniciales de Calcio y Sulfato en la muestra, se encuentra todavía ubicado en la zona del sulfato; aunque, para el caso del producto non float obtenido mediante una flotación de 14 minutos, esta prácticamente sobre la línea de proyección.
- La desulfurización por flotación de la fracción sulfurosa, genera productos non float que **NO TIENEN EL PODER NEUTRALIZANTE SUFICIENTE!** Es decir, será necesario “mejorar la eliminación de la fracción sulfurosa” mediante una remolienda o una etapa de flotación

Scarenger después de los 14 min de flotación Rougher.

- Por la ubicación del punto en la gráfica, se puede predecir que “no será necesario” llevar adelante una remolienda “muy severa” para mejorar el proceso de desulfurización.

A objeto de llevar adelante una propuesta de manejo ambiental de las colas; se decidió realizar pruebas exploratorias de flotación, sometiendo a **remolienda** la muestra de relaves M2 del proceso.

La muestra fue inicialmente clasificada en malla tyler -150; y el sobretamaño, se llevó a remolienda hasta que toda la muestra pase dicha malla. La muestra así preparada, fue sometida a flotación, manteniendo las condiciones de operación y consumo de reactivos de la flotación de sulfuros llevada a cabo en tamaño original y durante 14 minutos. El resultado de esta prueba; y a manera de balance metalúrgico, se presenta a continuación:

| Producto | % Peso | % S | % Dist. S |
|------------------|--------|-------|-----------|
| Espuma sulfuros | 17.22 | 17.07 | 79.66 |
| Non Float | 82.78 | 0.89 | 20.04 |
| Cabeza calculada | 100.00 | 3.68 | 100.00 |

Tabla 8.- Balance Metalúrgico de la Desulfurización por Flotación de la Muestra de Relave de Descarga, previamente remolida a -150 Mallas Tyler

A partir de los resultados obtenidos en la prueba de desulfurización por flotación con la muestra de -150 mallas tyler, se realizó la prueba

geoquímica estáticas. El resultado de dichas prueba se presenta a continuación:

| | NNP (kgCaCO3/t) AP Análisis | NP/AP Análisis |
|-----------|-----------------------------------|-------------------|
| M2 | -108.85 | 0.09 |
| M2 -150 M | -13.46 | 0.51 |

Tabla 9.- Resultados de las Pruebas Geoquímicas Estáticas del Relave de Descarga y de los Productos Non Float de la Desulfurización con remolienda a -150 y -200 Mallas por Flotación

Aplicando los criterios de clasificación de los residuos mineros, se tiene que los productos non float obtenidos se encuentran en valores de Potencial Neto de Neutralización entre - 20 Kg CaCO₃/ton y + 20 Kg CaCO₃/ton de residuo minero (primer criterio) o la relación de Es decir, es necesario realizar una Prueba Geoquímica Dinámica para precisar si el Residuo Minero es o no generador de DAR.

Potencial Neutro/Potencial Ácido entre menor a 1 y mayor 1 (segundo criterio); por tanto, los residuos en cuestión se encuentran en la **ZONA DE INCERTIDUMBRE EN CUANTO A LA GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE ROCA.**

Los resultados de la prueba geoquímica dinámica realizada, son resumidos en la gráfica calcio acumulado versus sulfato acumulado que se presenta a continuación:

