

CONCENTRACION DE CINC Y PLOMO  
DE UN MINERAL



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

CONCENTRACION DE CINC Y PLOMO  
DE UN MINERAL

ERVIN ORLANDO MONDAL CHEW

Trabajo de investigación presentado para optar  
al grado académico de Ingeniero Químico

Guatemala

1989

Vo. Bo.


(f)



-----  
Ing. Mariano Eskenasy García  
Asesor

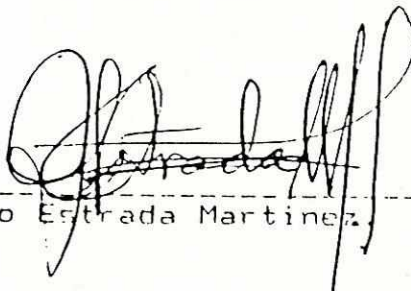
Tribunal

(f)



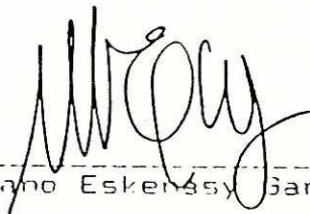
-----  
Ing. Oscar Gil Girón.

(f)



-----  
Ing. Arturo Estrada Martínez.

(f)



-----  
Ing. Mariano Eskenasy García

Septiembre 1989

## PREFACIO

La investigación de laboratorio fue efectuada con la colaboración de la compañía American Cyanamid. Todos los reactivos de flotación empleados fueron proporcionados por dicha compañía, es por eso, que, al referirme a ellos lo hago a través de sus nombres comerciales y no químicos. Se da una breve descripción de los reactivos pero no su composición química exacta.

## CONTENIDO .

Página

|      |   |    |
|------|---|----|
|      | PREFACIO  |    |
|      | RESUMEN   |    |
| I.   | INTRODUCCION  |    |
| II.  | ANTECEDENTES  |    |
|      | A. Usos y aplicaciones de los metales<br>Plomo y Cinc                                       | 2  |
|      | B. Historia minera de Guatemala   | 3  |
|      | C. Mineral de estudio   |    |
|      | 1. Mina Caquipec  | 5  |
|      | 2. Origen de Colas  | 6  |
| III. | PRINCIPIOS GENERALES DE LOS PROCESOS DE SEPARACION Y/O CONCENTRACION DE MINERALES EN HUMEDO |    |
|      | A. Concentración por gravedad   | 8  |
|      | 1. Mezclas de mineral susceptible<br>a separación por gravedad                              | 8  |
|      | 2. Principios de suspensión para<br>concentración por gravedad                              | 9  |
|      | 3. Materiales para suspender  | 9  |
|      | 4. Agitación  | 10 |
|      | B. El proceso de flotación  | 11 |
|      | 1. Mecanismos   | 11 |
|      | 2. Flotación Diferencial  | 13 |
|      | 3. Agentes de Flotación   | 13 |

|  | Página |
|--|--------|
| C. Eliminación de Agua                               | 20     |
| IV. TRABAJO EXPERIMENTAL                             |        |
| A. Procedimiento                                     |        |
| 1. Composición Química de las Colas                  |        |
| 1.1 Métodos de Análisis                              |        |
| a) Determinación de Plomo                            | 22     |
| b) Método de rutina para la<br>determinación de Cinc | 22     |
| c) Determinación de Insoluble                        | 23     |
| b) Determinación de otros<br>Compuestos              | 23     |
| 2. Separación por tamaño de partículas               | 23     |
| 3. Deslamado   | 23     |
| 4. Flotación   | 24     |
| 5. Descripción de Reactivos de Flotación<br>usados   | 26     |
| B. Resultados  |        |
| 1. Composición Química de las Colas                  | 27     |
| 2. Separación por Tamaño de Partícula                | 28     |
| 3. Deslamado   | 31     |
| 4. Flotación   | 35     |
| C. Discusión   |        |
| 1. Composición Química de Colas                      | 43     |
| 2. Separación por Tamaño de Partícula                | 43     |
| 3. Deslamado   | 43     |
| 4. Flotación   | 45     |

|      |   |    |
|------|---|----|
| V.   | CONCLUSIONES  |    |
| VI.  | RECOMENDACIONES   |    |
| VII. | BIBLIOGRAFIA  |    |
|      | APENDICE  |    |
|      | A. Equipo usado en procesos de separación<br>y/o concentración de minerales en húmedo |    |
|      | 1. Tanques de limo  | 54 |
|      | 2. Clasificador de lavado   | 57 |
|      | 3. Máquinas de flotación  | 59 |
|      | 4. Sedimentadores o espesadores   | 64 |
|      | B. Detalle de análisis químico de colas   | 69 |
|      | C. Descripción de compuestos minerales  | 79 |

LISTA DE TABLAS

| Tabla  |   | Página |
|--------|---|--------|
| 1      | Clasificación Reactivos de Flotación                                  | 15     |
| 2 - 3  | Composición de Colas sin Tratamiento                                  | 27     |
| 4-5-6  | Distribución en peso por tamaño de Partícula de Colas sin Tratamiento | 28     |
| 7 - 8  | Resultados de Pruebas de Deslame                                      | 31     |
| 9 - 10 | Composición de Colas Deslamadas                                       | 33     |
| 11     | Resultados Pruebas de Flotación Proceso No.1 Parte A                  | 35     |
| 12     | Resultados Pruebas de Flotación Proceso No. 1 Parte B                 | 37     |
| 13     | Resultados Pruebas de Flotación Proceso No. 2 Parte A                 | 39     |
| 14     | Resultados Pruebas de Flotación Proceso No. 2 Parte B                 | 41     |
| 15     | Concentraciones y Recuperaciones obtenidas en Proceso No. 1           | 46     |
| 16     | Concentraciones y Recuperaciones obtenidas en Proceso No. 2           | 48     |
| 17     | Comparación de Procesos   | 49     |
| 18     | Capacidades de Celdas Comerciales de Flotación                        | 64     |

## LISTA DE FIGURAS

| Figura |   | Pagina |
|--------|---|--------|
| 1      | Superficie de Contacto: Burbuja de Aire-Mineral                               | 14     |
| 2      | Concentraci3n de Espumante en interfase Aire-Líquido                          | 17     |
| 3      | Concentraci3n de Plomo y Cinc por Tamaño de Partícula                         | 30     |
| 4      | Concentraci3n de Plomo y Cinc vrs. Tiempo de Flotacion. Proceso No. 1 Parte A | 36     |
| 5      | Concentraci3n de Plomo y Cinc vrs. Tiempo de Flotaci3n. Proceso No. 1 Parte B | 38     |
| 6      | Concentraci3n de Plomo y Cinc vrs. Tiempo de Flotaci3n. Proceso No. 2 Parte A | 40     |
| 7      | Concentraci3n de Plomo y Cinc vrs. Tiempo de Flotaci3n. Proceso No. 2 Parte B | 42     |
| 8      | Clasificador de Corriente Superficial   | 55     |
| 9      | Deslamador - Tanque Callow  | 56     |
| 10     | Clasificador de Lavado Tanque de Inclinaci3n                                  | 58     |
| 11     | Máquina de Flotaci3n para Laboratorio Fagergren                               | 61     |
| 12     | Máquina de Flotaci3n para Laboratorio D-R Denver                              | 62     |
| 13     | Máquina de Flotacion para Laboratorio Agitair                                 | 63     |
| 14     | Sedimentaci3n de una Pulpa Delgada  | 66     |
| 15     | Sedimentaci3n de una Pulpa Gruesa   | 66     |
| 16     | Zonas de Sedimentaci3n  | 67     |
| 17     | Descripci3n de los Principales Compuestos Minerales en las Colas Deslamadas   | 82     |

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es proporcionar las bases técnicas necesarias para la concentración industrial de Plomo y Cinc de las Colas de Flotación existentes en la mina Caquipec. La investigación se hizo en base a los métodos más comunes de separación y/o concentración utilizados en minería.

Los análisis químicos en base seca determinaron que las Colas existentes poseen 4.11% de Plomo y 26.23% de Cinc en forma de carbonatos y sulfuros. El tamizaje con malla 48 eleva la concentración de Plomo a 4.20% y la de Cinc a 27.65%, reteniendo la malla un 15.4% de mineral.

Las pruebas de deslame se realizaron con una densidad de pulpa de 66% de sólidos. El mejor resultado fue obtenido con una agitación de 400 rpm y un flujo de 0.25 l/min con un tiempo de 10 min en un equipo de Flotación Fagergren (ver apéndice A). La concentración de Plomo subió a 5.75% y la de Cinc a 34.24%, perdiéndose 25.3% de mineral con respecto al proceso anterior y de 37.5% de las colas originales.

Se efectuaron dos procesos de Flotación diferentes. En el primero se separó los compuestos de Plomo y Cinc de los otros existentes y luego se separaron estos dos; en el segundo, primero se concentró el Plomo y luego el Cinc. El proceso # 1 dió los siguientes resultados: concentración de Plomo 67.94%, recuperación 61.46%; concentración de Cinc 49.84%, recuperación 78.21%. En el proceso # 2: concentración de Plomo 57.60%, recuperación 70.80%; concentración de Cinc 49.64%, recuperación 91.23%. Cualquier decisión debe hacerse en base a un estudio de factibilidad económica, presentado aparte como complemento de éste.

## I. INTRODUCCION

El trabajo de graduación que se presenta a continuación, es la primera, de una investigación dividida en dos partes y realizada para la Compañía Minera de Guatemala, S.A.

El presente estudio consiste, principalmente, de una investigación de laboratorio sobre la concentración de Cinc y Plomo. Estos elementos se encuentran, mayormente, en un mineral en forma de compuestos carbonatados, Carbonato de Cinc y Carbonato de Plomo, que, además, posee Carbonato de Calcio, Carbonato de Magnesio, compuestos silíceos como cuarzo, y algunos otros óxidos en proporciones significativas.

El mineral consiste en las "colas" de flotación que se encuentran en la mina CAQUIPEC en San Juan Chamelco, Alta Verapaz; como resultado de un tratamiento anterior de un mineral sulfurado.

Además, el presente trabajo persigue servir como material de estudio sobre ciertos procesos de separación o concentración que pueden ser de mucha utilidad en el área de manejo de sólidos.

La segunda parte de esta investigación, que no se presenta aquí, consiste en un estudio complementario sobre la forma económicamente factible de comercializar el mineral analizado.

## II. ANTECEDENTES

### A. Usos y aplicaciones de los metales Plomo y Cinc

Los minerales Cinc y Plomo tienen una considerable importancia en la economía del mundo y, usualmente, se encuentran juntos en la naturaleza. Ocasionalmente, uno de esos metales es encontrado, en cantidades económicas, en un yacimiento en el cual el otro está como constituyente menor. Los usuales yacimientos contienen galena y esfalerita, llevando cantidades importantes de plata. Cantidades menores de cobre no son raras y usualmente son acompañados por cantidades pequeñas de oro; pirita y pirrotita son comúnmente asociados; carbonatos y cuarzo son lo más usual de ganga mineral o en formaciones de roca, pero hay un sin número de otras gangas asociadas. (12)

#### 1. Plomo.

Usos: El principal consumo de plomo es a través del metal y el peróxido en acumuladores, como metal en coberturas de cable, y como plomo blanco ( $x \text{PbCO}_3$ . y  $\text{Pb(OH)}_2$ ) en pintura. El metal, tomando en cuenta sus propiedades no corrosivas, también encuentra amplio uso en edificios: tuberías, selladores, etc. El considerable plomo metálico es utilizado en la manufactura de municiones. También es importante en la mezcla de soldaduras, utensilios de peltre y en la manufactura de metales de baja fusión.

Minerales: Los minerales económicos son: galena, cerusita, anglesita, y la peromorfita. La galena está comprendida en la gran mayoría de minerales. Existen tres clases en general:

- a) aquellos que contienen únicamente plomo como un metal económico;
- b) minerales plomo-cinc; y
- c) minerales plomo-plata

Calcita, dolomita y pirita son los minerales más comunes en las dos primeras clases, y cuarzo en la tercera clase. (12)

## 2. Cinc.

Usos: Los más importantes del cinc se encuentran en el recubrimiento de hierro para protegerlo en contra de la corrosión (galvanizado); en la manufactura del cobre, latón (cinc 10 a 50% de Cinc más pequeñas cantidades de estaño), plomo y hierro; como un constituyente de otras mezclas tales como la plata alemana (cobre, níquel, cinc) y el metal blanco (cobre y cinc); en el pigmento cinc-blanco, como un polo positivo en baterías eléctricas, cepillos de cinc, utensilios domésticos, etc., donde la resistencia a la corrosión por aire y agua es deseable.

Minerales: Los minerales económicos son: esfalerita, esmitsonita, calamina, franklinita, willemita y la cincita. Existen muchas clases distintas de minerales. Argentíferas y auríferas, sulfidas de cinc con o sin algo de plomo, cobre y sulfuro de hierro. Únicamente esfalerita o con galena y, usualmente, con alguna pirita y piedras calizas son típicas. El cinc como franklinita, willemita, y la cincita, es una blanca y cristalina piedra caliza. Los cuerpos de minerales sulfuros pueden ser cubiertos por depósito de esmitsonita, calamina e hidrocincita. Tales depósitos son con frecuencia más valiosos que los sulfuros primarios, ambos por la razón que son más concentrados y que su tratamiento metalúrgico es más simple. (12)

### B. Historia minera de Guatemala

La noticia más antigua que se conoce acerca de los trabajos de minería se refiere a Huehuetenango y procede del escribano Luis Azetuno. En el mes de octubre de 1583 Pedro de Olarte y Juan Gutiérrez formaron una compañía minera ante dicho escribano en el pueblo de "Gueguetenango". Olarte aportaba la mina a la sociedad y parte de otras. "Gutiérrez aportaba los metales que tenía ligados y por ligar, y dinero en efectivo que iba servir para comprar esclavos y lo más necesario hacer ingenios y los edificios convenientes" (6).

Al hablar de ingenios se refería a la maquinaria necesaria para los trabajos mineros, es decir una planta procesadora o separadora de los minerales, para luego fundirlos.

En la época moderna estas plantas tienen un equipo sofisticado y cada una de las máquinas es una representación de la inventiva del ser humano.

En Guatemala, la instalación de plantas separadoras de minerales, comenzó a tener auge a finales de 1950, cuando se instaló la primera planta en la mina Caquipec, en San Juan Chamelco, Alta Verapaz. Esta planta tiene capacidad de 800 toneladas diarias para la separación de plomo y cinc. Esta mina pertenece a la compañía Minera de Guatemala y cuando se instaló la planta, la empresa tenía capital extranjero, actualmente es empresa guatemalteca y la planta se encuentra instalada en su lugar de origen.

La segunda planta procesadora se instaló en la mina Santiago y Mercedes, a mediados de 1951. Esta planta tenía capacidad de 25 a 30 toneladas diarias, la compañía que trabajaba esta mina se denominaba Minerales Nacionales, S.A. y su capital de trabajo era guatemalteco. Esta planta, en 1954, fue trasladada a la aldea la Capellanía Chiantla, Huehuetenango, donde estuvo por varios años; en 1957, fue trasladada a San Idelfonso Ixtahuacán, Huehuetenango, donde se empezó a trabajar las minas de Antimonio. Después pasó a poder de la Compañía Minas de Oriente, S.A. (MINORSA 1969), quien la trasladó a Concepción las Minas, Chiquimula. En 1973 esta planta fue comprada por la empresa Compañía Minera Villa Linda y fue trasladada, nuevamente, a la Aldea la Capellanía, donde se encuentra actualmente.

La tercera planta fue instalada por la Compañía Minera de Huehuetenango en San Rafael La Independencia, esta compañía trabajaba las minas Rosario y Bola de Oro, en San Miguel Acatán y Villa Linda, La Felicidad y La Argentina en San Rafael. Esta planta se quemó y las partes útiles fueron vendidas a diferentes empresas.

La cuarta planta fue instalada en el municipio de La Democracia, Huehuetenango por la empresa Compañía Minera Rodríguez, quien trabajaba la mina La Plateada. Dicha planta se encuentra, actualmente, en Ixtahuacán y es propiedad de la Empresa Minas de Guatemala, S.A.

La quinta planta procesadora fue instalada en Santa María Cahabón, Alta Verapaz, para trabajar minerales de cobre por la empresa Transmetales Limitada. Dicha planta se encuentra, actualmente, sin trabajar.

La sexta planta podría decirse que fue la instalada por la Empresa Exploraciones y Explotaciones Mineras Izabal (EXMIBAL); aunque esta planta de procesamiento es diferente a las plantas anteriormente mencionadas, debido al proceso que emplea para el tratamiento del mineral (Niquel).

### C. Mineral de estudio

1. Mina Caquipec. La mina Caquipec, como ya se mencionó anteriormente, se encuentra localizada en San Juan Chamelco, Alta Verapaz, a unos 30 kms. de la cabecera departamental Cobán. La mina fue descrita por J.L. Thomas, un investigador del gobierno de Estados Unidos, en 1948, como "un depósito de piedra caliza del tipo restituible. Su excelente mineral de plata-plomo-cinc es el afloramiento de una serie de camas de piedra caliza enriquecidas más una fina fisura. Una cubierta formada de ceniza volcánica proveyó durante un largo tiempo una oxidación extrema y, a la vez, una protección contra la erosión" (6).

La mina empezó a ser explotada alrededor del año 1950, por el gobierno de los Estados Unidos, movidos por la necesidad de buscar metales tan valiosos como el cinc y el plomo en un período de recesión, después de la Segunda Guerra Mundial y la eminente guerra de Corea.

Con compuestos sulfurados, predominando el sulfuro de cinc (esfalerita) y sulfuro de plomo (galena), se instaló una planta de flotación con capacidad para procesar 800 toneladas diarias de mineral.

La planta funcionó activamente en la década de 1950 disminuyendo bastante su operación en la de 1960. En esa misma década la planta y mina pasaron a ser propiedad de la Compañía Minera de Guatemala, S.A. Desde finales de los '60 hasta finales de 1970 la mina operó esporádicamente hasta llegar a cerrar por motivos no establecidos. (6.)

2. Origen de Colas. El proceso de flotación es un método físico-químico de concentración de minerales finamente molidos. En este proceso se obtienen básicamente dos productos, cabeza que es el mineral que flota y rebalsa y, cola el mineral que no flota y queda en el aparato flotador y es removido por un flujo interno. Uno u otro puede ser el concentrado de interés.

En el proceso de la mina Caquipec, el producto cabeza era el de interés. Se realizaban dos concentraciones, una de sulfuro de cinc y otra de sulfuro de plomo, cada una se realizaba en diferente etapa. En el proceso existió un producto cola, que no se aprovechó y que se fue amontonando sin uso alguno.

En la actualidad, Caquipec posee alrededor de 100,000 toneladas de colas de flotación que se encuentran intactas desde que fueron amontonadas. Existen alrededor de 7,000 toneladas que fueron deslamadas y que se encuentran bastante limpias.

### III. PRINCIPIOS GENERALES DE LOS PROCESOS DE SEPARACION Y/O CONCENTRACION DE MINERALES EN HUMEDO

#### Principios de Clasificación Húmeda

Clasificación: Por lo general, es una operación en la cual, una masa de granos de diferentes medidas y diferentes gravedades específicas es permitida o causada para sedimentar a través de un fluido en el que puede estar, ya sea en movimiento o substancialmente en reposo. El fluido empleado con frecuencia es agua, pero otros líquidos, agua u otros gases pueden ser utilizados.

