

Recibido: 25 / 11 / 2007, aceptado en versión final: 19 / 12 / 2007

## Los residuos sólidos mineros del proceso de flotación de minerales en la cuenca del río Santa – Áncash

THE MINING SOLID RESIDUALS OF THE PROCESS OF FLOTATION OF MINERALS IN THE BASIN OF THE RÍO SANTA - ANCASH

**Alfonso A. Romero<sup>1\*</sup>, Rosa Medina<sup>2\*</sup>, Luis Puente<sup>\*</sup>, Silvana L. Flores<sup>\*\*</sup>, Enrique Guadalupe<sup>\*</sup>, Estanislao de La Cruz<sup>\*</sup>, Víctor Ramírez<sup>\*</sup>.**

### RESUMEN

En el Perú se viene trabajando en materia de residuos sólidos mineros del proceso de flotación de minerales desde el año 2000, donde el ministerio de energía y minas comienza a realizar el inventario de los pasivos ambientales mineros relacionados con las labores mineras abandonadas donde se involucra a las aguas ácidas, botaderos, bocaminas y relaves mineros, respectivamente; llegando al final a elaborar la ley 28271, ley de regulación de los pasivos ambientales de la actividad minera, promulgada el 2 de julio del 2004.

En la cuenca del río Santa se ha realizado el inventario de 153 pasivos ambientales mineros, llegando a la conclusión de la urgencia de realizar estudios de investigación para controlar la alarmante contaminación del medio físico en esta cuenca.

El proyecto al finalizar establece los parámetros técnicos preliminares a nivel piloto en relación a la caracterización granulométrica y mineralógica del relave minero de Ticapampa recomendando utilizar como material primario y agregado en la construcción de pavimentos y el diseño de bloquetas.

Se han realizado pruebas preliminares de procesos para establecer los parámetros físicos, químicos, mecánicos y mineralógicos para establecer la metodología de caracterización del relave minero abandonado de Ticapampa donde se ve también la existencia de elementos útiles, esta caracterización definirá al relave como materia prima o insumo para otro uso y como tal permitirá prevenir, controlar, mitigar, remediar las zonas afectadas y eliminar los residuos sólidos mineros. Al reutilizar estos residuos sólidos, en el lugar geográfico actual se proporcionará un medio físico de calidad ambiental, sin alteraciones a la cadena trófica del ciclo de vida del hombre en zonas donde se encuentran estos pasivos. Por mencionar un ejemplo, sólo en Perú, existen aproximadamente más de un billón de metros cúbicos de estos residuos sólidos, los mismos que han afectado durante décadas el entorno físico del territorio peruano en forma alarmante.

**Palabras clave:** Caracterización de relaves mineros, granulometría de relaves, riesgos ambientales e impacto negativo visual.

### ABSTRACT

In Peru has been working in the field of solid waste from mining ore flotation process since 2000, where the ministry of mines and energy starts to conduct the inventory of environmental liabilities associated with abandoned mining operating places which involves acidic water, dumps, and tailings, mining tunnel respectively, nearing the end to develop the 28,271 law, law regulating the environmental liabilities of mining activity enacted in July 02, 2004.

In the Santa River basin has compiled the inventory of 153 miners environmental liabilities, concluding the urgency of conducting research to help control the alarming pollution of the physical environment in this basin.

1 \* Docentes de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

2 \* Egresada de la Maestría de Metalurgia de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

E-mail: aromerob@unmsm.edu.pe

This paper at the end provides technical parameters preliminary pilot level in relation to the grading and mineralogical characterization of mining waste Ticapampa of recommending use as primary material and added in the construction of pavements and tiles design.

There have been preliminary evidence of processes to establish the parameters of physical, chemical, mechanical and mineralogy to establish the methodology of mining waste characterization abandoned Ticapampa which is also the existence of useful elements, this characterization to define "relave" as raw material or input for other uses and as such would prevent, monitor, mitigate, remediate the affected areas and remove solid waste miners. By reusing these solid waste in the current geographical location will provide a physical environment of environmental quality, with no alterations to the food chain life cycle of man in areas where there are these liabilities. For mention one example, in Peru alone, there are approximately over one trillion cubic meters of solid waste these the same as, for decades have affected the physical environment of Peruvian territory at an alarming rate.