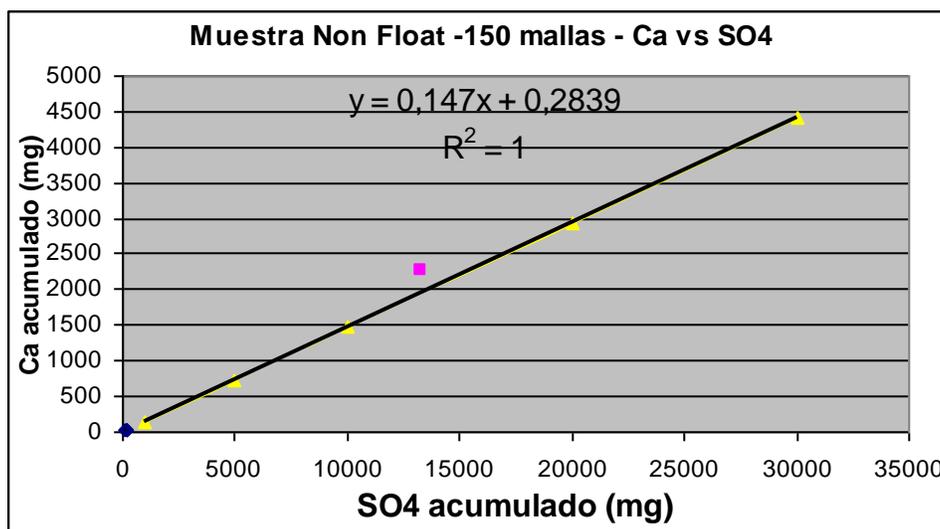


Figura 6.- Proyección de la Correlación entre Ca versus Sulfato acumulados de las Prueba Geoquímica Dinámica de la Muestra de Cola de Descarga, previamente remolida a -150 Mallas Tyler

De la figura 6 presentada, es posible deducir los siguientes aspectos:

- A través de la desulfurización por flotación de la muestra de colas de descarga sometida a remolienda a -150 mallas tyler, es posible la obtención de un producto non float **NO GENERADOR DE DAR**; puesto que, el

punto de que representa las condiciones iniciales de Calcio y Sulfato en la muestra, se encuentra ubicado en la zona del calcio.

- La desulfurización por flotación de la fracción sulfurosa, con remolienda a -150 mallas tyler, genera un producto non float que **TIENE EL PODER NEUTRALIZANTE SUFICIENTE.**

Es decir, se trata de un residuo minero “Estable Químicamente”.

- Por la ubicación del punto en la gráfica, se puede predecir que “no será necesario” considerar medidas de alto costo en la etapa de rehabilitación del Cierre.

4.- CONCLUSIONES DEL ESTUDIO DE DESULFURI-ZACIÓN DE RELAVES DEL PROCESO

- La desulfurización por flotación de la fracción sulfurosa, genera productos non float que **NO TIENEN EL PODER NEUTRALIZANTE SUFICIENTE!**. Es decir, será necesario “mejorar la eliminación de la fracción sulfurosa” mediante una remolienda o una etapa de flotación Scarenger después de los 14 min de flotación Rougher.
 - El llevar adelante la remolienda de las colas de descarga a -150 mallas tyler, permitiría obtener una fracción que representa cerca del 82% en peso; misma que, es **estable**
3. Benzaazoua Mostafa. Curso sobre “Gestión Ambiental Minera”- Módulo II – Drenaje. Ácido de Roca. UTO-REFORMIN. (Mayo 2002)
 4. Zamora G. y Benzaazoua M. Predicción de DAR por Test Geoquímicos Estáticos y Dinámicos. Revista Metalúrgica N° 23 (Noviembre 2002)
 5. Módulo II – Drenaje Ácido de Roca. UTO-REFORMIN. (Mayo 2006)

químicamente y por tanto “**no requeriría**” medidas ambientales complicadas en la etapa de rehabilitación del sitio de disposición.

- La fracción sulfurosa, que representa cerca del 18% en peso, podría ser dispuesta en un área menor de disposición; que en la etapa de cierre, requerirá medidas ambientales de rehabilitación.

5. Referencias Bibliográficas

1. Kim A. Lapakko - Evaluation of neutralization potential determination for metal mine waste and proposed alternative. In Third International Conference on Acid Rock Drainage (1994)
2. S. Miler, A. Roberston and T. Donahue - Advances in acid drainage prediction using the net acid generating test. Enviromental Geochemistry International (2001)
6. ASTM Standart test meted for accelerated weathering of solid materials using a modified humity cell. 5744-96
7. Acid Rock Drainage Prediction Manual – CANMET - MSL DIVISON. Departament of Energy, Mines and Resources, Canada (MEND Project. 1.16.1 (1999)