#### Leyes Generales sobre la Clasificación Húmeda

1. Las velocidades relativas de sedimentación de las partículas de la misma gravedad específica y la misma forma, en un líquido dado, dependen de las medidas de las partículas, las más grandes (y más pesadas) sedimentan más rápido.
2. Si las partículas son de la misma medida y forma, pero de diferentes gravedades específicas, sedimentarán en forma proporcional a sus gravedades específicas.
3. Si las partículas son del mismo peso, pero de diferentes formas, sus velocidades de sedimentación, probablemente, diferirán; las partículas esféricas bajarán más rápido que aquellas tabulares.
4. La resistencia a bajar en un líquido dado, depende sobre las velocidades de la partícula en descenso. La resistencia varía directamente con la velocidad, cuando ésta es baja y, con el cuadrado de la velocidad, cuando la velocidad es alta.
5. La velocidad de descenso en un líquido dado, siendo todas las otras iguales, varía con el cuadrado de los diámetros de las partículas, cuando éstas son muy pequeñas y, con los diámetros, cuando las partículas son relativamente grandes.

6. La resistencia a bajar, aumenta con la densidad del líquido.
7. La resistencia a bajar, aumenta con la viscosidad del líquido. (15)

#### A. Concentración por gravedad

Es el método de separación de granos de minerales de diferente gravedades específicas por sus diferencias en movimiento, en respuesta a la unión de acciones simultáneas de gravedad sobre ellos. En la mayoría de procesos de concentración por gravedad, la otra fuerza utilizada, es la resistencia al descenso de penetración ofrecida por un medio que tiene más o menos propiedades de fluido: un gas, generalmente aire; agua o algún líquido homogéneo; o una mezcla mecánica de un fluido y una partícula sólida mantenida, poco más o menos, en suspensión. Las propiedades de fluido utilizados son: densidad y viscosidad; las fuerzas que ellas darán son: flotabilidad e impulso de ascender. En otros procesos de gravedad el impulso de los fluidos en movimiento es causado para actuar en un ángulo aproximado de  $90^\circ$  a la línea vertical de acción de la gravedad. Fricción entre las partículas y una superficie de soporte sólida en reposo o en movimiento son elementos importantes en los movimientos resultantes de las partículas.

En todos los procesos de gravedad, el tamaño también es un elemento principal. Este no es diferente de la gravedad específica que causa las diferencias en las partículas en movimiento. De ahí que una partícula de alta gravedad específica dada y de pequeña magnitud, tendrá el mismo movimiento en un medio fluido dado, como otro de baja gravedad específica y gran magnitud.

1. Mezclas de mineral susceptible a separación por gravedad. Son aquellos en los cuales el mineral valioso y la ganga difieren apreciablemente en gravedad específica, i.e., cuarzo o cualquier roca matriz usual (g.e. 2.6) y un mineral sulfido (g.e. 4 a 7.5); o mezclas en las cuales un

peso aparente en el medio, diferente del peso real, puede ser inducido, de preferencia, en uno de los minerales adheridos a burbujas de aire o a una película líquida, o por aglomeración de un número pequeño de partículas dentro de un gran conjunto.

2. Principios de suspensión para concentración por gravedad. Partículas divididas muy finamente de muchos sólidos permanecerán suspendidas más o menos indefinidamente, proveyendo un movimiento Browniano. La mezcla tiene muchas propiedades fluidas. Las partículas sólidas suspendidas, incrementan el peso específico aparente del fluido, aproximadamente en proporción a la fracción de peso presente. Si la concentración de sólido es alta, hay un marcado incremento en la viscosidad. Como un resultado de estos dos cambios, el poder del fluido para suspender sólidos del tamaño de la arena, es incrementado y la arena agregada causa un posterior incremento en el peso específico aparente. Y la viscosidad de la mezcla, aunque una cierta cantidad de energía en la forma de agitación mecánica inducida, debe suplementar la agitación térmica del fluido suspendido, si la suspensión es mantenida homogéneamente.

3. Materiales para suspender. Medios pesados para separaciones comerciales han sido hechas con arcilla, cuarzo, pizarra, magnetita, galena y ferro-silicón, como también con mezcla de estos sólidos; hematita, barita, pirita, cobre, acero al carbón, y plomo han sido propuestos y usados experimentalmente. El agua ha sido usada universalmente como el líquido suspensor, pero no hay razón por la que soluciones acuosas pesadas o líquidos orgánicos pesados puedan ser usados, excepto que tal uso podría traer ciertas desventajas.

Los factores importantes a considerar en la selección del medio sólido son: gravedad específica, dureza, resistencia a la corrosión u otra acción química en soluciones acuosas; tamaño de grano, tamaño de distribución y forma;

características de sedimentación; propiedades que éstos prestan para la separación de los productos de concentración, recuperación, composición química, fuente y costo.

La gravedad específica debe ser mayor que la del mineral a ser flotado, como la combinación de sólido y agua (pulpa) debe tener una gravedad combinada de, por lo menos, igual a la del mineral a flotar. El cálculo de la gravedad del medio es hecha por la siguiente ecuación:

$$R = W/[p+W(1-p)] \quad \text{o} \quad p = W(1-1/R)/(W-1)$$

Donde "p" es igual a la fracción decimal por peso de sólidos en la pulpa, y "W" es igual a la gravedad específica del medio sólido, y "R" igual a la gravedad específica efectiva de suspensión. Los valores limitantes de "p" no son independientemente definibles, pero, en general, están en el intervalo de 70 a 85%, siendo el más alto para las partículas sólidas más gruesas y el más pequeño para el limo; "W" debe ser mayor que 7 para producir un medio de una gravedad específica de 2.5 en la parte alta con liquidez propia. En general, la máxima "R" trabajable para un medio con agua es cerca de W/2.

4. Agitación. Es efectuada por agitadores montados sobre un eje vertical, o por una alimentación hacia arriba de un medio nuevo y circulante (o agua), o por ambos, actuando en conjunto. Los grados de agitación mecánica es pequeña en los conos de separación de minerales. Los brazos de agitación sirven casi tanto para prevenir amontonamiento y para mover el hundimiento hacia los lados del cono, como para agitar el medio, en conos, la velocidad extrema de los brazos más largos puede ser 300 pies por minuto. En cilindros, las aspas de agitación giran a una velocidad de 5 rpm. Cerca de 150 pies por minuto, como velocidad periférica, es recomendado como máximo en separadores de minerales. (15)

Métodos de separación de hundimiento-flotación, pueden ser aplicados a las fracciones más gruesas (mayores que 1/4 ó 3/8 pulg.) de cualquier mineral o mezcla.

## B. El Proceso de Flotación

Definición del término "Flotación". La flotación, o más específicamente, la flotación en espuma, es un método físico-químico de concentración de minerales finamente molidos. El proceso comprende el tratamiento químico de una pulpa de mineral, a fin de crear condiciones favorables para la anexión de ciertas partículas minerales a las burbujas de aire. Estas burbujas de aire llevan consigo los minerales seleccionados a la superficie de la pulpa y forman una espuma estabilizada que es recogida, mientras los otros minerales permanecen sumergidos en la pulpa. (4)

Campo de aplicación. El proceso de flotación es, en la actualidad, el más eficaz, más ampliamente aplicable y más complejo de todos los métodos de concentración de minerales utilizados, en la actualidad, por la industria minera. En teoría, puede aplicarse a cualquier mezcla de partículas que se hallen esencialmente libres una de la otra y que sean lo bastante pequeñas para ser elevadas por burbujas de gas ascendentes. Las partículas, cuyo tamaño esté en el intervalo entre 20 mallas y unos cuantos micrones, son las que responden a la flotación.

1. Mecanismos. El mecanismo esencial de la flotación comprende la anexión de partículas minerales a las burbujas de aire, de tal modo que dichas partículas son llevadas a la superficie de la pulpa mineral, donde pueden ser removidas. Este proceso abarca las siguientes etapas:

- a) Moler el mineral a un tamaño lo suficientemente fino para separar uno de otro los minerales valiosos, así como de los minerales de ganga adherentes.

- b) Preparar las condiciones favorables para la adherencia de los minerales deseados a las burbujas de aire.
- c) Crear una corriente ascendente de burbujas de aire en la pulpa del mineral.
- d) Formar una espuma cargada de mineral en la superficie de la pulpa.
- e) Extraer la espuma cargada de mineral.

Sintetizando podemos decir que la molienda del mineral no forma parte de la flotación, tiene una importante influencia sobre el proceso. Para lograr resultados óptimos con la flotación, en la etapa de la molienda los minerales valiosos deben ser liberados completamente de la roca desechable (ganga) y ser separada una de otra. Sin embargo, en la práctica esto no es económicamente factible, y aún cuando se logre una separación completa pueden presentarse otros factores negativos para el proceso. Por ejemplo, los molinos de bolas o barras, generalmente, usados para la molienda pueden formar considerables lamas de ganga que complicarán las subsiguientes etapas de flotación. La creación de una corriente ascendente de burbujas de aire, se logra con una máquina de flotación, la que produce burbujas bien sean mediante la agitación mecánica de la pulpa de mineral, y/o la introducción directa de aire bajo presión. Estas operaciones pueden considerarse como los aditamentos mecánicos del proceso de flotación.

Para obtener la adherencia de las partículas minerales deseadas a las burbujas de aire, y de ahí la formación de una espuma cargada de mineral en la superficie de la pulpa, se debe formar una película de superficie hidrofóbica sobre las partículas a flotar y una película hidrofílica o humectable en todas las demás. Esto se logra por medio de "colectores" y "modificadores", y la selección de la combinación apropiada para cada tipo de mineral particular, constituye, precisamente, el principal problema del metalurgista a cargo del beneficio. (4)

2. Flotación Diferencial. Todos los procesos de concentración por flotación son selectivos o diferenciales, por cuanto un mineral o grupo de minerales son flotados para separarlos de la ganga que los acompaña. Sin embargo, la separación de minerales distintos como los sulfurados de los no sulfurados, se conoce como "flotación colectiva" (bulk) y el término de "flotación diferencial" se restringe a aquellas operaciones que comprenden la separación de tipos similares de mineral. Un ejemplo de flotación diferencial es la concentración y subsiguiente separación de cobre, plomo, cinc y hierro de un solo mineral.

Mediante la aplicación adecuada de agentes modificantes, se puede lograr la separación diferencial usando el mismo agente colector para todos los concentrados. Otros minerales pueden reaccionar en forma diferente, haciendo necesario emplear un colector distinto en cada etapa de la flotación. Las variaciones en la actividad de flotación entre diferentes minas que contienen los mismos tipos de minerales, pueden deberse a diferencias en la historia geológica, grado de oxidación, presencia de sales solubles que interfieren, u otras numerosas causas. Puesto que muy raramente es posible controlar o aún determinar todas las variables que pueden presentarse en un circuito de flotación, cada mineral puede sufrir cambios de una hora a otra, creando así un eterno reto al metalúrgico de flotación.

Por lo anterior, es evidente que sería difícil, si no imposible, predecir la actividad de flotación de un mineral, basándose en un examen y análisis. Existen, por supuesto, varias correlaciones que forman la base de ciertas reglas o procedimientos generales, aunque la ausencia de reglas fijas debe tenerse muy en cuenta. (3)

3. Agentes de flotación. Los agentes de flotación pueden clasificarse como colectores, espumantes o modificadores. El tipo de los compuestos que se encuentra en cada una de estas categorías, aparece en la tabla 1.

Colectores. El colector constituye el corazón del proceso de flotación, puesto que es el reactivo que produce la película hidrofóbica sobre la partícula mineral. Cada molécula colector contiene un grupo polar y uno no polar. Cuando se adhieren a la partícula mineral, estas moléculas quedan orientadas en tal forma que el grupo no polar o hidrocarburo queda extendido hacia afuera. Tal orientación resulta en la formación de una película de hidrocarburo hidrofóbico, en la superficie mineral.

La Figura 1 ilustra una superficie de contacto de la burbuja de aire sobre el mineral, con y sin un colector. Es evidente que en la ausencia del colector la burbuja de aire hace sólo un contacto íntimo con la superficie del mineral y de aquí que la flotación sea imposible. Con el colector, por el contrario, se obtiene un ángulo de contacto de  $60^\circ$  o sea una condición favorable para la flotación.

Figura # 1

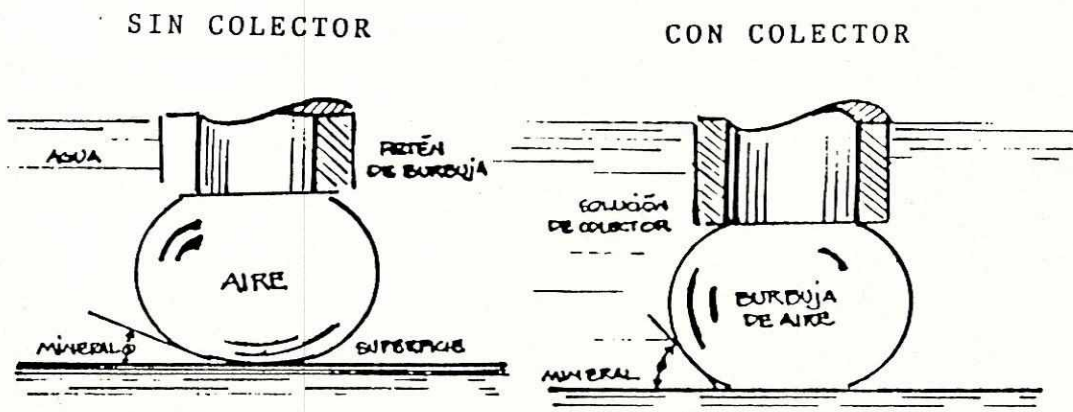
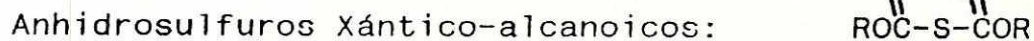


Tabla # 1 (4)  
Clasificación de los Reactivos de Flotación

I. Colectores

A. Aniónico para Minerales Sulfurosos



B. Aniónico para Minerales No-Sulfurosos



C. Catiónico para Minerales No-Sulfurosos

Aminas Alquílicas: RNH

Compuestos Amoniacales Cuaternarios:  $\text{RR}'\text{R}''\text{R}'''\text{NCl}$

II. Modificadores

A. pH

Cal: CaO

Ceniza de Soda:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Soda Cáustica: NaOH

Acido:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , HCl

## B. Modificadores de Superficie

Cationes: Ba, Ca, Cu, Pb, Zn, Ag.

Aniones:  $\text{SiO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ , CN,  $\text{CO}_3$ , S

Coloides Orgánicos: Dextrina, Almidón, Goma, etc.

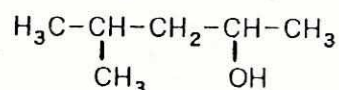
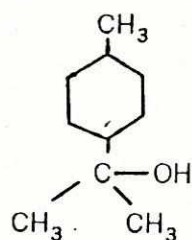
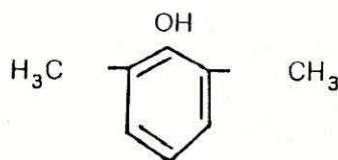
## C. Precipitación o remoción de Hierro

Cationes: Ca, Ba

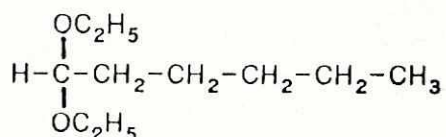
Aniones: CN,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{SO}_3$ 

## III. Espumantes

Alcoholes:

Aceite de Pino:  
(Terpineol)Acido Cresílico:  
(Xylenol)

Polialcoxiparafinas:

Espumantes.

Acción espumante. El propósito principal del espumante es la creación de una espuma capaz de mantener las burbujas cargadas de mineral, hasta que puedan ser removidas de la máquina de flotación. Este objetivo se logra impartiendo cierta dureza temporal a la película que cubre la burbuja. De esta manera, se prolonga la vida de la burbuja individual, hasta que pueda estabilizarse por la adherencia

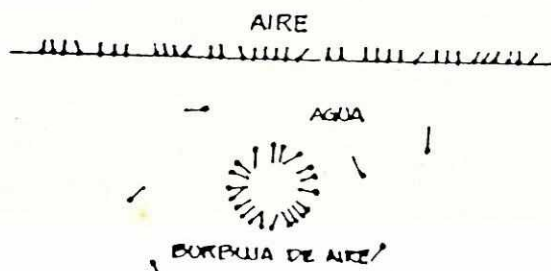
de partículas minerales y juntarse con otras burbujas en la superficie de la pulpa para formar una espuma. Sin embargo, una vez sacada de la máquina de flotación, la espuma debe romperse rápidamente, a fin de evitar la interferencia con las subsecuentes operaciones del proceso.

La facultad de reducir la tensión superficial del agua es una característica de todos los espumantes. Puesto que la mayor parte de los compuestos orgánicos pueden lograr esto, por lo menos hasta cierto grado y el número de espumantes con que podría contarse comercialmente sería considerable. Sin embargo, debido a que un espumante debe también ser de bajo costo y, fácilmente, disponible, efectivo en concentraciones pequeñas y esencialmente libre de propiedades colectoras, sólo unos cuantos materiales han sido encontrados adecuados. (4)

Todos los espumantes, actualmente, en uso son compuestos orgánicos heteropolares. El radical orgánico no polar, como el de la molécula colectora de flotación, repele el agua, mientras que la porción polar la atrae. Se obtiene el equilibrio, si las moléculas ocurren en las paredes de la burbuja, con el extremo polar adhiriéndose a la fase agua y el extremo no polar orientado hacia la fase gas. Por lo tanto, las moléculas espumantes se concentran en la interfase de aire-líquido, tal como se muestra esquemáticamente en la fig. # 2.

La distribución de las moléculas de espumante en la capa superficial del agua, proporciona a esa zona la elasticidad requerida para ayudar a las burbujas ascendentes a irrumper a través de la capa superior del agua y emerger en la interfase aire-agua intactas y enteras.

Figura # 2



Modificadores. La lista de agentes acondicionadores o modificantes empleados en la flotación es larga y variada. Generalmente, incluye todos los reactivos cuya función principal no es ni colectar ni espumar. Los modificadores pueden actuar como depresantes, activadores, reguladores de pH, dispersantes, etc. Un depresante es cualquier reactivo que inhibe o impide la adsorción de un colector por una partícula de mineral, impidiendo, por lo tanto, su flotación. Por otra parte, los activadores mejoran la adsorción del colector. Frecuentemente, un solo compuesto puede llevar a cabo varias funciones, por ejemplo, el carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) puede ser un activador para la pirita y un depresante para la calcita, así como un dispersante de pulpa y un regulador de pH. La clasificación de los agentes modificantes que aparece en la Tabla 1, se basa en el resultado directo y no en el resultado final de adición a la pulpa de mineral. Como muestra la tabla, los modificadores pueden funcionar como:

- a) Modificadores del pH
- b) Modificadores de la superficie
- c) Precipitantes para sales solubles

De nuevo, un solo producto como la cal, puede agruparse dentro de más de una sola clasificación. (13)

Modificadores del pH. Con raras excepciones, la efectividad de todas las clases de agentes de flotación, depende, en gran parte, del grado de alcalinidad o acidez de la solución de la pulpa. En consecuencia, uno de los objetos fundamentales de la investigación, es descubrir el valor óptimo del pH para determinada combinación de reactivo y mineral. El pH es uno de los pocos factores que puede medirse fácilmente en una pulpa de flotación. (13)

Modificadores de la superficie. Modificar la superficie de las partículas minerales para mejorar la selectividad del proceso de flotación, es, probablemente, la función más importante y compleja que llevan a cabo los agentes modificadores. El término "modificar la superficie" se emplea aquí

en su más amplio sentido, para incluir tanto la adsorción como la interacción iónica de los agentes modificantes en/o cerca de la superficie de mineral. Para que el agente modificante de la superficie sea efectivo debe adherirse selectivamente a un mineral o grupo de minerales contenidos en el mineral bruto. El resultado puede, entonces, ser tanto la activación como la depresión del mineral, cuya superficie se ha modificado dependiendo de la reacción del colector con el agente modificante de superficie adsorbido. (13)

Agentes Catiónicos. Aunque todos los iones metálicos pueden considerarse como agentes modificantes de la superficie, sólo unos cuantos se emplean comúnmente como tales. El cobre, uno de los más importantes, tiene aplicación en la flotación de la esfalerita (sulfuro de cinc) que no es afectada por el xantato. Los iones de cobre se agregan a la pulpa como sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ); el cobre es adsorbido en la superficie de la esfalerita, reemplazando el cinc en la estructura mineral y formando una película de sulfuro de cobre en la esfalerita. Esta, por lo tanto, se comporta como un mineral de cobre que puede, por supuesto, flotarse con xantato. (13)

Agentes Aniónicos. Entre los principales modificadores de la superficie, pueden citarse los sulfuros, cianuros, carbonatos y fosfatos, así como los agentes reductores y oxidantes. En conexión con esto se podría considerar el aire como el agente de flotación de ciertos minerales.