**Keywords:** Characterized mine tailings, Granulometry tailings, environmental hazards and negative visual impact

## I. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones permiten establecer en el futuro la reutilización de los pasivos mineros ambientales para el caso específico de Ticapampa, que proviene de una minería subterránea y polimetálica y al igual que este residuo, existen muchos en el país con características similares.

La orientación de las pruebas y ensayos que se realizaron, apuntan a la reutilización más viable de los residuos del pasivo ambiental minero de Ticapampa en la construcción de pavimentos como agregados una vez que se realice la fijación de los metales pesados con el silicato tricálcico y dicálcico.

De esta forma el presente artículo pretende proponer un proyecto ambicioso para controlar y eliminar los pasivos ambientales mineros en forma secuencial en un mediano y largo plazo con la alternativa de uso de estos materiales que se encuentran en muchos lugares del país. Esto proporcionará un medio físico de calidad, sin alteraciones a la cadena trófica del ciclo de vida del hombre en zonas donde se encuentran estos pasivos.

Establecer un marco técnico para formular las alternativas viables de reutilización de pasivos ambientales mineros como materiales de insumo, dando origen a materia prima en la construcción de pavimentos, así como la fabricación de bloquetas, esto solucionará los problemas comunes por presencia de pasivos ambientales mineros en el medio físico circundante a su ubicación.

Aumentar el desarrollo científico-tecnológico en materia de reutilización de pasivos ambientales mineros del país donde el problema por presencia de los pasivos ambientales mineros es incontrolable a la fecha.

Obtener como producto físico el modelo prototipo de las bloquetas a partir de relave y un aglomerante.

## II. FUNDAMENTO DE LA METODOLOGÍA

**Hidratación del aglomerante:** Cuando se mezcla el silicato dicálcico o tricálcico con H<sub>2</sub>O los silicatos y aluminatos se hidratan, dando lugar a una masa rígida y clara, conocida con el nombre de mortero endurecido. Existen dos teorías de hidratación: la de Chatelier, y la Micaselis (Culliname, 1986; W. Jones 1986; US EPA 1986).

La primera está admitida para la hidratación de fases intersticiales y la formación de Portlandita, mientras hay controversias sobre sus aplicaciones el caso de silicatos. Según esta teoría los granos anhidros, al contacto con el H<sub>2</sub>O, pasan a solución cuando todos los elementos necesarios para la formación del hidrato correspondiente estén en ella, hay una sobresaturación con relación a la débil solubilidad de este hidrato. Al contacto con una impureza o espontáneamente mediante un fenómeno de enucleación, el hidrato se cristaliza en el seno de la solución, con ello éste se empobrece y los constituyentes anhidros pueden pasar de nuevo a solución, y así, sucesivamente, hasta la consumación de las fases anhidras.

Por su parte, la teoría de Micaselis denominada teoría coloidal está considerada para la hidratación de los silicatos de calcio. Cuando se forma un cristal de C<sub>2</sub>S y está en contacto con el H<sub>2</sub>O, se forma inmediatamente alrededor de este grano, una capa de hidratos primarios más pobres en cal que el C<sub>2</sub>S. Al alcanzarse el límite crítico de solubilidad de la Portlandita, ésta precipita y la solución se empobrece en calcio (Philip L., Buckingham 1998).

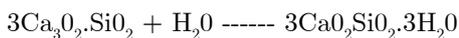
Ambas teorías coinciden en la disolución de aluminatos y silicatos, no así en el papel de la sílice. Para Le Chatelier se disuelve formando un hidrato con el calcio, mientras que para Micaselis la sílice se queda en el grano, ya que es insoluble en una solución de cal.