El control de la oxidación de la superficie mediante calor, aire, oxidantes o agentes reductores, puede, frecuentemente, causar una variación considerable en la selectividad de la separación de flotación. Aparte del aire, no se usan, generalmente, los agentes oxidantes, pero existe un buen número de aplicaciones interesantes.

Los agentes reductores son, a menudo, de mayor importancia que los oxidantes en la flotación del mineral, puesto que la prevención de un exceso de oxidación, frecuentemente, constituye un problema. En la flotación de plomo-cinc, el

sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) o el bisulfito de sodio ( $\text{NaHSO}_3$ ) se emplean, frecuentemente, para este fin. (13)

Aplicaciones. La selección de los agentes modificadores adecuados depende, por lo tanto de:

- a) el tipo de mineral que se va a flotar;
- b) los otros minerales presentes;
- c) el colector que se va emplear; y
- d) las sales solubles en la pulpa del mineral.

Si se emplean dos o más modificadores, el problema se complica con la posibilidad de una reacción entre los modificadores. La consideración de las reacciones químicas deseadas, puede, a menudo, redundar en mejores resultados metalúrgicos y en la reducción de los costos totales de reactivos. Por ejemplo, en una pulpa alcalina de alto contenido de cal, se desperdiciaría el silicato de sodio, puesto que el calcio precipitaría el silicato. Un método más económico de extraer el calcio sería por precipitación con carbonato de sodio.

### C. Eliminación del Agua

Con la excepción de trituración en seco y un limitado número de operaciones, tales como: clasificación por aire, distribución manual, tableo neumático, y concentraciones eléctricas, la mayor parte del manejo del mineral se lleva a cabo en agua. La completa o parcial eliminación de esta agua, de uno o más productos, en alguna etapa, en el diagrama de flujo es, invariablemente, necesario.

Eliminación de agua (dewatering) es la separación de una mezcla de sólidos y agua en dos partes, una de las cuales está, relativamente libre de sólidos y la otra libre de líquido, con respecto a la arena original. Pero los limos y arenas finas que están presentes, tenderán a irse con el agua. Si la materia sólida es tan fina, que un movimiento leve mantiene ésto en suspensión uniforme dentro del agua, la separación es efectuada llevando el agua sustancialmente a reposar, y permitiendo a las partículas sólidas sedimenten bajo

la influencia de la gravedad. Esta operación, acompañada con un sobreflujo continuo de agua y una descarga en el fondo de sólidos, parcialmente, sin agua, es llamado espesamiento. La filtración debe ser empleada, si un líquido libre de sólidos o una fracción de sólidos, conteniendo menos agua que la que puede ser obtenida por sedimentación, es lo requerido. Cuando el espesamiento es combinado con la filtración, en un tanque simple, la eliminación de agua es conocida como "espesamiento-filtración". Sustancialmente, una separación completa de agua y sólidos es asequible, únicamente, por evaporación del agua (secado). (1)

#### IV. TRABAJO EXPERIMENTAL

A continuación se presentan los procedimientos llevados a cabo en la investigación de laboratorio, así como los resultados obtenidos. Todos los análisis de composición química se hicieron en duplicado, los resultados presentados son un promedio de dichos análisis.

##### A. Procedimiento

##### 1. Composición Química de las Colas (Ver Apéndice B)

##### 1.1 Métodos de Análisis.

a) Determinación de Plomo. Primero se disolvió el Carbonato de Plomo con ácido Clorhídrico y ácido Nítrico, luego se oxidó el Sulfuro de Plomo presente con Clorato de Potasio y se agregó ácido Sulfúrico, para convertir todo el Plomo presente en Sulfato de Plomo.

A continuación, se procedió a determinar la concentración de Plomo por análisis volumétrico. Se tituló la solución de Plomo con una solución valorada de Molibdato de Amonio, utilizando ácido Tánico como indicador. El punto final es un cambio en el color de transparente a amarillo.

Para encontrar la diferencia entre carbonatos y sulfuros, se hizo una determinación sin agregarle ácido Clorhídrico y ácido Nítrico.

b) Determinación de Cinc. En igual forma que en la determinación de Plomo, se convirtió el Carbonato y Sulfuro de Cinc en Sulfato de Cinc y después se determinó volumétricamente la concentración de Cinc.

Se tituló la solución de Cinc con una solución valorada de Ferrocianuro de Potasio, utilizando Molibdato de Amonio como indicador. El punto final es un ligero color café.

Para la diferencia entre Carbonatos y Sulfuros se procedió como en el Plomo.

c) Determinación de Insolubles. Se disolvieron Carbonatos y Sulfuros existentes en el mineral y se filtró la solución. Se calcinó el papel filtro y el residuo obtenido se tomó como insoluble.

d) Determinación de otros compuestos. La determinación de los otros compuestos del mineral fue realizado a través de un análisis Espectrométrico (Fotometría de Emisión de Llama). Con este análisis se determinó la presencia de los siguientes elementos: Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), Hierro ( $\text{Fe}^{+3}$ ), Aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ), Cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ), Potasio ( $\text{K}^{+1}$ ), Sodio ( $\text{Na}^{+1}$ ), Cadmio ( $\text{Cd}^{+2}$ ) y Cobalto ( $\text{Co}^{+2}$ ). A partir de éstos se completó la composición del mineral, considerando los compuestos más comunes en un mineral de estas características.

## 2. Separación por tamaño de partícula

Utilizando las mallas 48, 100, 200 y 325 (escala estándar de Tyler), se procedió a determinar la composición por tamaño de partícula del mineral.

Se emplearon muestras de distintos lugares donde se encuentran las colas. Para cada muestra se hizo el siguiente procedimiento: se pesaron 1000 gramos y se tamizaron, primero, con la malla 48. Lo que pasó la malla 48, posteriormente se tamizó con la malla 100 y, en igual forma, se hizo con la partícula menor de la malla 100, tamizándola, a continuación, con la malla 200 y así con la malla 325.

Se determinaron los porcentajes en peso correspondientes a cada tamaño de partícula, así como las concentraciones de Plomo y Cinc, por medio de los análisis ya mencionados.

## 3. Deslamado

Aprovechando el equipo de Flotación que se tenía, la máquina Fagergren (ver apéndice A), se acondicionó para obtener un sistema que pudiera simular a un clasificador de corriente superficial y poder realizar algunas pruebas de deslame.

Para cada prueba se pesó 2000 gramos de mineral y se colocaron dentro del recipiente de la máquina de flotación. Luego se llenó con agua hasta el nivel de derrame del recipiente, aproximadamente unos tres litros de volumen, para obtener una densidad de pulpa de 66% de sólidos. Se procedió a continuación a colocar el recipiente en la posición correspondiente dentro de la máquina de flotación.

Las pruebas se realizaron a dos velocidades de agitación: 400 y 700 rpm (revoluciones por minuto), dadas por el motor de velocidad variable del equipo. Estas son las mínimas velocidades que se pueden obtener. Los flujos de la corriente superficial fueron de 0.25 y 0.5 litros por minuto.

Para cada prueba se realizaron los análisis de Plomo y Cinc, antes mencionados.

#### 4. Flotación

Se utilizó el equipo de Flotación a nivel laboratorio marca Fagergren (ver Apéndice A). Empleando los reactivos que la compañía Cyanamid nos proporcionó, se realizaron dos procesos de flotación diferentes. En el primero, se buscó separar los compuestos de Plomo y Cinc de todos los otros compuestos existentes, y luego, hacer una única separación entre estos dos. En el segundo, se procedió a flotar los compuestos de Plomo (básicamente Carbonato) y luego flotar los compuestos de Cinc (también principalmente Carbonato).

##### Proceso # 1:

Parte A: Separación de los compuestos de Plomo y Cinc de todos los otros compuestos.

a) Se pesó 750 gramos de mineral deslamado y se agregó agua hasta un volumen de 3000 ml, para obtener una densidad de pulpa de 25% de sólidos, aproximadamente. Esta mezcla se realizó en el recipiente de la máquina de flotación.

b) Se agregó 0.11 g. del Promotor Aniónico Aero-845 (Alquil Succinamato) y 0.04 gramos de Aerofroth Cyanafoam 65 (Propilen Glicol), equivalentes a 150 y 50 ppm, respectivamente, y se procedió a flotar, usando la velocidad de 400 rpm.

El pH se mantuvo entre 2 y 4 con ácido Fosfórico. Se tomaron muestras a los 4, 8, 12 y 16 minutos de la cabeza y cola.

c) Se repitieron los dos pasos anteriores, modificando la dosificación del Promotor. Se hizo para una dosis de 0.37 y 0.56 gramos (equivalente a 500 y 750 ppm).

Parte B: Separación entre Compuestos de Plomo y Cinc.

d) Se procedió a flotar los compuestos de Plomo. Se agregaron 0.50 gramos de Sulfuro de Sodio al mejor producto Cola de la parte anterior del proceso. Luego, se le agregó el Promotor Aniónico Aero-407 (mezcla acuosa de Ditiofosfato de Sodio y compuestos aromáticos) en dosis equivalentes de 20, 35 y 50 ppm. El pH se mantuvo entre 8 y 10 con soda cáustica. Se tomaron muestras a los 4, 8, 12 y 16 minutos de cabeza y cola. El producto cabeza representa el Plomo concentrado y la cola del Cinc.

e) Se hicieron los análisis para Plomo y Cinc de los pasos "b" y "d".

Proceso # 2:

Parte A: Flotación de Compuestos de Plomo.

a) Se realizó, básicamente, el paso "d" del proceso # 1, pero con una nueva carga de mineral para una densidad de pulpa de 25%, 750 gramos de mineral deslamado. La dosificación fue la siguiente: 1.0 gramos de Sulfuro de Sodio (equivalente a 1500 ppm), de 0.015, 0.026 y 0.0375 gramos del Promotor Aniónico Aero-407 (equivalente a 20, 35 y 50 ppm respectivamente) y 0.04 gramos de Aerofroth 77HP (mezcla de alcoholes de cadena de 5 a 8 carbonos), equivalente a 50 ppm.

Parte B: Flotación de Compuestos de Cinc.

b) El producto Cola, de cada una de las flotaciones del paso anterior, fue tratado en forma consecutiva para concentrar el Cinc. Se agregaron dosis correspondientes a: 5000 ppm de Sulfuro de Sodio; 10, 15 y 20 ppm del Promotor 3501 (Isoamil Ditiofosfato). El pH se mantuvo entre 10.5 y 11 con soda cáustica y se tomaron muestras.

c) Se hicieron los análisis para Plomo y Cinc de los pasos anteriores.

##### 5. Descripción de Reactivos de Flotación usados.

Promotor Aniónico Aero-845: Alquil Succinamato, desarrollado para proveer más selectividad y que puede ser hecha con ácidos grasos. Excelente promotor para barita, celestita y esquelita, en circuitos alcalinos y para casiterita en circuito ácido, cuando es usado como principal promotor. También es usado como colector secundario con ácidos grasos y sulfonatos de petróleo, usualmente, de 5 a 20% de la dosificación total del colector. Comúnmente, requiere muy corto tiempo de condicionamiento con la pulpa. Posee habilidad para colectar partícula fina. Es completamente soluble en agua, puede ser alimentado en cualquier concentración.

Espumante Aerofroth 65: Polipropilen glicol, completamente soluble en agua. Un fuerte espumante útil donde la desintegración prematura de la espuma es un problema. Frecuentemente mezclado con o usado en conjunto con espumantes a base de alcohol para condiciones óptimas.

Sulfuro de Sodio: Es usado para la sulfurización de minerales de oxidados de Plomo y Cobre, especialmente de Plomo. El tiempo requerido para el acondicionamiento con sulfuro de sodio es relativamente proporcional a la cantidad que se alimenta en cualquier punto del circuito. Por consiguiente, se obtienen efectos más rápidos, si se añaden pequeñas cantidades de sulfuro de sodio en varios puntos del circuito.

Promotor Aniónico Aero-407: Mezcla acuosa de Ditioposfato de Sodio y compuestos aromáticos, puede, sustancialmente, reemplazar xantatos en muchas aplicaciones, siendo más selectivo para sulfuros de hierro en circuitos alcalinos. Útiles para tratar un amplio rango de minerales de base-metal. Propiedades físicas: Punto de ebullición 103 °C, punto de congelamiento -7 °C, pH 13, gravedad específica 25 °C-1.17, viscosidad 0 °C-20, 30 °C-6.0 cps.

Espumante Aerofroth 77HP: Mezcla de alcoholes de 5 a 8 carbonos, da una espuma menos persistente que el 65, aceite de pino o ácido cresílico. Ampliamente usado con minerales sulfurosos y no sulfurosos, especialmente para flotación selectiva.

Promotor Aero 3501: Isoamil Ditioposfato, usado para flotación de minerales de Cobre y Cinc activado. Características físicas: pH 10, gravedad específica 30 °C-1.08, viscosidad 0 °C-38, 30 °C-10 cps, punto de ebullición 103 °C. (13)

## B. Resultados

1. Composición Química de las Colas. La cantidad de Plomo y Cinc en las Colas, sin ningún tratamiento, es el siguiente:

Tabla # 2  
Composición de Colas Originales

| Elemento                  | Porcentaje en Base Húmeda |       | Porcentaje en Base Seca |       |
|---------------------------|---------------------------|-------|-------------------------|-------|
| Plomo (Pb <sup>+2</sup> ) | 3.62                      |       | 4.11                    |       |
| Como Oxido                |                           | 3.11  |                         | 3.53  |
| Como Sulfuro              |                           | 0.51  |                         | 0.58  |
| Cinc (Zn <sup>+2</sup> )  | 23.08                     |       | 26.23                   |       |
| Como Oxido                |                           | 20.89 |                         | 23.74 |
| Como Sulfuro              |                           | 2.19  |                         | 3.20  |
| Insolubles                | 14.71                     |       | 16.72                   |       |
| Agua (H <sub>2</sub> O)   | 12.0                      |       | 0.0                     |       |

A partir de los anteriores resultados se deduce la siguiente composición:

Tabla # 3  
Composición de Colas Originales

| Elemento                           | Porcentaje en Base Húmeda | Porcentaje en Base Seca |
|------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Carbonato de Plomo<br>( $PbCO_3$ ) | 4.01                      | 4.55                    |
| Sulfuro de Plomo<br>(PbS)          | 0.59                      | 0.67                    |
| Carbonato de Cinc<br>( $ZnCO_3$ )  | 40.06                     | 45.53                   |
| Sulfuro de Cinc                    | 3.26                      | 4.77                    |

2. Separación por Tamaño de Partícula. Los porcentajes en peso, retenidos en cada malla, fueron:

Tabla # 4  
Distribución por Tamaño de Partícula  
de Colas Originales

| Muestra  | Porcentaje en peso retenido en la malla |      |      |      |      | Total |
|----------|---|------|------|------|------|-------|
|          | +48                                     | +100 | +200 | +325 | -325 |       |
| 1        | 16.4                                    | 21.9 | 28.0 | 15.5 | 18.2 | 100   |
| 2        | 15.8                                    | 18.9 | 25.7 | 18.8 | 20.8 | 100   |
| 3        | 14.6                                    | 18.8 | 26.2 | 19.2 | 21.2 | 100   |
| 4        | 14.8                                    | 28.7 | 25.6 | 17.0 | 23.9 | 100   |
| 5        | 15.4                                    | 18.6 | 25.8 | 16.9 | 23.3 | 100   |
| Promedio | 15.4                                    | 19.4 | 26.3 | 17.5 | 21.5 | 100   |

Los porcentaje en peso que pasaron cada malla son:

Tabla # 5  
Distribución por Tamaño de Partícula  
de Colas Originales

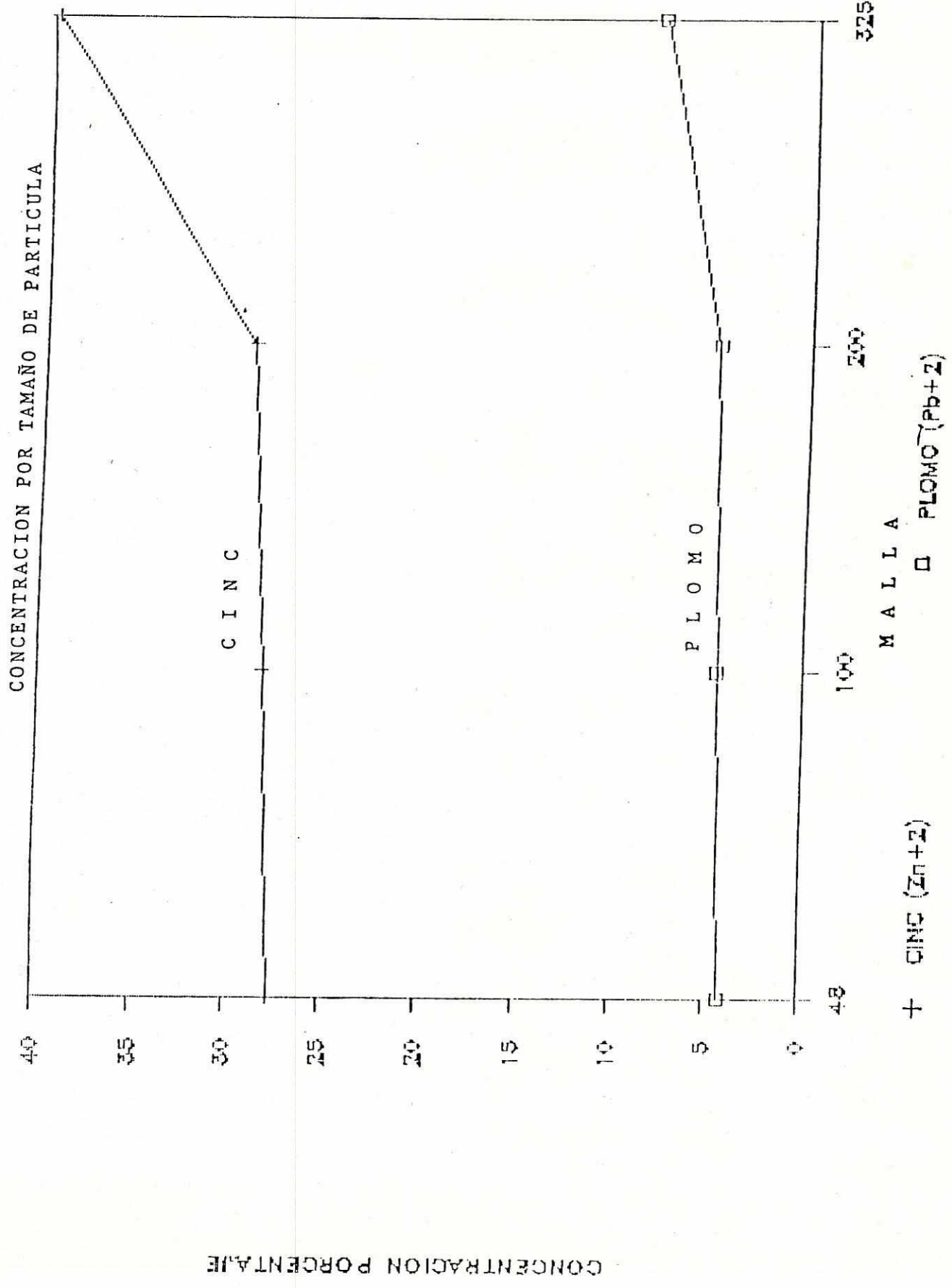
| Muestra  | Porcentaje en peso que pasó la malla |      |      |      |
|----------|--------------------------------------|------|------|------|
|          | -48                                  | -100 | -200 | -325 |
| 1        | 83.6                                 | 61.7 | 33.7 | 18.2 |
| 2        | 84.2                                 | 65.3 | 39.6 | 20.8 |
| 3        | 85.4                                 | 66.6 | 40.4 | 21.2 |
| 4        | 85.2                                 | 66.5 | 40.9 | 23.9 |
| 5        | 84.6                                 | 66.0 | 40.2 | 23.3 |
| Promedio | 84.6                                 | 65.2 | 38.9 | 21.5 |

Los análisis promedio de Plomo y Cinc en base seca para el mineral que pasó en cada malla fueron:

Tabla # 6 (Fig. # 3)  
Concentración por Tamaño de Partícula  
de Colas Originales

| Malla | Porcentaje          |                    |
|-------|---------------------|--------------------|
|       | Plomo ( $Pb^{2+}$ ) | Cinc ( $Zn^{+2}$ ) |
| -48   | 4.20                | 27.65              |
| -100  | 4.53                | 28.23              |
| -200  | 4.87                | 29.05              |
| -325  | 8.09                | 39.83              |

1137



3. Deslamado. Se determinó trabajar con una densidad de pulpa de 66% de sólidos, al determinar que la gravedad específica del mineral a malla 48 es de 4, aproximadamente, y según la fórmula:  $P = W(1-1/R)/(W-1)$  (ver principios de concentración por gravedad) donde:

P = Fracción decimal por peso de sólidos en la pulpa.