Dos factores influyen decididamente en la velocidad de hidratación: La finura de las partículas y la temperatura, puesto que la reacción tiene lugar a través de las superficies en contacto con la solución una mayor finura del cemento y, por tanto, un aumento en la superficie específica, tiende a acelerar la hidratación.

En contacto a la temperatura, también acelera dichos procesos (p.e. a 5° C las reacciones son extremadamente lentas). Durante la hidratación el volumen de la pasta permanece constante, mientras que el de los sólidos aumenta, dando lugar a una disminución de la porosidad del conjunto, lo que se traduce en un aumento de las resistencias mecánicas de la parte endurecida. En este proceso es necesario que haya suficiente H<sub>2</sub>O, para que tenga lugar de forma adecuada las reacciones. Esto se consigue cuando la relación agua/aglomerante es igual en el orden de 0.4 en peso.

### Comportamiento químico del cemento

Es básicamente, una combinación de óxido de calcio, dióxido de silicio, tritóxido de aluminio y óxido férrico (Dragun James. 1988).



## III. ACTIVIDADES REALIZADAS

### MUESTREO

El diseño de la toma de muestras en la zona donde se encuentra el relave minero, se procedió en el mismo lugar, teniendo en cuenta que el depósito tiene una extensión aproximada de 950 m x 120 m con una altura de 20 m, haciendo un total de 2280000 m<sup>3</sup>. de volumen, al cual si aplicamos una densidad de 3 t/m<sup>3</sup>, estimamos la existencia de 4 millones de toneladas de residuo sólido minero en todo el depósito de Ticapampa.

Por la extensión del relave a muestrear se consideró una malla imaginaria de 50 x 10 m. logrando sacar muestras representativas de los rectángulos imaginarios en una cantidad de 40 kilos, el mismo que se trasladó a la ciudad de Lima, para su respectivo estudio.

Para realizar esta actividad se ha programado un viaje de campo, es decir, a la zona de Tica pampa, lugar que se encuentra en el departamento de Áncash en la provincia de Recuay, hoy denominado Región Chavín, según el cuadro siguiente:

Actividades de campo:

Día 1: Reconocimiento del terreno.

Día 2: Levantamiento topográfico con GPS.

Día 3: Diseño de muestreo in situ.

Día 4: Toma de muestras.

Día 5: Selección de muestra.

Día 6: Retorno a la ciudad de Lima.

### ELABORACIÓN DE PROBETAS DE ENSAYO

Se procedió a la elaboración de varias probetas a partir de las muestras representativas del relave que se trasladó a Lima (más detalles se encuentran en páginas continuas de este informe).

### MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO INICIAL

Se preparó una muestra de la probeta con 100 g de relave, 16 g de cemento y 30 cc de agua, el mismo que se ha enviado al laboratorio de microscopía electrónica de la Escuela de Geología, cuyos resultados se ven más adelante.

## IV. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Como podemos observar, este artículo plantea el estudio preliminar de alternativas de uso de estos pasivos ambientales mineros, cuyos resultados se observan más adelante. Debido al origen de los pasivos ambientales mineros en la mayoría de los países, que en su época de extracción no tenían las leyes ambientales vigentes, el estudio también está orientado a aquellos pasivos ambientales mineros que se originaron antes de la existencia de estas leyes y normas legales.

El proyecto tiene varias etapas, éste es una etapa preliminar, debido a su gran alcance, pues esto no excluye a la investigación de activos ambientales mineros que hoy existen y que las compañías en actividad tienen la obligación de cumplirlas para minimizar la generación de residuos, esto implica que las compañías mineras estén interesadas en proyectos como las que proponemos, además de los organismos públicos como los ministerios del sector extractivo o del medio ambiente de cada país.

Los residuos sólidos mineros producidos por la industria minera con anterioridad a las leyes vigentes, son problemas nacionales de cada país y actualmente los gobiernos de cada país lo están asumiendo pero con mucha lentitud, por falta de recurso humano y "Know How" o experiencia en esta materia de reutilización de pasivos ambientales mineros específicamente en la reutilización como materiales primarios de estos pasivos ambientales mineros que pensamos que es una buena alternativa de reuso.