W = Gravedad específica del medio sólido.

R = Gravedad específica efectiva de suspensión.

Sabiendo que la R debe ser parecida a la del mineral a flotar y que la máxima R trabajable para un medio con agua, el fluido debe ser cerca de  $W/2$ , se igualó R a  $W/2$ .

Entonces,  $P = 4 (1-1/2)/(4-1) = 0.66$

Los resultados obtenidos fueron:

Tabla # 7

Pruebas de Deslame (Agitación 400 rpm)

| Corrida | Tiempo<br>min. | Mineral no<br>Rebalsado | Análisis Base Seca |                   |
|---------|----------------|-------------------------|--------------------|-------------------|
|         |                |                         | %Pb <sup>+2</sup>  | %Zn <sup>+2</sup> |

Flujo Corriente Superficial: 0.25 l/min.

|   |    |        |      |       |
|---|----|--------|------|-------|
| 1 | 5  | 1683 g | 5.08 | 30.86 |
| 2 | 10 | 1494 g | 5.75 | 34.24 |
| 3 | 15 | 1331 g | 5.83 | 34.47 |
| 4 | 20 | 1286 g | 5.89 | 34.64 |

Flujo Corriente Superficial: 0.5 l/min.

|   |    |        |      |       |
|---|----|--------|------|-------|
| 1 | 5  | 1462 g | 5.26 | 31.24 |
| 2 | 10 | 1295 g | 5.82 | 34.41 |
| 3 | 15 | 1118 g | 5.96 | 34.72 |
| 4 | 20 | 904 g  | 6.07 | 34.83 |

Tabla # 8  
Pruebas de Deslame (Agitación 700 rpm)

| Corrida | Tiempo<br>min. | Mineral no<br>Rebalsado | Análisis Base Seca |                   |
|---------|----------------|-------------------------|--------------------|-------------------|
|         |                |                         | %Pb <sup>+2</sup>  | %Zn <sup>+2</sup> |

Flujo Corriente Superficial: 0.25 l/min.

|   |    |        |      |       |
|---|----|--------|------|-------|
| 1 | 5  | 1434 g | 5.34 | 31.76 |
| 2 | 10 | 1216 g | 5.88 | 34.55 |
| 3 | 15 | 987 g  | 6.03 | 34.79 |
| 4 | 20 | 863 g  | 6.15 | 34.96 |

Flujo Corriente Superficial: 0.5 l/min.

|   |    |        |      |       |
|---|----|--------|------|-------|
| 1 | 5  | 1265 g | 5.80 | 34.32 |
| 2 | 10 | 1084 g | 5.88 | 34.63 |
| 3 | 15 | 936 g  | 6.02 | 34.71 |
| 4 | 20 | 808 g  | 6.10 | 34.89 |

Tomando de base las condiciones de la corrida No. 2 de la prueba de 400 rpm y 0.25 l/min. para realizar las pruebas de flotación, se procedió antes a efectuar un análisis más profundo del mineral deslamado. A continuación se presentan los resultados del análisis, según el procedimiento antes mencionado y por el método Espectrométrico (Fotometría de Emisión de Llama).

Tabla # 9  
Composición de Colas Deslamadas

| Elemento               | Porcentaje en Base Húmeda |       | Porcentaje en Base Seca |       |
|------------------------|---------------------------|-------|-------------------------|-------|
| Plomo ( $Pb^{+2}$ )    | 4.88                      |       | 5.75                    |       |
| Como Oxido             |                           | 4.25  |                         | 5.00  |
| Como Sulfuro           |                           | 0.63  |                         | 0.75  |
| Cinc ( $Zn^{+2}$ )     | 29.10                     |       | 34.24                   |       |
| Como Oxido             |                           | 26.38 |                         | 31.04 |
| Como Sulfuro           |                           | 2.72  |                         | 3.20  |
| Insolubles (Silicatos) | 6.74                      |       | 7.93                    |       |
| Calcio ( $Ca^{+2}$ )   | 3.53                      |       | 4.15                    |       |
| Magnesio ( $Mg^{+2}$ ) | 0.68                      |       | 0.80                    |       |
| Hierro ( $Fe^{+3}$ )   | 0.98                      |       | 1.15                    |       |
| Aluminio ( $Al^{+3}$ ) | 0.78                      |       | 0.92                    |       |
| Cobre ( $Cu^{+2}$ )    | 0.01                      |       | 0.01                    |       |
| Potasio ( $K^{+1}$ )   | 0.05                      |       | 0.06                    |       |
| Sodio ( $Na^{+1}$ )    | 0.04                      |       | 0.04                    |       |
| Cadmio ( $Cd_{+2}$ )   | 0.12                      |       | 0.15                    |       |
| Agua ( $H_2O$ )        | 15.00                     |       | 0.00                    |       |

A partir de los anteriores resultados se deduce la siguiente composición:

Tabla # 10  
Composición de Colas Deslamadas

| Compuesto  | Porcentaje en<br>Base Húmeda | Porcentaje en<br>Base Seca |
|--|------------------------------|----------------------------|
| Carbonato de Plomo<br>( $\text{PbCO}_3$ )        | 5.48                         | 6.45                       |
| Sulfuro de Plomo<br>( $\text{PbS}$ )             | 0.74                         | 0.87                       |
| Carbonato de Cinc<br>( $\text{ZnCO}_3$ )         | 50.60                        | 59.53                      |
| Sulfuro de Cinc<br>( $\text{ZnS}$ )              | 4.05                         | 4.77                       |
| Carbonato de Calcio<br>( $\text{CaCO}_3$ )       | 8.81                         | 10.36                      |
| Carbonato de Magnesio<br>( $\text{MgCO}_3$ )     | 2.35                         | 2.77                       |
| Insolubles (Silicatos)                           | 6.74                         | 7.93                       |
| Oxido Férrico<br>( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )     | 1.82                         | 2.14                       |
| Oxido de Aluminio<br>( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) | 1.48                         | 1.74                       |
| Agua<br>( $\text{H}_2\text{O}$ )                 | 15.00                        | 0.00                       |
| Otros  | 2.93                         | 3.44                       |

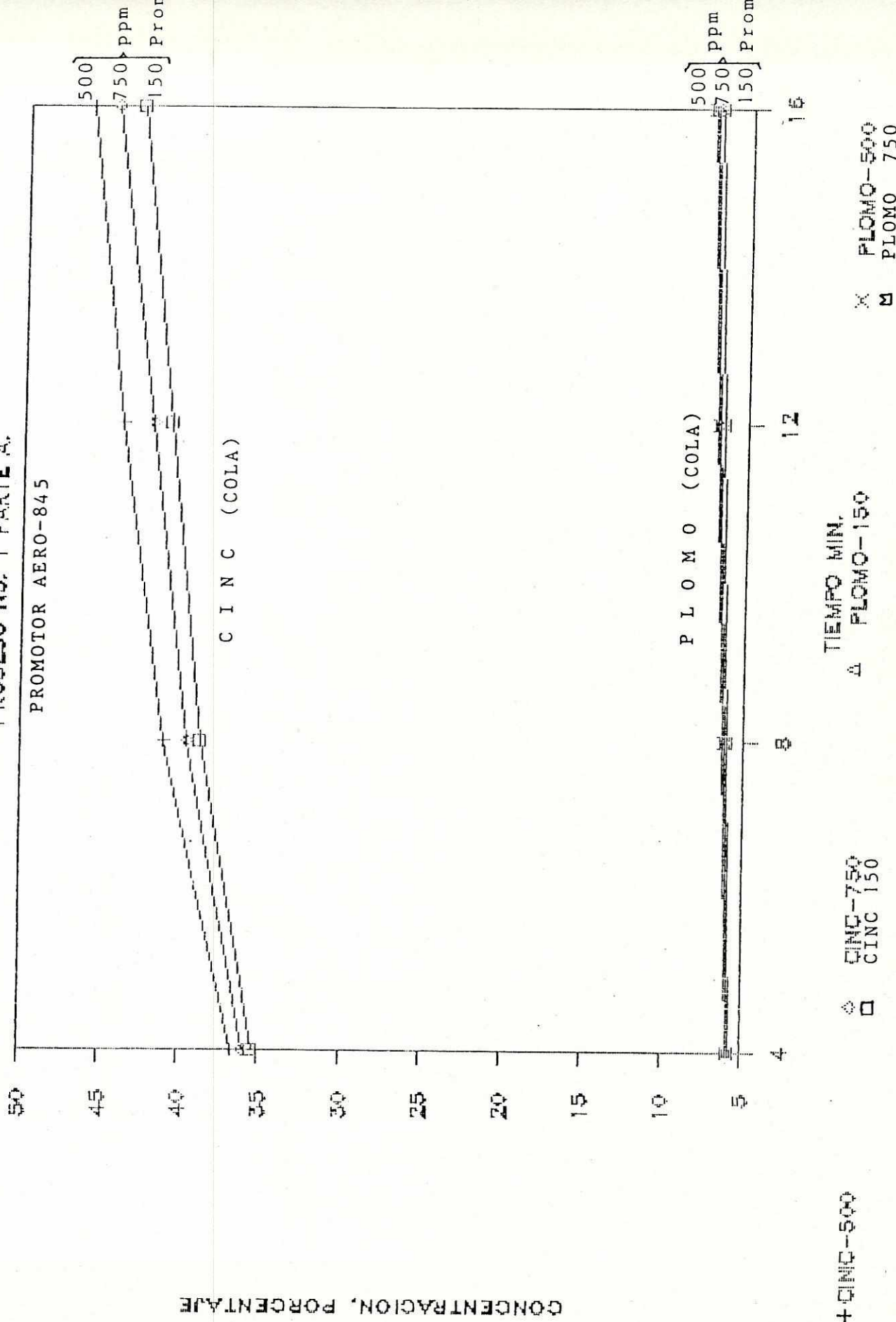
Ver apéndice C para descripción de compuestos minerales.

4. Flotación. La densidad de pulpa con la cual se trabajó, de 25% de sólidos es la recomendada por la literatura para la flotación de un mineral con similares características. Trabajar con otra densidad bajaría un poco la eficiencia hasta un 7%. Como se dijo, anteriormente, se tomó de base el mineral deslamado en la corrida No. 2 de la primera prueba.

Tabla # 11  
Proceso No. 1 Parte A (Figura # 4)

| Tiempo<br>min.               | Peso Mineral<br>en Cabeza<br>Gramos | CABEZA<br>Porcentaje en<br>Base Seca |                  | COLA<br>Porcentaje en<br>Base Seca |                  |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
|                              |                                     | Pb <sup>+2</sup>                     | Zn <sup>+2</sup> | Pb <sup>+2</sup>                   | Zn <sup>+2</sup> |
| 150 ppm de Promotor Aero-845 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |
| 4                            | 125                                 | 2.09                                 | 13.17            | 5.87                               | 35.39            |
| 8                            | 207                                 | 2.12                                 | 13.07            | 6.16                               | 38.77            |
| 12                           | 383                                 | 2.49                                 | 16.55            | 6.59                               | 40.88            |
| 16                           | 348                                 | 2.78                                 | 18.67            | 7.01                               | 42.91            |
| 500 ppm de Promotor Aero-845 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |
| 4                            | 155                                 | 2.04                                 | 12.46            | 5.92                               | 36.69            |
| 8                            | 213                                 | 1.79                                 | 7.93             | 6.36                               | 41.08            |
| 12                           | 266                                 | 1.63                                 | 9.42             | 6.92                               | 43.89            |
| 16                           | 308                                 | 1.57                                 | 12.42            | 7.45                               | 46.16            |
| 750 ppm de Promotor Aero-845 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |
| 4                            | 172                                 | 2.52                                 | 17.13            | 5.89                               | 36.03            |
| 8                            | 227                                 | 2.33                                 | 13.44            | 6.22                               | 39.56            |
| 12                           | 291                                 | 2.35                                 | 15.42            | 6.76                               | 41.97            |
| 16                           | 356                                 | 2.56                                 | 17.42            | 7.27                               | 44.49            |

Fig. 4  
 PROCESO No. 1 PARTE A.



Tomando de base para la parte B, las colas de la prueba con 500 ppm de Promotor Aero-845 con tiempo de 16 min. se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla # 12  
Proceso No. 1 Parte B (Figura # 5)  
Peso = 442 g.

| Tiempo<br>min.              | Peso Mineral<br>en Cabeza<br>Gramos | CABEZA<br>Porcentaje en<br>Base Seca |                  | COLA<br>Porcentaje en<br>Base Seca |                  |  |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|--|
|                             |                                     | Pb <sup>+2</sup>                     | Zn <sup>+2</sup> | Pb <sup>+2</sup>                   | Zn <sup>+2</sup> |  |
| 20 ppm de Promotor Aero-407 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |  |
| 4                           | 36                                  | 63.50                                | 9.23             | 2.48                               | 49.25            |  |
| 8                           | 58                                  | 48.32                                | 23.29            | 1.26                               | 49.31            |  |
| 12                          | 74                                  | 39.87                                | 27.52            | 0.91                               | 49.86            |  |
| 16                          | 86                                  | 34.99                                | 31.51            | 0.74                               | 49.66            |  |
| 35 ppm de Promotor Aero-407 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |  |
| 4                           | 39                                  | 67.94                                | 6.97             | 1.59                               | 49.84            |  |
| 8                           | 53                                  | 54.15                                | 15.58            | 1.07                               | 50.22            |  |
| 12                          | 67                                  | 44.33                                | 22.92            | 0.76                               | 50.26            |  |
| 16                          | 75                                  | 40.70                                | 25.42            | 0.59                               | 52.22            |  |
| 50 ppm de promotor Aero-407 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |  |
| 4                           | 42                                  | 61.07                                | 9.78             | 1.81                               | 49.69            |  |
| 8                           | 63                                  | 44.55                                | 22.17            | 1.20                               | 50.08            |  |
| 12                          | 76                                  | 38.78                                | 26.04            | 0.86                               | 47.24            |  |
| 16                          | 88                                  | 34.57                                | 29.31            | 0.68                               | 48.46            |  |



Al igual que para el Proceso No. 1 se tomó de base el mineral deslamado en la corrida No. 2 de la primera prueba.

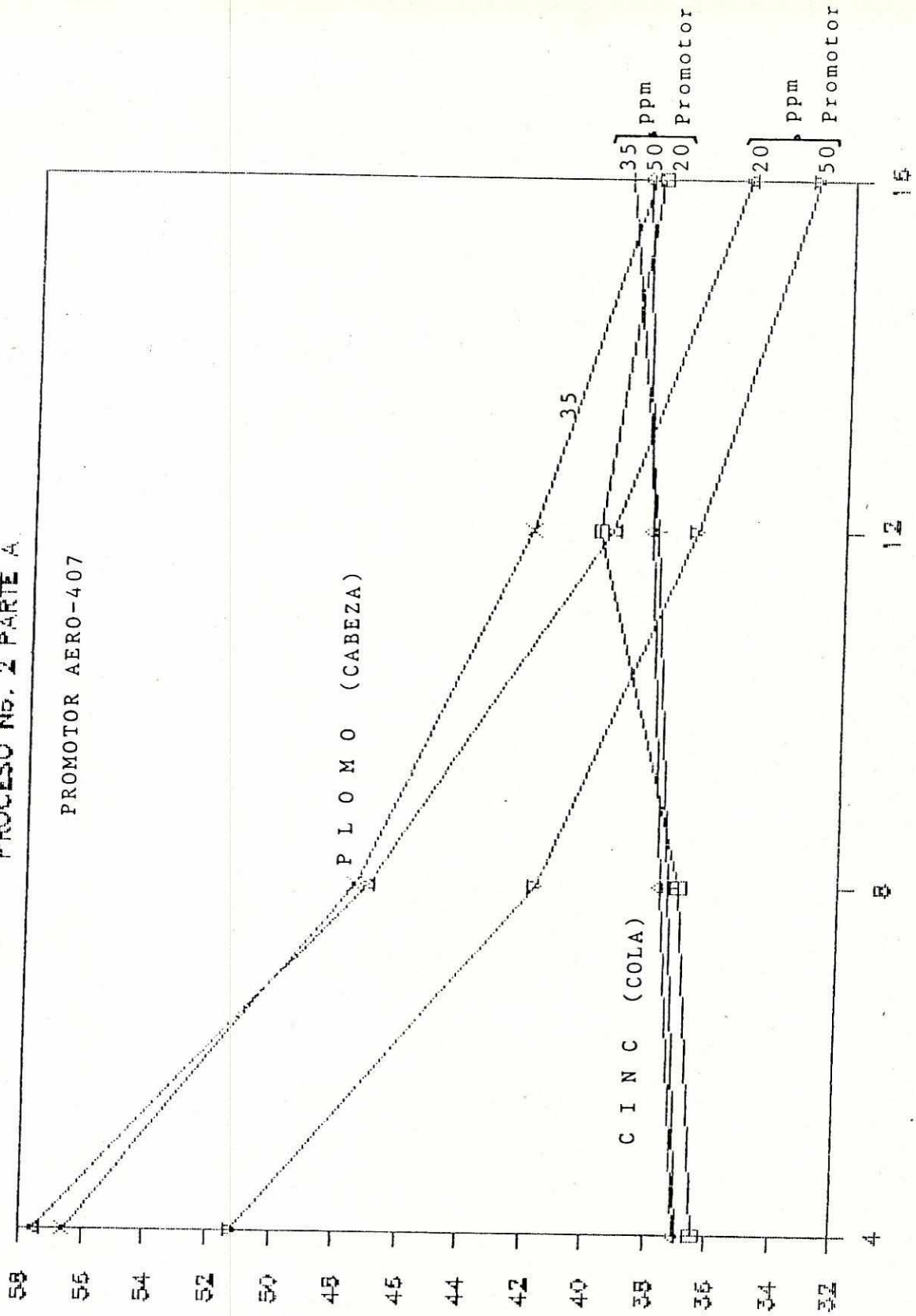
Tabla # 13  
Proceso No. 2 Parte A (Figura # 6)

| Tiempo<br>min.              | Peso Mineral<br>en Cabeza<br>Gramos | CABEZA<br>Porcentaje en<br>Base Seca |                  | COLA<br>Porcentaje en<br>Base Seca |                  |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
|                             |                                     | Pb <sup>+2</sup>                     | Zn <sup>+2</sup> | Pb <sup>+2</sup>                   | Zn <sup>+2</sup> |
| 20 ppm de Promotor Aero-407 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |
| 4                           | 53                                  | 57.60                                | 3.84             | 1.70                               | 36.45            |
| 8                           | 72                                  | 47.12                                | 5.92             | 1.24                               | 37.14            |
| 12                          | 96                                  | 39.48                                | 8.05             | 0.69                               | 37.90            |
| 16                          | 114                                 | 35.36                                | 11.73            | 0.45                               | 38.13            |
| 35 ppm de Promotor Aero-407 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |
| 4                           | 60                                  | 56.63                                | 2.16             | 1.23                               | 36.98            |
| 8                           | 76                                  | 47.52                                | 4.83             | 1.02                               | 37.47            |
| 12                          | 92                                  | 42.07                                | 6.62             | 0.64                               | 38.03            |
| 16                          | 106                                 | 38.39                                | 9.78             | 0.36                               | 39.14            |
| 50 ppm de Promotor Aero-407 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |
| 4                           | 65                                  | 51.21                                | 3.09             | 1.37                               | 37.05            |
| 8                           | 83                                  | 41.74                                | 5.48             | 1.19                               | 37.74            |
| 12                          | 102                                 | 36.82                                | 7.85             | 0.81                               | 38.28            |
| 16                          | 121                                 | 33.15                                | 11.24            | 0.42                               | 38.61            |

# FLOTACION

FIG. 6

PROCESO No. 2 PARTE A



+ CINC-35  
 ◊ CINC-50  
 ◻ CINC-20  
 A TIEMPO MIN.  
 A PLOMO-20  
 X PLOMO-35  
 ▽ PLOMO-50

Tomando de base para la parte B, las colas de la prueba con 20 ppm de promotor Aero-407 con tiempo de 4 min. se obtuvo los siguientes resultados:

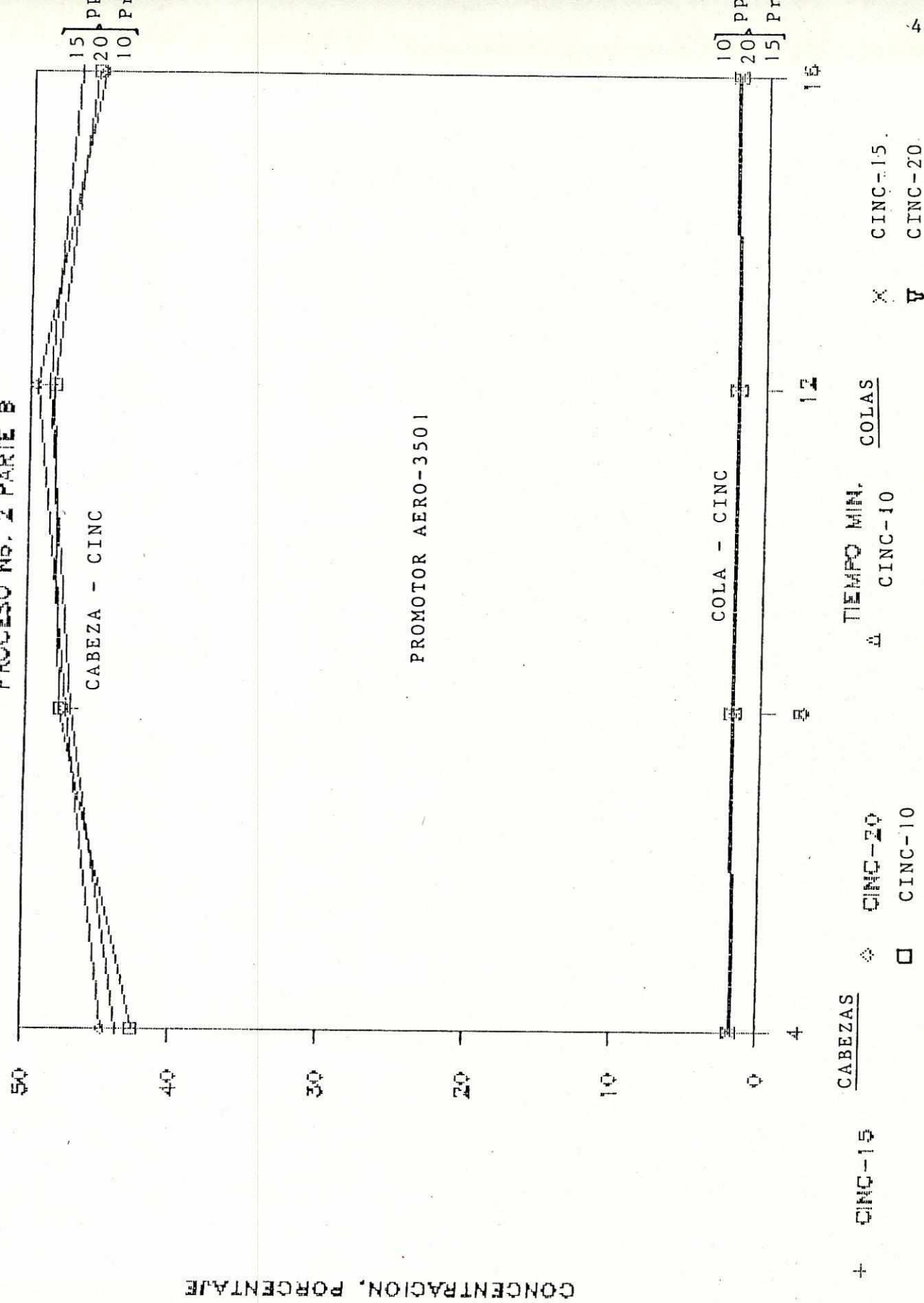
Tabla # 14  
Proceso No. 2 Parte B (Figura # 7)  
Peso = 697 g.

| Tiempo<br>min.               | Peso Mineral<br>en Cabeza<br>Gramos | CABEZA<br>Porcentaje en<br>Base Seca |                  | COLA<br>Porcentaje en<br>Base Seca |                  |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
|                              |                                     | Pb <sup>+2</sup>                     | Zn <sup>+2</sup> | Pb <sup>+2</sup>                   | Zn <sup>+2</sup> |
| 10 ppm de Promotor Aero-3501 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |
| 4                            | 222                                 | 1.73                                 | 42.45            | 1.62                               | 33.59            |
| 8                            | 313                                 | 1.86                                 | 47.74            | 1.53                               | 27.18            |
| 12                           | 398                                 | 1.82                                 | 48.39            | 1.47                               | 20.32            |
| 16                           | 432                                 | 2.03                                 | 45.64            | 1.16                               | 21.37            |
| 15 ppm de Promotor Aero-3501 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |
| 4                            | 247                                 | 1.85                                 | 43.62            | 1.54                               | 32.44            |
| 8                            | 336                                 | 1.91                                 | 46.95            | 1.41                               | 26.52            |
| 12                           | 428                                 | 1.98                                 | 48.72            | 1.17                               | 16.75            |
| 16                           | 486                                 | 2.11                                 | 46.76            | 0.72                               | 12.67            |
| 20 ppm de Promotor Aero-3501 |                                     |                                      |                  |                                    |                  |
| 4                            | 265                                 | 1.92                                 | 44.55            | 1.51                               | 31.38            |
| 8                            | 391                                 | 2.03                                 | 47.34            | 1.25                               | 22.41            |
| 12                           | 472                                 | 2.12                                 | 49.64            | 0.79                               | 8.65             |
| 16                           | 582                                 | 2.17                                 | 45.21            | 0.28                               | 10.27            |

# FLOTACION

FIG. 7

PROCESO No. 2 PARTE B



### C. Discusión

1. Composición Química de Colas. Los resultados obtenidos son, básicamente, los esperados con respecto a la composición del mineral. Puede observarse que las colas están constituidas, principalmente, de óxidos y de insolubles representados, mayormente, por silicatos. Luego de limpiar un poco el material a través del tamizaje y el deslamado, se hizo un análisis más profundo de la composición del mineral. (Ver apéndice C)

La presencia de los compuestos sulfurados es obvia, ya que son los restos de la composición principal del mineral original. Es muy difícil que cualquier separación o concentración se realice en forma total y debido a ello es que existe una participación de Plomo y Cinc en forma de Sulfuros.

2. Separación por Tamaño de Partícula. El porcentaje retenido en cada malla es bastante alto, aunque el aumento en la concentración de Plomo y Cinc se puede observar al reducirse el tamaño de partícula (Fig. # 3). Es bastante significativo el aumento de las concentraciones para un tamaño menor que la malla 325, ya que el Plomo sube hasta 8.09% y el Cinc a 39.83% de unas concentraciones originales de 4.11% y 26.23% respectivamente, pero se estaría perdiendo el 78.5% en peso del mineral al trabajar con este tamaño de partícula.

De las mallas 48, 100 y 200 las concentraciones aumentan levemente y la cantidad de mineral que se va reteniendo es significativa, de donde se decidió que el tamaño de partícula a trabajar sería abajo de la malla 48, ya que aunque no aumentan, grandemente, las concentraciones tampoco se pierde mucho mineral, consiguiéndose limpiarlo de bastante basura y demás compuestos indeseables de tamaño grande.

3. Deslamado. Al analizar cada una de las pruebas de deslame realizadas, vemos que una agitación demasiado grande y un flujo de corriente superficial alto no favorecen un deslame óptimo, ya que ambas situaciones tienden a efectuar

una separación por arrastre de partículas y no por gravedad. Las pruebas con una agitación de 700 rpm mostraron tener mucha pérdida de material y las concentraciones obtenidas no fueron significativamente mayores que con una agitación de 400 rpm. El flujo de la corriente superficial debe mantenerse bajo, para que la separación no se realice por un rebalse sin control, aunque el flujo no debe ser tan bajo para que la corriente tenga la fuerza suficiente para transportar las partículas que floten.

El tiempo de deslame muestra un límite productivo, ya que llega a un punto en que deja de operar el deslame propiamente dicho, porque se sigue derramando material, pero la concentración no aumenta, debido a que la partícula pequeña de los compuestos de Plomo y Cinc son arrastradas en igual forma que los compuestos no deseables.

La prueba efectuada con una agitación de 400 rpm y un flujo de corriente superficial de 0.25 l/min. ofrece los mejores resultados, de donde puede derivarse que las condiciones para ésta, fueron las más adecuadas. Tomando en cuenta la pérdida de mineral y las concentraciones obtenidas de Plomo y Cinc, se considera que la corrida No. 2 es la más apropiada, ya que las siguientes pruebas que representaron más tiempo, no justifican el aumento en las concentraciones con la pérdida de material.

La corrida No. 2 perdió el 25.3% de mineral el cual había sido separado con anterioridad en la malla 48, lo que significa que, después de dicha prueba, se estaría perdiendo el 37.5% con respecto al mineral original. El mineral aumentó en 1.55% en Plomo y en 6.59% en Cinc con respecto al mineral separado en la malla 48 y, en 1.64% en Plomo y en 8.01% en Cinc, con respecto a las colas originales.

Vemos que el efecto del deslame es mucho mayor que la separación por tamaño de partícula, pero se considera que las concentraciones obtenidas, después del deslame, es un producto complementario de ambos métodos.

4. Flotación. Comparando los resultados de ambos procesos, vemos que con el Proceso # 1 se alcanza mayor concentración, aunque ésto podría ser relativo, tomando en cuenta que en el Proceso # 2 se recupera mayor cantidad de mineral.

Analizando el Proceso # 1, tenemos que se pierden cantidades significativas de Plomo y Cinc en la flotación de la parte "A", en la eliminación de los compuestos no deseables como Carbonato de Calcio, Carbonato de Magnesio, Cuarzo y demás. En la prueba con 150 ppm de Promotor se llegó a perder hasta 27% de Cinc a los 16 minutos:

|        |                                 | Porcentaje |
|--------|---------------------------------|------------|
| Cabeza | = 348 g x 18.67% = 65.0 g.      | 27         |
| Cola   | = (750-348)g x 42.91% = 172.5 g | 73         |
| Total  | -----<br>237.5 g                | 100        |

El mejor resultado para la parte "A" fue la prueba con 500 ppm de Promotor Aero-845, dando las mayores concentraciones para Cinc y Plomo. En la Figura # 4 puede apreciarse que la dosificación adecuada para la flotación está entre 150 y 750 ppm. El aumento de concentración para esta parte es directamente proporcional al tiempo de flotación, pero es necesario considerar la cantidad de mineral que se va perdiendo por la Cabeza y que va quedando en la Cola, que es el producto de interés para esta parte.

Para la parte "B", se tomó de base el mineral que resultó en la cola de la prueba con 500 ppm de Promotor Aero-845 de la parte A. Se ocupó un peso de 442 gramos, que sería lo que quedó en la Cola a los 16 minutos en la prueba de la parte "A", paralela así una secuencia, a la pérdida de mineral.

En esta parte el comportamiento de la concentración de Plomo refleja un comportamiento inversamente proporcional al tiempo de flotación, mientras que la concentración de Cinc,

casi permanece constante, como puede apreciarse en la Figura # 5. La dosificación óptima, igual que en la parte anterior, se encuentra en medio del rango de 20 a 50 ppm del Promotor Aero-407. El mejor resultado obtenido se encuentra en la prueba con 35 ppm del Promotor a los 4 minutos, ya que a partir de ese momento cesa la flotación de Plomo y empieza a flotar el Cinc en cantidades significativas.

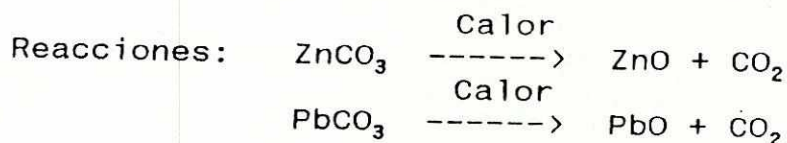
El control del pH es bastante importante, ya que, cuando éste subía un poco se observó mayor rebalse del mineral, principalmente en la parte A, donde el medio ácido deprime, grandemente, la flotación del Plomo y Cinc. Aquí es necesario estar agregando el acidificante, ya que el pH tiende a elevarse por la presencia de los carbonatos. En la segunda parte no fue tan difícil mantener el pH favorecido por la composición de la pulpa. La espuma fue demasiado abundante, pudiendo bajarse la dosificación del reactivo espumante, para evitar demasiado arrastre.

Tomando el resultado final para el proceso No. 1, el producto obtenido de la secuencia de la prueba con 500 ppm de Promotor Aero-845 a los dieciseis minutos en la parte A y la de 35 ppm de Promotor Aero-407 a los cuatro minutos en la parte B, se tiene:

Tabla # 15  
Resultados Proceso No. 1

|                        | Peso Total |     | Plomo Pb <sup>+2</sup> |       | Cinc Zn <sup>+2</sup> | Recupe |       |
|------------------------|------------|-----|------------------------|-------|-----------------------|--------|-------|
|                        | Gramos     | %   | %                      | Peso  | %                     | ración |       |
|                        |            |     |                        |       | Peso                  | %      |       |
| Alimentación           | 750        | 100 | 5.75                   | 43.12 | 34.24                 | 256.80 | -     |
| Concentración de Plomo | 39         | 5.2 | 67.94                  | 26.5  | 6.97                  | 2.72   | 61.46 |
| Concentración de Cinc  | 403        | 54  | 1.59                   | 6.41  | 49.84                 | 200.85 | 78.21 |

A través de un proceso de Calcinación podría aumentarse las concentraciones de Plomo y Cinc, al convertir los carbonatos en óxidos:



En la concentración de Cinc, el Cinc subiría a un 75%, aproximadamente, y el Plomo arriba de 2%. En la concentración de Plomo, el Plomo aumentaría hasta alrededor del 82% y el Cinc arriba del 8%.

En lo que respecta al Proceso No. 2, la parte A tiene un comportamiento similar a la parte B del Proceso No. 1 como se esperaba. Aunque en estas pruebas, la dosificación se define entre el rango de 20 a 35 ppm del Promotor Aero-407, como se puede observar en la figura # 6.

Tomando el mejor resultado de la parte A como base para realizar la siguiente parte, se tomó la prueba con 20 ppm de Promotor Aero-407, con un tiempo de 4 minutos.

En la parte B, se puede deducir que el tiempo óptimo de flotación se encuentra entre los 12 y 16 minutos, según los resultados obtenidos, lo cual puede apreciarse mejor en la figura # 7. La dosificación que mejores resultados dio fue la de 20 ppm de Promotor Aero-3501 que está en el límite recomendado, pudiendo encontrarse el óptimo entre 15 y 20 ppm. En la prueba con 20 ppm del Promotor y 12 minutos de flotación se da la mayor recuperación de Cinc, mostrando la figura # 7, curvas que ofrecen un máximo de concentración de Cinc en la Cabeza para dicha dosificación y tiempo y, un mínimo de concentración para la Cola en ese tiempo, lo cual ilustra, en buena forma, el comportamiento de las pruebas realizadas.

Efectuando los mismos cálculos que se hicieron para el Proceso No. 1 y tomando los mejores resultados del proceso # 2, la prueba con 20 ppm de Promotor Aero-407 a los cuatro

minutos para la parte A y la de 20 ppm de Promotor Aero-3501 a los doce minutos para la parte B, tenemos:

Tabla # 16  
Resultados Proceso No. 2

|                           | Peso Total |     | Plomo $Pb^{+2}$ |       | Cinc  | $Zn^{+2}$ | Recupe-<br>ración<br>% |
|---------------------------|------------|-----|-----------------|-------|-------|-----------|------------------------|
|                           | Gramos     | %   | %               | Peso  | %     | Peso      |                        |
| Alimentación              | 750        | 100 | 5.75            | 43.12 | 34.24 | 256.80    | -                      |
| Concentración<br>de Plomo | 53         | 7.1 | 57.60           | 30.53 | 3.84  | 2.03      | 70.80                  |
| Concentración<br>de Cinc  | 472        | 63  | 2.12            | 10.00 | 49.64 | 234.30    | 91.23                  |

Con el proceso de Calcinación, en la Concentración de Cinc, el Cinc subiría a un 75% y el Plomo arriba de un 3%. En la concentración de Plomo, el Plomo llegaría hasta 67% y el Cinc arriba del 4%.

Realizando una comparación de ambos procesos tenemos:

Tabla # 17  
Comparación de Procesos

|                        | Proceso<br>No. 1<br>% | Proceso<br>No. 2<br>% |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Concentración de Plomo | 67.94                 | 57.60                 |
| Recuperación           | 61.46                 | 70.80                 |
| Calcinación            | 82.00                 | 67.00                 |
| Concentración de Cinc  | 49.84                 | 49.64                 |
| Recuperación           | 78.21                 | 91.23                 |
| Calcinación            | 75.00                 | 75.00                 |

Independientemente del análisis de factibilidad económica, los resultados favorecen al Proceso No. 2, ya que ofrece mejor recuperación para el Cinc, que vendría a ser el elemento de mayor atención por su cantidad.

Los dos procesos empleados fueron los más adecuados encontrados en la literatura y además los recomendados por la compañía Cyanamid, pero este trabajo no pretende ser la última palabra, sino la base para que la Compañía Minera de Guatemala S. A. pueda iniciar sus operaciones para la concentración de Plomo y Cinc a partir de las Colas de Flotación que posee, y, a la vez, continuar experimentando y mejorar cualquier proceso que elijan.

## V. CONCLUSIONES

1. La concentración de Plomo y Cinc aumenta conforme se reduce el tamaño de partícula y, debido a ello, altas velocidades de agitación producirán pérdidas significativas de mineral por arrastre cuando éste no se quiera hacer flotar.
2. Los agentes modificadores del pH y los espumantes son tan importantes en el método de Flotación como el Colector mismo, siendo un factor crítico las dosificaciones de los mismos, por lo cual es necesario experimentar para cada mineral, en forma específica.
3. El tiempo y la concentración de reactivos de Flotación determinará la concentración y recuperación del mineral de interés, por lo que siempre deben considerarse, ambos parámetros, en cualquier análisis, ya que al tomar en cuenta sólo uno de ellos se podrían realizar decisiones erróneas o muy desfavorables.
4. El Proceso No. 1 de Flotación analizado, proporciona una mayor concentración para el Plomo, mientras que el Proceso No. 2, permite una mayor recuperación del Plomo y el Cinc.
5. La decisión sobre cualquier alternativa de Proceso de Flotación debe hacerse con base en un estudio de factibilidad económica que involucre, no sólo la comercialización del mineral, sino también el costo que conllevaría cada proceso.
6. Este trabajo proporciona las bases necesarias para iniciar la concentración industrial de Plomo y Cinc, permitiendo que se mejoren los procedimientos en forma experimental.