**V. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA**

**ANÁLISIS QUÍMICO**

Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	
ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	
55.2	6.41	8178	180	0.8	11	

Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	
%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%
1.11	0.01	4	13	248	2.74	

Ga	K	La	Mg	Mn	Mo	
ppm	%	ppm	%	ppm	ppm	
16	2.75	7.5	0.4	1284	1	

Na	Ni	P	Pb	S	Sb
%	ppm	%	ppm	%	ppm
0.31	2	0.02	4824	1.9	348

Sc	Sn	Sr	Ti	Tl	V	
ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	
8	15	49	0.13	1	102	

W	Y	Zn	Zr	
ppm	ppm	ppm	ppm	
32	2.9	2170	32.8	

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

- Se deslamó mediante cal peróxido de hidrógeno.
- Se tamizó de 50 m a 100 m para tener una muestra homogénea representativa
- Luego se pesó 200 gr, tamizándose a (70, 100, 150, 200,325) por minutos obteniéndose la siguiente tabla:

Malla	Peso (gr)	% Peso	% acumulado Retenido	% acumulado Pasante
+ 70	74.2	37,4	37,4	62,6
+150	66,2	33,4	70,8	22,2
+ 200	29,2	14,7	85,5	14,5
+ 325	13,4	6,8	92,3	7,7
- 325	15,2	7,7	100	0,0

**DISEÑO DE PROBETAS DE ENSAYO**

Para la elaboración de las probetas de ensayo, luego del muestreo en campo (in situ), se realizo otro diseño de muestra representativa de la muestra de campo adquirido, para el cual se aplico el muestreo por bloques de la muestra de 40 kilos que se trajo de la salida al campo, luego se envió al proceso de deslamado y análisis granulométrico y con el relave de malla +150 se procedió a construir varias probetas con las concentraciones siguientes:

- Probeta 1: relave 100g.  
 Agua 30 cc.  
 Mortero 10g.  
 Malla +150
- Probeta 2: Relave 100g  
 Agua 40 cc.  
 Mortero 12g  
 Malla +150
- Probeta 3: Relave 100g  
 Agua 50 cc.  
 Mortero 14g  
 Malla +150
- Probeta 4: Relave 100g.  
 Agua 60 cc.  
 Mortero 16g.  
 Malla +150

Debido al alcance del costo del análisis químico ICP y el análisis de microscopia electrónica, se realizó el análisis y discusión de la Probeta 1; es por esto que los resultados que damos en este informe, se consideran como preliminares.

**MICROSCOPIA ELECTRÓNICA**

**Análisis microscópico:**

Fotografía del microscopio electrónico de la muestra en estudio.

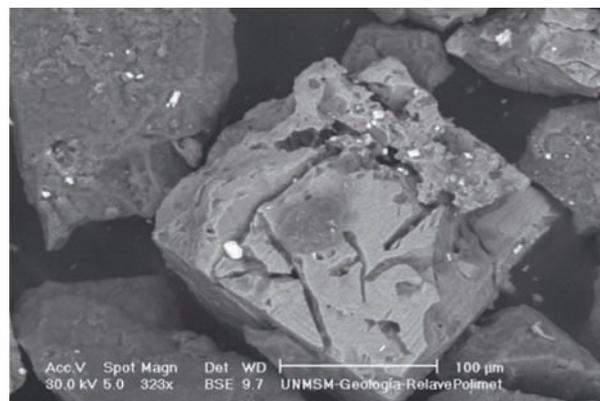


Foto 1. Probeta 1.

La Foto 1 nos muestra los sulfuros- hierro presentes en la estructura del relave, y en la Foto 2 se puede observar el sulfuro de plomo, la galena está rodeada de estructuras de silicio que se aprecia como una especie de cuarzo que están rodeando al metal pesado. este análisis se hizo para malla es +150. Para ambas fotos.