## VI. RECOMENDACIONES

1. Trabajar con un tamaño de partícula malla 48, ya que si se utiliza una malla menor se haría innecesariamente con efectos negativos, porque al deslamar podría perderse cantidades significativas de Plomo y Cinc por arrastre y, además, el tamaño sugerido presenta las mejores cualidades para los Colectores recomendados en este trabajo, según la literatura.
2. En cualquier operación o prueba de flotación, emplear siempre agitación y aireación, ya que son elementos muy importantes en la formación de espuma.
3. Experimentar con velocidades de agitación menores que las empleadas en la presente investigación, debido a que se determinó que los métodos de deslamado y flotación son favorecidos por agitaciones moderadas. Estas deben permitir derrames controlados pero no muy lentos.
4. Realizar un acondicionamiento de los reactivos de flotación con el mineral, en un agitador, antes de la flotación. Se ha encontrado que se obtienen mejores resultados acondicionando primeramente y, después, flotando.
5. Calentar la pulpa, en lo posible, ya que la mayoría de los minerales flota con más facilidad y mayor selectividad en agua tibia que en fría y además, en circuitos de agua tibia se ha descubierto que el consumo de reactivos es, generalmente, menor que en los de agua fría.

## VII. BIBLIOGRAFIA

1. Anderson, A. & J. E. Sparkman. Review Sedimentation Theory. Chemical Engineering. November 2. 1959
2. Farnsworth, M. & C. Kline. Zinc Chemicals. 1st ed. International Lead-Zinc Research Organization, Inc. New York. 1973
3. Freyberger, Wilfred. Flotation of Ores Containing Lead, Zinc or Copper. American Cyanamid Company. April 18. New York. 1969
4. Fundamentos de la Flotación. The Dow Chemical Company. Coral Gables, Florida. 1970
5. Galmés, J. Química Inorgánica. 6ta Edición. Salvat Editores, S.A. Barcelona. 1975
6. Gordillo, Rolando. Plantas Procesadoras de Minerales de Guatemala. Publicado por el Ministerio de Energía y Minas. Guatemala. 1986
7. Hurlbut & Klein. Dana's Manual of Mineralogy. 18th ed. John Wiley & Sons. New York. 1971
8. Mathewson, C. Zinc: The Science and Technology of the Metal its Alloys and Compounds. Hafner Publishing Company, Inc. New York. 1970
9. Métodos Estándar de Ensayos Empleados para Muestras de Mina Caquipec. Compañía Minera de Guatemala. S. A. Guatemala. 1969
10. Mottana, A.; R. Crespi & G. Liborio. Simon & Schusters Guide to Rocks & Minerals. 2nd ed. Simon & Schusters, Inc. New York. 1978
11. Perry R. & C. Chilton. Manual del Ingeniero Químico. 2da. edición en español. McGraw-Hill Latinoamericana, S.A. Bogotá. 1982
12. Ramdohr, Paul. The Ore Minerals and Their Intergrowths. 2nd ed. Pergamon. 2 v. 1981
13. Mining Chemicals Handbook. American Cyanamid Company. New York. 1986
14. Solids Handling. Chemical Engineering McGraw-Hill Pub. Co. New York. 1981

15. Taggart, A. Handbook of Mineral Dressing, Ores and Industrial Minerals. 1st ed. John Wiley & Sons, Inc. New York.  
1947
16. Weining, A. & W. Schoder. Technical Methods of Ore Analysis for Chemists and Colleges. 11th ed. John Wiley & Sons. New York  
1958

## APENDICES

### A. Equipo Usado en Procesos de Separación y/o Concentración de Minerales en Húmedo

1. Depósitos de Limo: Se trata de deslamadores no mecánicos para efectuar separaciones en tamaños finos de arena. Generalmente, las diferentes formas son las mismas y dependen para la separación sobre la utilización de las diferentes medidas dentro del agua. La diferencia específica entre ellos recae en el métodos de presentación para la corriente ascendente. DEPOSITO-CORRIENTE-SUPERFICIE es mostrado diagramáticamente en la figura # 8. El alimento es introducido sobre la planta de alimentación "a". La acción aparente es la corriente baja flotando a lo largo de la superficie del cuerpo de la pulpa dentro del depósito.

Considerando un tanque como éste, el cual está lleno con pulpa, enfocando el instante antes que ocurra el derrame muestra que hay una velocidad ascendente en el tanque, de la magnitud  $V=Q/bl$ , donde Q es el flujo volumétrico. Una vez el derrame (sobreflujo) ha empezado, a menos que la corriente de alimentación flote como una unidad, esta misma velocidad ascendente persiste. Desde aquí la partícula sacada de la corriente de la superficie, como su velocidad disminuye, debe sedimentar en contra de esta corriente ascendente, y la velocidad determina la medida de un gran número de partículas que pueden ser derramadas. (15)

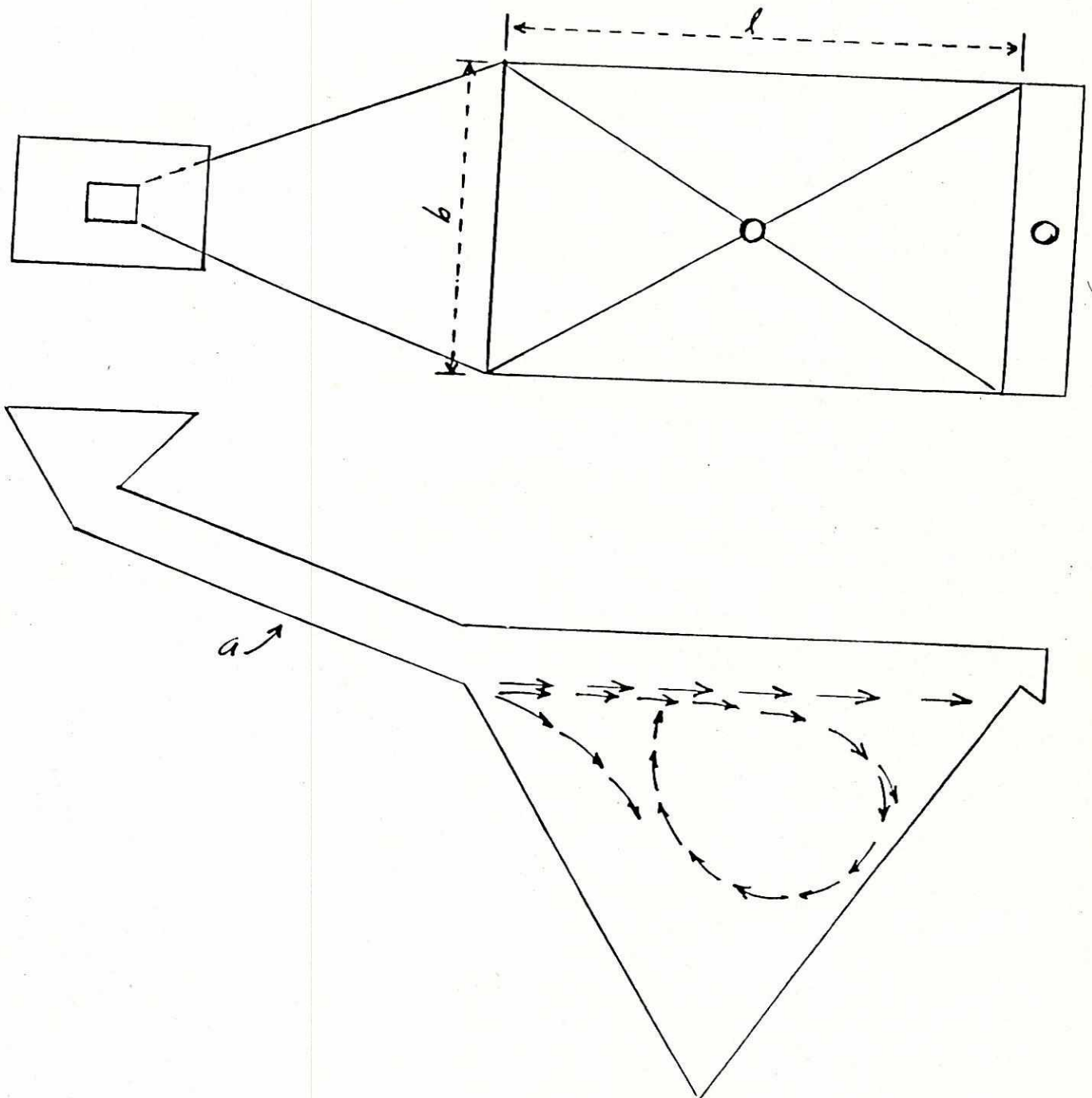


Figura # 8  
Clasificador de Corriente Superficial

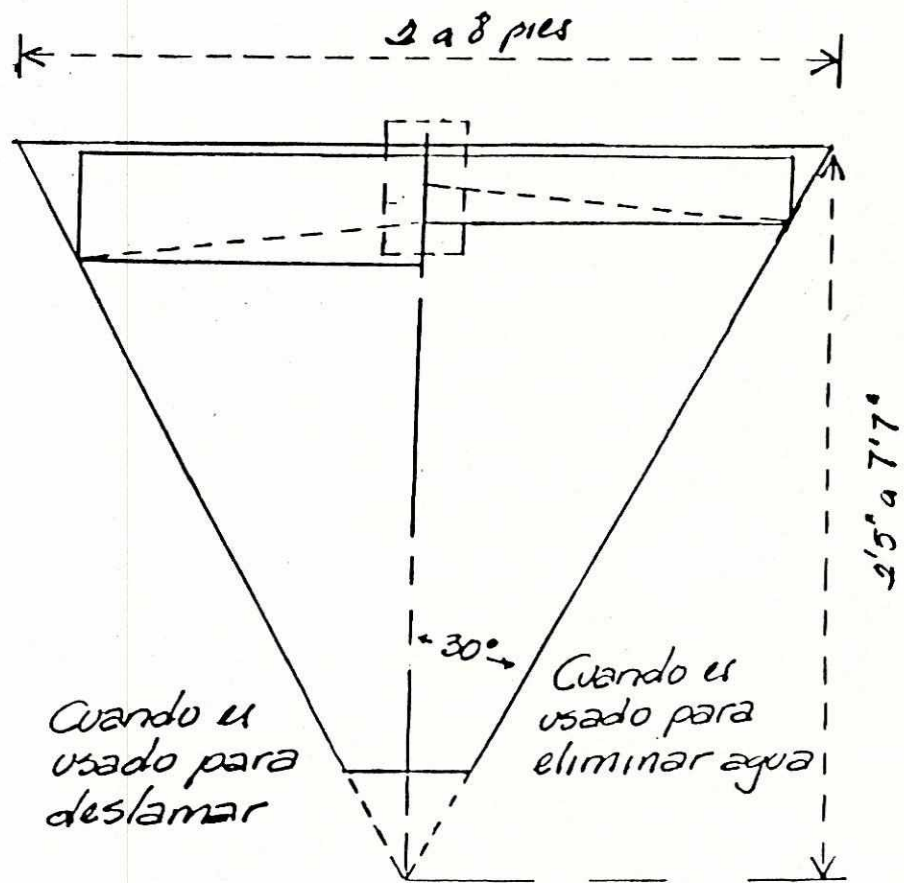


Figura # 9  
Tanque Callow

2. Clasificador de Lavado. Los clasificadores utilizados para tamaños más gruesos y arenas intermedias y gravas son, de acuerdo al uso decreciente: a) depósito de arena, usualmente de tipos de descarga automática; b) corriente completa y sedimentadores de corriente en superficie; c) lavadero o tipo pileta; d) clasificadores mecánicos; y e) clasificadores hidráulicos de sedimentación posterior.

Depósitos de Inclinación: La figura # 10 muestra una forma de depósito de inclinación ampliamente utilizado en la limpieza de arena. Depósito "a", el cual es piramidal con un mínimo lado de inclinación de  $50^\circ$  (mejor si es de  $60^\circ$  ó  $65^\circ$ ) es sostenido cerca de la parte trasera sobre cuchillas, y es balanceada por brazos de oscilación "c", llevado al final del marco "d". Adjunto a la caja, el mecanismo será arreglado que como "d" se incline hacia la izquierda, el contador de peso "c" es aumentado y el espiche de arena abre y lo deja caer lejos de "e". Cuando el depósito esté libre de arena y su peso haya bajado el contador de peso "c" restaura la posición con el espiche de apertura presionándolo contra el tope cerrador. Esto puede ser un pedazo de faja o cinta suave, estirado por la parte de atrás o una cinta cónica, madera o un tapón de metal. (15)

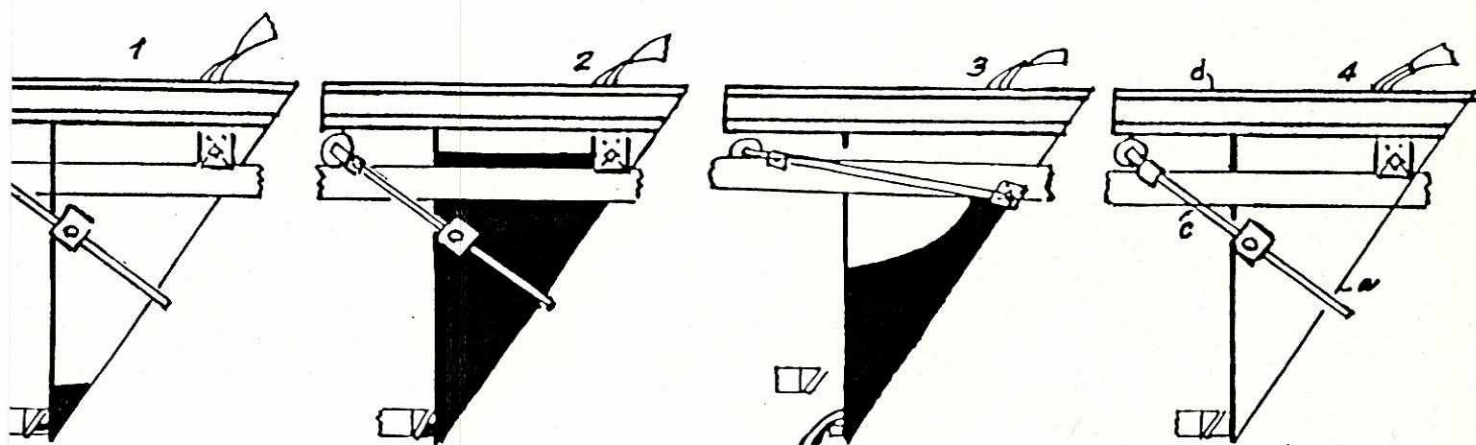


Figura # 10  
Depósitos de Inclinación

3. Máquinas de Flotación. Las máquinas que más se utilizan en la actualidad en operaciones de sulfuros, carbón minerales no metálicos son la Fagergren, la D-R Denver y la Agitair. Con frecuencia, se utiliza una máquina para la separación de primera etapa y otra para aclarar.

Esas máquinas proporcionana aireación y agitación mecánica por medio de una hélice giratoria sobre un eje vertical. Además las celdas Agitair y Denver utilizan también aire de un soplador para contribuir en airear la pulpa.

En la máquina Fagergren (ver figura # 11), la pulpa se impulsa hacia arriba a un rotor "A" mediante la porción inferior del rotor "B". Simultáneamente, el extremo superior del rotor "C" absorbe aire y lo hace descender por la tubería vertical "D" para que se mezcle bien con la pulpa, dentro del rotor "E". A continuación, la pulpa aireada se expulsa mediante una gran fuerza centrífuga "F". La acción de corte del estator "G", una jaula estacionaria que se ajusta estrechamente en torno al rotor, divide el aire en burbujas diminutas. Esta acción distribuye uniformemente un gran volumen de aire en la forma de burbujas diminutas en todas las parte de la celda.

En la máquina D-R Denver (ver figura # 12), la pulpa entra por la parte superior de la artesa de recirculación "A" mientras que entra aire a baja presión por el pasaje de aire "B". La pulpa y el aire se mezclan íntimamente y se expulsan hacia el exterior, mediante la hélice giratoria "C" a través del difusor estacionario "D". Las partículas de mineral recubiertas de colector se adhieren a las burbujas que se elevan y llegan a la parte superior de la celda, de donde se retiran en el producto de la espuma.

En la máquina de flotación Agitair (ver figura # 13), el propulsor es un disco plano, cubierto de caucho, con dedos de acero que se extienden hacia abajo desde la periferia. Un estabilizador recubierto de caucho o "pelador de burbujas" elimina los puntos muertos en la zona de agitación y mejora el contacto entre las burbujas y el mineral. El grado de

aireación se controla mediante la regulación de la presión del aire en cada celda con una válvula de aire individual. Se proporciona aire a razón de 1.5 lb/pulgada<sup>2</sup>. En las plantas antiguas se pueden encontrar muchos otros tipos de celdas de flotación. La Callow carece de partes mecánicas. La pulpa mineral se suspende y airea por medio de burbujas de aire que atraviesan un medio poroso (casi siempre una estera de tejido) que forma el fondo de la celda. En la celda MacIntosh. El aire se introduce a través de un medio poroso arrollado sobre una tubería giratoria cerca del fondo de una artesa en forma de V. La celda Forrester es una artesa en forma de V con aire introducido por tuberías verticales de 1/2 a 1 pulgada, espaciadas a intervalos longitudinales de 4 a 6 pulgadas.

Capacidades: Los tonelajes manejados por los equipos de flotación varían con la densidad de la pulpa de alimentación y el tiempo de flotación (tiempo de residencia) que se requiere para la preparación y el aclareo. El número de celdas que se requieren para un trabajo específico se puede calcular como sigue:

$$\text{No. de Celdas} = \frac{T \times \text{tpd} \times d}{V \times 1440}$$

- en donde: T = tiempo de flotación, min.  
 tpd = toneladas de mineral seco tratadas por día de 24 horas.  
 d = Volumen, pies<sup>3</sup> de pulpa (de mineral y agua) que contiene 1 tonelada de sólidos secos.  
 V = Volumen, pies<sup>3</sup>, de una celda.

En la actualidad, en las instalaciones de flotación nuevas o remodeladas, se observa una tendencia a utilizar las unidades de los tamaños mayores, sobre todo en las plantas grandes, donde las cantidades de minerales que se van a tratar son de 500 ton/h o más; sin embargo, para las operaciones de limpieza se prefiere, a veces, las máquinas menores. (11)

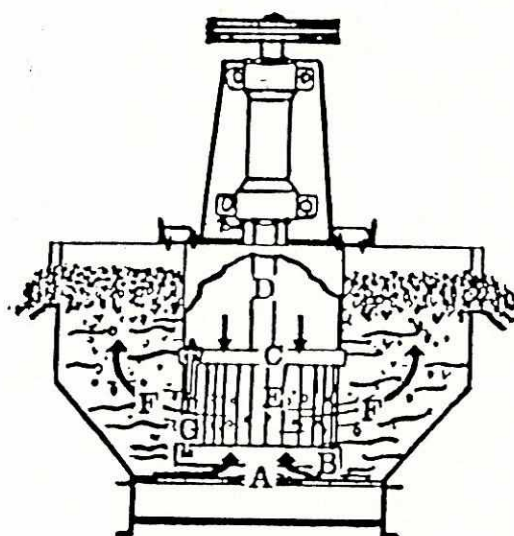


Figura # 11  
Máquina de Flotación Fagergren

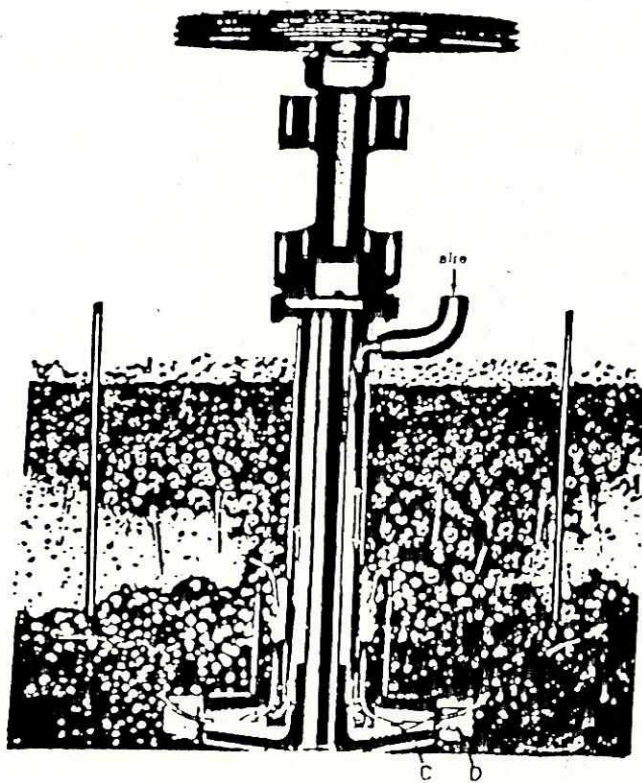


Figura # 12  
Máquina de Flotación D-R Denver

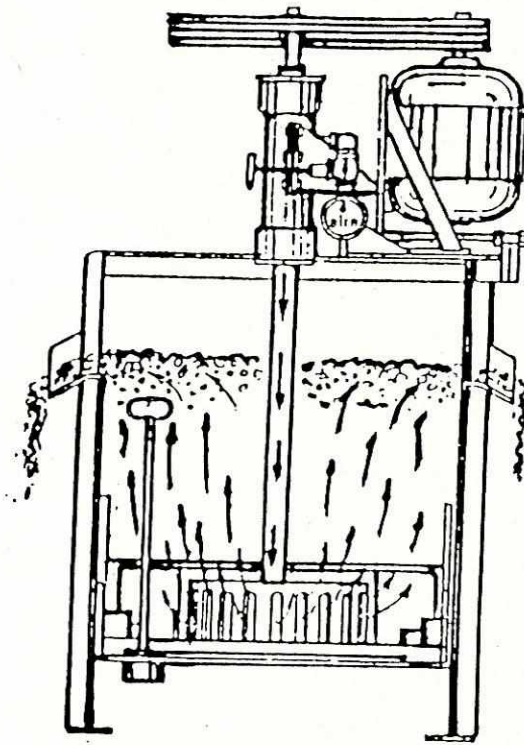


Figura # 13  
Máquina de Flotación Agitair

Tabla # 18 (11)

Capacidades aproximadas de celdas de flotación, toneladas de alimentación seca por hora con la pulpa con un contenido de 33% de sólidos, minerales de densidad relativa de 3.0

| Celdas                                  | Volumen de celda pies <sup>3</sup> | HP de Motor por celda | 8 Celdas                 |     |     | 12 Celdas |     |     |
|---|------------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----|-----|-----------|-----|-----|
|   |                                    |                       | Tiempo de Flotación, min |     |     |           |     |     |
|   |                                    |                       | 4                        | 8   | 12  | 4         | 8   | 12  |
| Agitair # 120A,<br>120 por 102 pulg.    | 375                                | 30* ó<br>40*          | 594                      | 297 | 198 | 891       | 445 | 297 |
| D-R Denver # 300,78<br>por 78 pulg.     | 300                                | 25*                   | 475                      | 238 | 158 | 713       | 357 | 238 |
| Fagergren # 128**,<br>120 por 120 pulg. | 400                                | 30                    | 634                      | 317 | 211 | 950       | 475 | 317 |
| Booth # 120                             | 430                                | 60                    | 681                      | 341 | 227 | 1020      | 512 | 341 |

\* Excluyendo la potencia para el soplador de aire auxiliar.

\*\* Existe también en un tamaño de 120 por 90 pulg. con un volumen de 300 pies cúbicos para aplicaciones de trabajos pesados.

4. Sedimentadores o Espesadores: Son tanques de tal capacidad que el tiempo requerido para llenarlos con la razón de flujo de la corriente a ser expresadas es suficiente para permitir a la superficie más alta del sólido a sedimentar a una distancia segura abajo del nivel de sobreflujo y la capa más baja del sólido sedimentado se consolide a la consistencia deseada. Están provistos con un vertedero de sobreflujo y una o más descargas abiertas en el fondo localizadas para sacar los sólidos sedimentados uniformemente. Están contruídos para operaciones continuas o intermitentes. El tipo continuo puede ser descargado por gravedad o mecánicamente. Espesadores intermitentes han encontrado su mayor uso en las

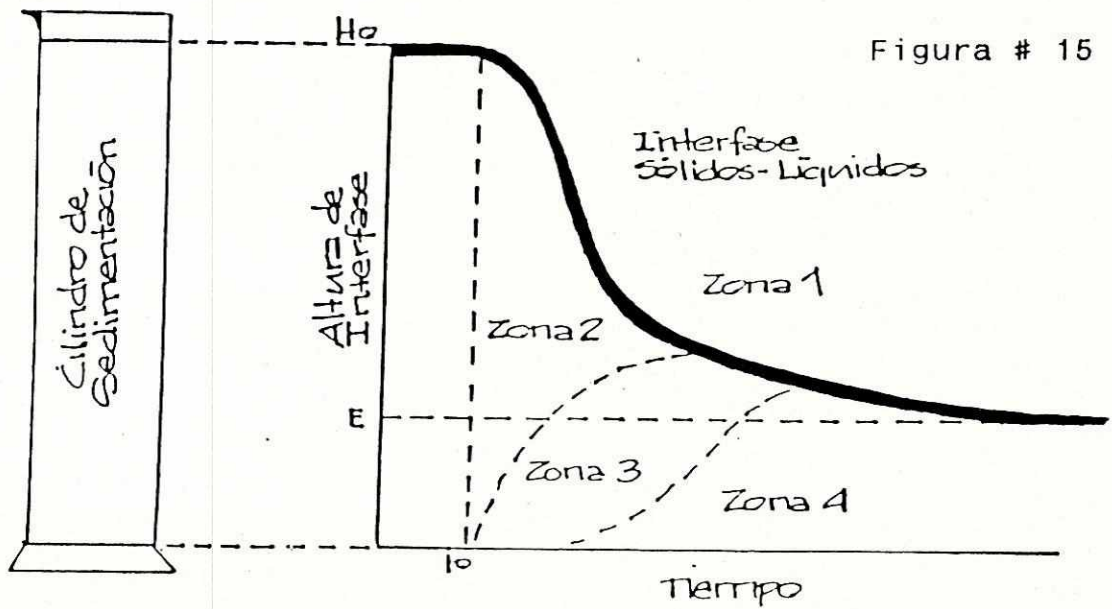
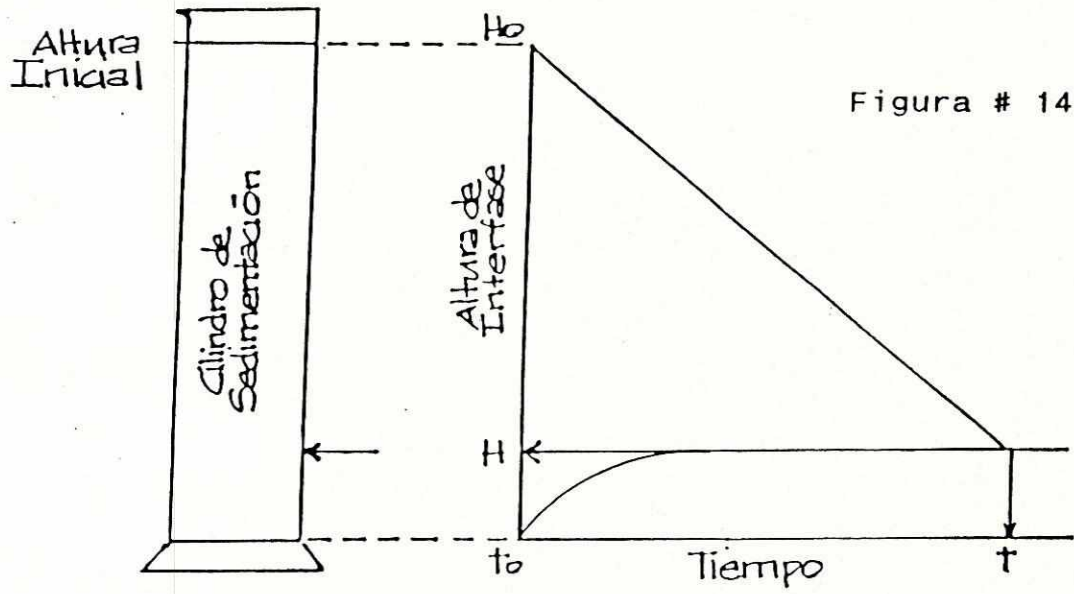
minas de oro; espesadores continuos, primero el de la gravedad por descarga pero últimamente el tipo mecánico son casi universales.

Diseño de Sedimentadores para Pulpas Delgadas: Datos para diseño de sedimentadores con pulpas delgadas son obtenidos por varios métodos. Un lote de prueba de sedimentación sobre una pulpa delgada resulta en una curva similar a la figura # 14. En tal lote de prueba, la interfase sólidos fluidos se forma a lo largo de la parte baja con una gradual mejoría en la claridad. En tiempo "t", puede ser asumido que todas las partículas de un tamaño más grande que el caracterizado por la razón sedimentación  $(H_0 - H)/(t - t_0)$  habrá sedimentado. Si la turbidez del licor sobrenadante en este tiempo es satisfactorio y, si la suspensión de sólidos alimentadas es conocida para contener una cantidad negligible de partículas finas más pequeñas que el tamaño caracterizado, entonces los datos del lote de sedimentación pueden ser usados para diseñar. La razón de sedimentación anterior es convertida a pies/hora y sustituida en la siguiente ecuación:

$$\text{Area de Sedimentador} = \frac{\text{A razón de sobreflujo}}{\text{Razón de Sedimentación}}$$

Donde la razón de sobreflujo es igual a la razón de alimentación menos la razón de descarga y es expresada en pies cúbicos/hora.

Diseño de Sedimentadores para Pulpa Gruesa: En lotes de prueba de sedimentación, una pulpa espesa es caracterizada por el desarrollo de una interfase sólidos-licor (solución acuosa) en la parte alta de un sedimentador graduado. Después de un período de floculación breve " $t_0$ " el cual puede o no estar presente, un período de sedimentación constante es observado, seguido por un período de una razón de sedimentación decreciente. La posición de la interfase sólidos-licor es indicada en la figura # 15. Esta curva de sedimentación es dividida en cuatro partes o zonas, las cuales son mostradas en la figura # 16.



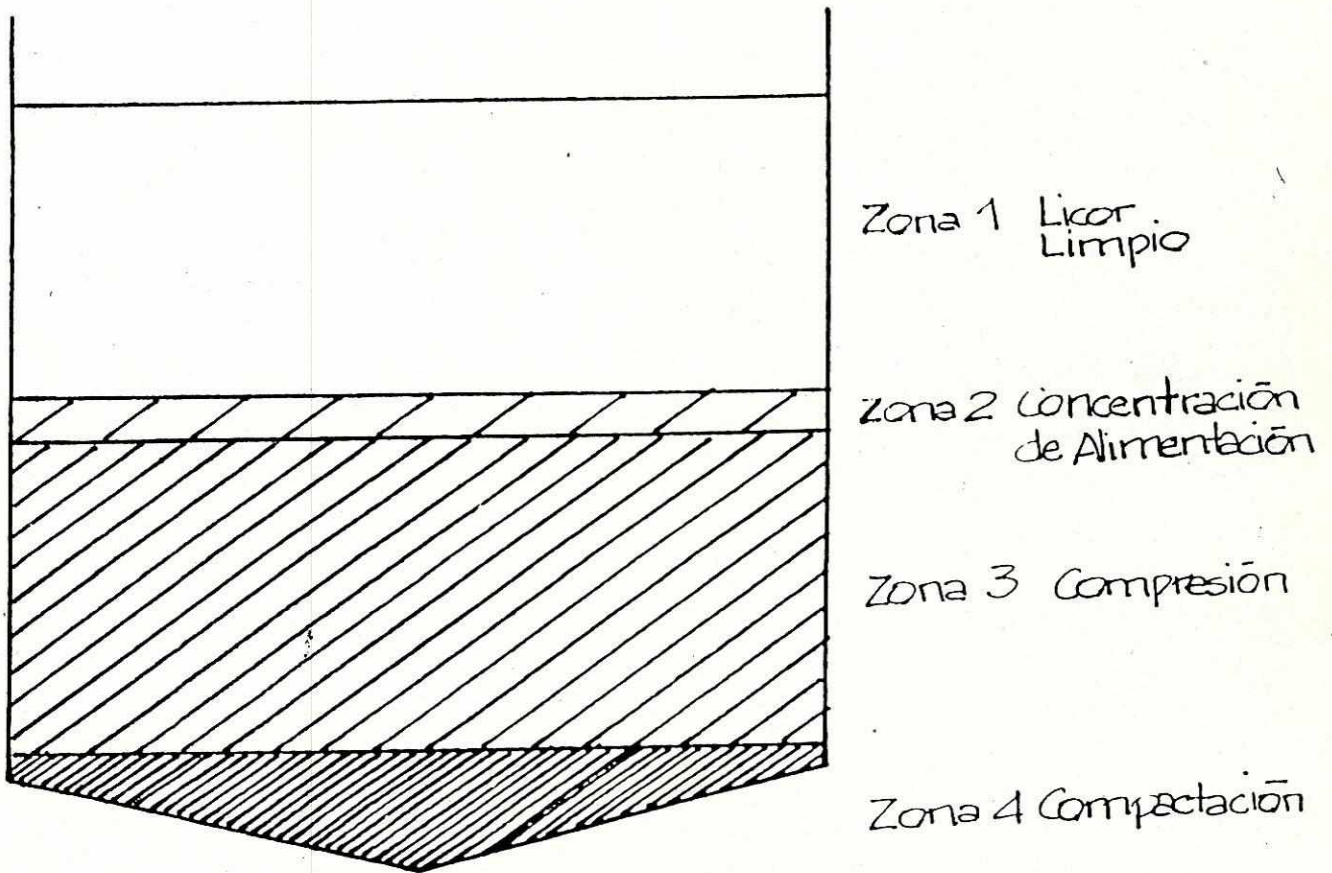


Figura # 16

Coe y Clevenger presentaron el primer método exitoso para la estimación del área requerida para pulpas espesas. Ellos asumieron que la razón de sedimentación de una pulpa es una función únicamente de los sólidos locales contenidos. Ellos más adelante reconocieron que la pulpa de sedimentación pasa a través de todas la zonas de concentración de la alimentación a la concentración de descarga.

Coe y Clevenger calcularon los requerimientos de área:

$$A = \text{razón de sobreflujo}/R$$

Donde "R" es la razón de sedimentación en pie/hora y la razón de sobreflujo está en pie hora.

La diferencia de esta ecuación con la de pulpas delgadas es que ésta no refiere la razón de sobreflujo a la del sedimentador actual sino que al volumen de líquido que permanece para ser retirado de los sólidos que sedimentan en varias concentraciones entre la alimentación y la descarga.

Es usual referir la unidad de área requerida "A<sub>u</sub>" de una pulpa o pasta aguada. Esto puede ser definido como área requerida para sedimentar una pasta aguada con una razón de alimentación estable de una tonelada de sólidos secos por 24 horas. Sobre esta base, la anterior ecuación puede ser modificada a la siguiente:

$$A_u = \frac{1.333 (F_w - D_w)}{(G.E.) (R)} = \frac{1.333 (F_1 - D_1)}{R}$$

Donde "F<sub>w</sub>" es la razón en peso en cualquier concentración entre la alimentación y la descarga, "F" razón volumétrica entre la alimentación y la descarga, "D<sub>w</sub>" razón en peso de sólidos en la descarga, "D<sub>1</sub>" razón volumétrica en la descarga y "G.E." gravedad específica. (1)

## B. Detalle de Análisis Químico de Colas (9)

### 1. Métodos Empleados.

#### 1.1 Determinación de Plomo.

a) Pesar exactamente 0.5 gramos de la muestra y poner el material limpiando bien el platillo dentro de un vaso de precipitación de 400 ml. Para limpiar el platillo úsese una brochita de camello.

b) Humedecer el material con unas gotas de agua para disgregarlo y evitar que éste se pegue en el fondo del vaso durante la operación. Póngase 10 ml de ácido Clorhídrico fumante y coloque el vaso sobre la plancha caliente hasta que se disuelvan los óxidos y carbonatos. Sin retirar el vaso de la plancha caliente agregue 10 ml. de ácido Nítrico fumante y deje hervir la solución hasta que desaparecen los humos amarillos de ácido Nítrico. A continuación añada con la punta de una espátula aproximadamente 1/2 gramo de Clorato de Potasio con sumo cuidado y continúe hirviendo la solución hasta que los sulfuros estén totalmente disueltos. Si existen insolubles, éstos no se disolverán. Retire el vaso de la estufa o plancha caliente. Tape el vaso con un vidrio de reloj pyrex y con sumo cuidado agregue 10 ml. de ácido Sulfúrico fumante y también agregue cuidadosamente despacio 10 ml. de ácido Clorhídrico fumante. Coloque el vaso tapado nuevamente sobre la plancha caliente y déjelo hervir durante largo tiempo. Cuando el vaso esté lleno de humos blancos destape el vaso y permita que la solución continúe hirviendo hasta que por largo rato salga una columna de humos blancos y el volumen de la solución se reduzca pero evitando que el material de la mezcla llegue a secarse. Si se observáse que existen muchos insolubles, entonces es conveniente agregar unas 5 gotas de ácido Fluorhídrico. Para esta operación se retira el vaso de la plancha cuando se está expulsando los humos blancos y se deslizan las gotas del Fluorhídrico por las paredes del vaso y teniendo éste tapado. Continúe la evaporación y como se dijo anteriormente sin que se llegue a la sequedad del producto del vaso. Si se observare durante la operación de evaporación

del ácido Sulfúrico que la solución se pone de color negro, es indicio que existen materias orgánicas dentro de la solución y bastará agregar 2 gotas de ácido Nítrico con cuidado para que la solución se clarifique. Terminada la operación de evaporación, retire el vaso de la plancha caliente y deje que el vaso se enfríe.

c) Cuando el vaso esté completamente frío agregue 30 ml. de agua destilada y 3 ml. de Peróxido de Hidrógeno (agua oxigenada). Ponga el vaso en la plancha caliente y permita que éste hierva durante 3 minutos. Retire el vaso de la plancha caliente y coloque el vaso dentro de un azafate de madera que contenga agua fría en circulación hasta la altura del volumen de solución. Si es posible ponga hielo para obtener un enfriamiento perfecto.

d) Filtración: Filtre la solución por un disco de papel Munktell de 12-1/2 centímetros de diámetro (# 0 para concentrados y # 3 para cabezas y puntas). En la filtración observense las siguientes precauciones. Decántese la solución clara primero, dejando en el fondo del vaso el precipitado de Sulfato de Plomo. Lave las paredes y el precipitado del vaso tres veces con poquita agua destilada, dejando siempre en el fondo el precipitado de Sulfato de Plomo. Lave el papel filtro cinco veces con una solución al 5% de ácido Sulfúrico fría y luego una vez con agua destilada fría. Cuando el papel filtro esté ya libre de solución, retírelo con cuidado del embudo y pártalo en dos colocándolo de nuevo en el vaso original.

e) En el vaso que contiene el Sulfato de Plomo y papel filtro agregue 10 ml. de Acetato de Amonio concentrado y 50 ml. de agua destilada. Ponga el vaso en la plancha caliente y permita que hierva durante 10 minutos de temperatura moderada tapando con un vidrio de reloj pyrex. Llene el vaso con agua caliente hasta dos tercios del volumen del vaso y deje hervir durante 15 minutos. En estos momentos la solución está ya lista para la titulación.

f) Llene una bureta de 50 ml. con subdivisión de un décimo de mililitro. Reserve unos 20 ml. de la solución

que se va a titular y proceda a titular lentamente hasta llegar al punto, luego agregue los 20 ml. de reserva y siga escurriendo la solución de Molibdato de Amonio hasta obtener el punto final, probando en una plaqueta fabricada de parafina y óxido de cinc, sobre la cual se pondrán con un gotero gotas de solución de ácido Tánico en fila, para facilitar el trabajo. El punto final es una ligera coloración amarilla. Deber fijarse el punto cuando se prepare la solución valorada.