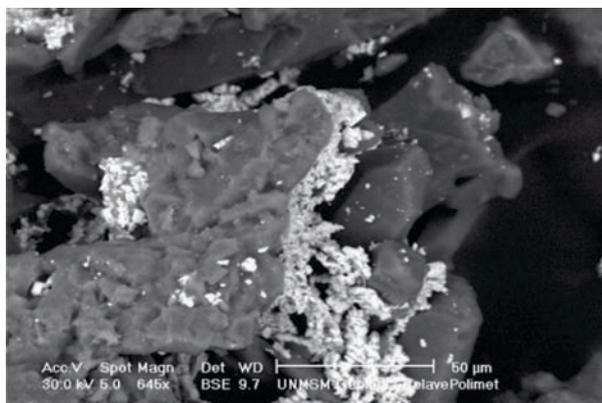


Foto 2. Probeta 2.

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Determinación de fijación

Para estudios de esta naturaleza, solo nos ha permitido realizar los estudios microscópicos de una sola muestra cuyas características son:

Relave:	100 g
Agua	30 cc
Cemento	16 g
Malla	+150

De las imágenes del microscopio electrónico, inicialmente podemos afirmar, que sí es posible encapsular los elementos pesados; para el caso concreto de plomo (véase Foto 2) y para el caso del sulfuro de hierro (véase Foto 1).

Esto nos demuestra que al igual que estos metales pesados, hierro y plomo, si realizamos más pruebas para los metales como el cobre, zinc y cromo, los resultados serán similares.

### Análisis parámetros físicos

Podemos establecer en forma preliminar que, existe indicios de una cohesión y recristalización en una estructura micro cristalina del silicato di y tricálcico del cemento que en presencia del agua, produce fijación por aglomeración de los metales pesados. Es necesario realizar más ensayos con diferentes variables para establecer con claridad los parámetros físicos, químicos, etc. de este fenómeno; creemos que con una sola prueba, no es posible determinar los parámetros enunciados de las nuevas composiciones.

## VII. POSIBLES USOS

### En Bloquetas

Posteriores investigaciones, pueden ofrecer mejores resultados y de esta forma poder establecer como hemos indicado, un prototipo de bloquetas.

### En agregados Calcáreos

Para el uso como agregado, se ha probado que únicamente debe disminuirse la cantidad de cemento con la finalidad de dar el carácter deleznable del relave y considerarse como una posibilidad de uso preliminar y utilizarse como agregado en la construcción de pavimentos, sin embargo aseveramos que este debe obedecer a estudios con más muestras para que garantice nuestra afirmación.

## VIII. CONCLUSIONES

1. Si bien es cierto que por medio de alternativas técnicas de punta y la I+D en materiales se puede fijar los metales pesados como el Pb y Fe, es necesario más ensayos, tanto para estos mismos metales como para el cobre y cromo así como para el zinc, esto permitirá poder establecer las condiciones ideales físicas, químicas, mecánica de activación y mineralógica de cada uno de ellos, para la estabilización (%), fijación y encapsulamiento de metales pesados como hidróxido y silicato por hidratación para lo cual recomendamos realizar posteriores estudios y continuar en esta línea de investigación.
2. Para garantizar la fijación y posterior encapsulamiento permanente en el tiempo y no generar contaminación posterior en las bloquetas y pavimentos, es necesario hacer un estudio de monitoreo ambiental específicamente en la superficie de los componentes diseñados en un periodo de tiempo razonable.
3. Los resultados que entrega este proyecto son de nivel preliminar con respecto a la caracterización y desarrollo de variables % de consistencia, uso de cal, T partícula, etc.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Culliname, M. J., W. Jones, y P. G. Malone. (1986). *Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Waste*: US EPA.
- [2] Dragun, James1 (1988). *The Soil Chemistry Of Hazardous Materials*. Hazardous Materials Control Research Institute: Washington D.C.
- [3] Philip L. Buckingham. (1988) *Gestión de Residuos Tóxicos*. Mc. Graw Hill: Madrid, España.