Preparación de las soluciones para la determinación de Plomo.

Solución concentrada de Acetato de Amonio. Mezcle cuidadosamente suficiente cantidad de Acetato de Amonio CP. Para hacer un litro saturado de la sal, es decir hasta que ya no se disuelva más sal. Agregue 75 ml. de ácido Acético y mezcle bien la solución. Esta solución durará por tiempo indefinido. En caso de no tener a mano sal de Acetato de Amonio se puede preparar también mezclando con sumo cuidado y lentamente 1,000 ml de Hidróxido de Amonio con 1,200 ml. de ácido Acético.

Solución de Molibdato de Amonio valorada. Pese exacta y cuidadosamente 4.26 g de sal  $((\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ . Disuelva la sal en un vaso con agua destilada y luego eche la solución dentro de un matraz hasta la marca aforada de 1,000 ml. Lave el vaso varias veces con agua destilada y llenando el matraz hasta la marca del cuello. Se recomienda dejar madurar la solución durante unos días antes de proceder a su valoración.

Cómo encontrar el valor real de la solución de Molibdato de Amonio. Pesar exactamente 100 mg. de Plomo metálico granular químicamente puro (para análisis de laboratorio) colocándolo dentro de un vaso de precipitación de 400 ml. Disuelva el Plomo añadiendo 5 ml. de agua destilada y 5 de ácido Nítrico fumante. Ponga el vaso en un lugar semicaliente en la estufa hasta que esté bien disuelto el plomo. Si es necesario repita la operación agregando más

agua y ácido. Si se formaran cristales blancos de Nitrato de Plata disúlvalos con un poquito de agua. Retire el vaso en el azafate de enfriamiento y continúe como en el método regular filtrando y titulando. Si el Plomo metálico es de buena calidad y la solución está preparada correctamente, 100 mg. de Plomo deberán gastar exactamente 20 ml. de solución de Molibdato de Amonio, lo que quiere decir 1 ml. es equivalente a 1% de Pb.

Solución indicadora de Acido Tánico. Esta solución deberá prepararse todos los días porque se descompone rápido. Se disuelve un gramo en 300 ml. de agua destilada. Ya en la práctica basta con tomar un poquito con la punta de una espátula y disolverlo en el mismo gotero con agua.

Observaciones: Cuando esté ya en la operación de titulación úsese siempre una varilla de vidrio con un gendarme en la punta para agitar bien la solución y con la misma varilla se van haciendo las pruebas en la plaqueta de parafina y óxido de cinc, colocando una gota de solución sobre la solución de ácido Tánico.

Cómo preparar la plaqueta de Parafina y Oxido de Cinc. Disuelva en un recipiente una libra de parafina de buena calidad y mezcle poco a poco con agitación óxido de cinc hasta que la mezcla se vea bien blanca, entonces tenga un molde, que puede ser una cajita cuadrada y vacíese la mezcla dejándola enfriar. Después quite el cartón y ya tendrá la plaqueta.

Método para determinar el Plomo en estado de óxido o carbonatos en las Colas (con el objeto de conocer la diferencia que existe en el mineral entre óxidos y sulfuros)

a) Pesar exactamente 2.0 gramos de la muestra y se coloca el material dentro de un vaso de precipitación de 400 ml., añadiendo 30 ml. de agua destilada, 10 ml. de Acetato de Amonio concentrado y 3 ml. de Acido Acético.

b) Hervir la mezcla durante 10 minutos a temperatura moderada. Retírese el vaso del calor y dejar en reposo la solución durante unos minutos para asentar el residuo insoluble y proceda a filtrar siempre en estado caliente por

un filtro # 3, lavando finalmente el filtro y el vaso dentro del filtro con agua caliente 5 ó 6 veces. Recoja el filtrado en otro vaso limpio de 400 ml.

c) Ponga la solución filtrada 10 ml. de Acido Sulfúrico y 3 ml. de Agua Oxigenada. Hervir la solución durante unos diez minutos. Retire el vaso del calor y póngalo en el azafate de enfriamiento. Cuando la solución esté completamente fría y el Sulfato de Plomo asentado, proceda a filtrar como se indica en el método regular y continúe la operación hasta el final como se indica en el mismo método. Recuerde que se tomaron 2.0 gramos de muestra para el ensayo y por tal motivo tendrá que dividir la cantidad de mililitros empleados de Molibdato de Amonio entre 4 y luego multiplicar por el valor de la solución valorada para obtener el 5% de Pb.

#### 1.2. Método de rutina para la determinación de Cinc.

a) Pesar exactamente 0.5 gramos de muestra y coloque el material dentro de un vaso de precipitación de 400 ml. En principio el procedimiento es exactamente igual al método de rutina para determinar el Plomo. Así es que siga las instrucciones del método de Plomo hasta el punto en que se retira el vaso de la plancha caliente previa evaporación de los gases o humos blancos del ácido Sulfúrico.

b) Cuando el vaso se encuentra ya frío, ponga 30 ml de agua destilada y lave con poca agua (con el frasco lavador). Añadiendo una cucharada de Cloruro de Amonio, 25 a 30 ml. de Hidróxido de Amonio y con la punta de una espátula agregue una pizca de Persulfato de Amonio. Lave nuevamente las paredes del vaso con el frasco lavador o pizeta.

c) Ponga el vaso en la plancha caliente y hierva la solución con color moderado durante 10 minutos.

d) Filtración: Filtre la solución caliente en un papel filtro apropiado que puede ser el No. 1-F, recibiendo el filtrado en un vaso de 400 ml. Lave las paredes y fondo del vaso con una solución caliente conteniendo una cucharada

de Cloruro de Amonio y 10 ml de Hidróxido de Amonio 3 veces, limpiando las paredes y fondo, si es necesario, con una varilla de vidrio con gendarme. Lave el filtro 6 veces con la misma solución caliente, cuidando que el precipitado y solución no suban arriba de la orilla superior del filtro.

e) Agregue a la solución filtrada 3 gotas de solución de Naranja de Metilo, aproximadamente un gramo de Plomo metálico químicamente puro (échelo aproximadamente con la punta de una espátula) y con una bureta de 50 ml llena de ácido Clorhídrico. Ponga el vaso en la plancha caliente tapado con un vidrio de reloj, cuidando que el volumen de solución sea aproximadamente de 2/3 partes del volumen del vaso aunque tenga que agregar agua destilada. Hierva la solución durante 15 minutos hasta que la solución se pone clara. Llegando a este punto la solución está lista para su titulación.

f) Prepare su solución valorada de Ferrocianuro de Potasio llenando una bureta de 50 ml. Retire el vaso de la plancha caliente. Lave la tapadera con la pizeta conteniendo agua destilada fría y agregue agua fría al vaso para bajar la temperatura, aproximadamente, a unos 70 °C. En un vaso aparte, separe unos 20 - 30 ml de la solución que se va a titular e inicie la titulación con el vaso original que contiene la mayor parte de solución. El punto final es un ligero color café. La porción reservada se añade para terminar la titulación lentamente hasta el punto final. Cuando la muestra contiene regular cantidad de Cinc se observa en la solución cuando se le está agitando vigorosamente con la varilla de vidrio con gendarme, una ligera coloración blanco-rosada. La reacción es lenta y debe agitarse siempre por algunos segundos fuertemente con la varilla. Las pruebas se van haciendo sobre la plaqueta de parafina conteniendo Oxido de Cinc, en la cual se tienen ya colocadas con anterioridad a la titulación, filas de gotas de solución de Molibdato de Amonio. Deberá fijarse el punto de color al hacer la solución valorada partiendo de la primera coloración café que aparece. Los mililitros em-

pleados de solución de Ferrocianuro de Potasio multiplicados por el factor de la solución le dará el porcentaje de Cinc.

Preparación de las Soluciones para la determinación de Cinc.

Solución valorada de Ferrocianuro de Potasio.

Pesar exactamente 21.54 gramos de la sal ( $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$ ). Disolver la sal en un vaso con agua destilada y luego echar la solución lavando el vaso varias veces con una pizeta dentro de un matraz aforado de 1000 ml y llene con agua destilada hasta la marca. Esta solución deber dejarse madurar por lo menos unos cuatro días, antes de usarse y su valoración.

Cómo encontrar el valor real de la solución.

Pesar exactamente 100 mg de Cinc metálico químicamente puro (para análisis) y ponerlo dentro de un vaso de 400 ml. Disolver el metal con 10 ml de Acido Clorhídrico (HCl) sin calentamiento. Cuando el metal está totalmente disuelto se añadirán 50 ml de agua destilada y 3 gotas de solución indicadora de Naranja de Metilo, se agita la solución con una varilla de vidrio con gendarme. Se neutraliza la solución con Hidróxido de Amonio por medio de una bureta y agitando constantemente hasta que el color rojo se torna amarillo y luego se agregan unos cuantos mililitros adicionales hasta sentir el olor a Amoníaco. Se vuelve nuevamente a poner Acido Clorhídrico con una bureta lentamente hasta que vuelva el color rojo en la solución y se agregan en exceso 3 ml más de ácido. Ponga dentro del vaso aproximadamente 1 g de Plomo metálico, químicamente, puro y llene con agua el vaso hasta 2/3 de su volumen. Ponga el vaso en la plancha caliente a temperatura moderada y permita hervir la solución durante unos 15 minutos hasta que desaparece el color rojo. Retire el vaso de la plancha caliente y lave la tapadera vidrio de reloj con agua fría y ponga agua fría a la solución para bajar la temperatura a unos 70 °C. Proceda a la valoración con la solución de Ferrocianuro de Potasio preparada con anterioridad. Prepare también su plaqueta de parafina para tener ya listas

las filas de gotas de solución de Molibdato de Amonio. Separe una pequeña porción como se indicó en el método de rutina y proceda a la titulación. Si la solución está correcta gastará exactamente 20 ml. que es el equivalente a 1% de cinc por mililitro.

Solución indicadora para la plaqueta de parafina. Pesar 10 gramos de Molibdato de Amonio y disolverlos en 1 litro de agua destilada. Esta solución dura por tiempo indefinido.

Determinación de Cinc en estado de óxido o carbonato contenido en las Colas.

a) Pesar exactamente 2.0 gramos de la muestra y poner el material dentro de un vaso de 400 ml. Agregue 30 ml de agua destilada, una cucharada de Cloruro de Amonio, 10 ml de Acetato de Amonio concentrado y 3 ml de ácido Acético. Hervir durante 10 minutos a temperatura moderada, tapando el vaso con un vidrio de reloj para evitar pérdidas por salpicaduras.

b) Filtrese la solución caliente por un filtro # 1-F Munktell, recibiendo el filtrado en un vaso de 400 ml. Lávese el vaso con agua caliente, 3 veces y el papel filtro, unas cinco veces.

c) A la solución filtrada agréguele una cantidad suficiente de Hidróxido de Amonio suficiente para que se sienta el olor en la solución, generalmente 20 a 30 ml son suficientes. Ponga con la punta de la espátula una pizca de Persulfato de Amonio. Mezclar bien la solución. Caliente la solución dejándola hervir unos 10 ó 15 minutos.

d) Retire el vaso de la plancha caliente y fíltrese en caliente por un filtro 1-F, lavando con una solución caliente que contenga una cucharada de Cloruro de Amonio y 10 ml de Amoniaco por litro, la paredes del vaso tres veces y el filtro 5 veces.

e) A la solución filtrada pngale 3 gotas de Naranja de Metilo, neutralice la solución como se indicó antes poniendo Acido Clorhídrico con una bureta hasta obtener el

color rojo y añada en exceso 3 ml más. Ponga el vaso en la plancha caliente a temperatura moderada y permita que ésta llegue a hervir 10 minutos o desaparezca la coloración roja. Proceda a la titulación como ya se indicó en el método de rutina.

#### Cinc Soluble.

Pesar exactamente 2 gramos, de la muestra, en un vaso de 400 ml, agregar una cucharada de Cloruro de Amonio y 100 ml de agua. Hervir durante 10 minutos. Procédase como se indica en el método anterior en b, c, d, y e.

#### 1.3 Insolubles.

a) Pese 0.5 gramos de la muestra y descompóngala disgregando el material con unas gotas de agua, 10 ml de ácido Clorhídrico, 10 ml de ácido Nítrico y 1/2 gramo de Clorato de Potasio. Ponga el vaso en la plancha caliente y lleve hasta la ebullición la solución y luego evapore hasta sequedad, teniendo cuidado de tapar el vaso con un vidrio de reloj para evitar salpicaduras. Se aconseja en estos casos poner tela de asbesto sobre la plancha caliente y encima el vaso para evitar una evaporación violenta que acarrearía pérdidas por salpicaduras. Saque el vaso cuando ya esté bien seco el material y deje que éste se enfríe. Ponga nuevamente 10 ml de ácido Clorhídrico y vuelva a evaporar a sequedad y dejar después media hora el vaso secándose. Retire el vaso y déjelo enfriar.

b) Ponga en el vaso 25 ml de agua, una cucharadita de Cloruro de Amonio y 10 ml de ácido Clorhídrico. Póngase el vaso en la plancha caliente y dejar hervir durante 5 minutos.

c) Filtración: Decántese la solución caliente por un papel filtro # 0, reteniendo el insoluble en el fondo del vaso y después lave las paredes y fondo del vaso sobre el papel filtro. Lave el vaso y límpielo con una varilla con gendarme hasta dejarlo bien limpio y todo quede en el papel filtro. Lave el filtro 6 veces con agua caliente. El fil-

trado recíballo en un vaso de 400 ml para otras determinaciones, si es necesario.

d) Cuando el papel filtro esté casi seco, dóblelo con cuidado y póngalo dentro de un crisol de porcelana pequeño para altas temperaturas. Primero termine de secar el filtro dentro del crisol en la estufa y luego póngalo en el horno o mufla hasta la completa calcinación, que se conocerá cuando en el fondo del crisol quede únicamente un ligero residuo blanco.

e) Pese el residuo obtenido, puede hacerse en dos formas: 1) pesando el crisol antes de iniciar el ensayo; y 2) pesándolo después del ensayo, la diferencia de peso multiplicado por 2 le dará 1% de insoluble. Repórtese como material insoluble.

### C. Descripción de Minerales. (10)

A continuación se presenta una breve descripción de los principales compuestos contenidos en las "Colas".

Cerusita (Carbonato de Plomo): Cristales sin color o blancos con tintes grisáceos, elongados y generalmente aparejados para formar una cadena reticular. Semiduro, 3-3.5 (en escala de 1 a 10), muy pesado y frágil. Ocurre en la zona de depósito de plomo, producido por alteración química de galena a través de la acción de agua rica en ácido carbónico. Asociada con minerales primarios como galena y esfalerita y minerales secundarios como anglesita, esmitsonita, piromorfita y goetita.

Galena (Sulfuro de Plomo): Sistema Isométrico. Apariencia cúbica, usualmente en masas granulares compactas con muchas superficies brillantes, cristales grises. Suave, 2.5-2.8, muy pesado y frágil. Típico mineral hidrotérmico de depósito de media-temperatura, asociada con esfalerita y argentita, principalmente con ganga de cuarzo y fluorita.

Esmitsonita (Carbonato de Cinc): Sistema hexagonal. Cristales romboedrales usualmente con caras curvadas. Su color es blanco puro, azul o verde con cobre, amarillo con cadmio y rosado o violeta con cobalto o manganeso. Duro, 5.5 pesado y frágil. Típico precipitado sedimentario producido por la acción de agua rica en sulfato de zinc sobre rocas carbonatadas. Característicamente encontrada en la zona de oxidación de depósitos de sulfuro (zinc, plomo y cobre). Generalmente encontrada con hemimorfita, cerusita, malaquita, anglesita, piromorfita, etc.

Esfalerita (Sulfuro de Cinc): Sistema Isométrico. Cristales tetraedrales a menudo con extremos redondeados. El color varía de amarillo o café-rojizo cuando es puro, negrizo si hierro está presente. Semiduro, 3.5-4, pesado y muy frágil. Desarrollada principalmente en venas pegmatíticas y también en venas hidrotérmicas asociada con galena, argentita, chalcopirita, barita y fluorita. En depósitos sedimentarios, talvez de origen químico.

Calcita (Carbonato de Calcio): Sistema hexagonal. Cristales romboedrales y prismáticos, a menudo aparejados. Color variable (sin valor, blanco, rosado, verde, amarillo, etc.). Semiduro, 3, y liviano. Un típico mineral sedimentario formado por precipitación química a través de la evaporación de soluciones ricas en bicarbonato de calcio (por ejemplo estalactitas) o por extracción a través de la acción de organismos marinos. También encontrada en venas hidrotermicas de baja temperatura asociada con sulfuros. Rocas calcáreas constituye el 4% por peso de la corteza terrestre y cubre el 40% de su superficie.

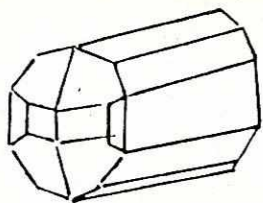
Magnesita (Carbonato de Magnesio): Sistema hexagonal. A menudo en cristales compactos y microcristalinos, blanco, amarillo o gris. Semiduro, 3.5-4.5, pesado y frágil. Translúcido o transparente con brillo suave. Formada por alteración de rocas ultramáficas (peridotitas y serpentinitas) a través de la acción de agua conteniendo ácido carbónico. Como un mineral diagenético reemplaza a calcita y dolomita.

Cuarzo (Silicato): Sistema hexagonal. Sin color cuando es puro (roca de cristal). La presencia de impurezas puede dar un completo rango de colores. Cristales de cuarzo son usualmente hexagonales y prismáticos, terminado por dos romboedros. La forma común es cuarzo alfa, el cual es estable hasta 573 °C. Arriba de esa temperatura el cuarzo hexagonal beta es estable y es preservado paramórficamente, principalmente en rocas volcánicas. Es uno de los minerales más comunes de la corteza terrestre (12% por volumen).

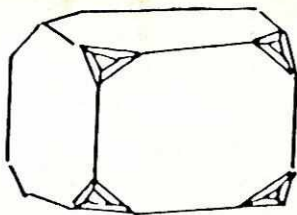
Hematita (Oxido Férrico): Sistema hexagonal. Cristales romboedros a menudo con cristales individuales arreglados como pétalos de una rosa ("Rosa de Hierro"). Duro, 5.5-6.5, muy pesado y frágil. Opaco con brillo metálico, tintes rojos en sección delgada. Un mineral común de muchas rocas igneas, especialmente lavas. Mucha hematita es formada bajo condiciones sedimentarias a través de diagénesis de limonita, reteniendo su forma oolítica. Permanece estable en un desarrollo metamórfico a baja temperatura donde a menudo reemplaza a magnetita.

Corundum (Oxido de Aluminio): Sistema hexagonal. Variable en color, algunas veces manchada. Usualmente gris o café, semi-opaco y granular. Muy duro, 9, pesado. Un mineral secundario de rocas igneas saturadas de sílica y en rocas metamórficas de alto-grado. Concentraciones sedimentarias son frecuentes en arenas marinas y aluviales.

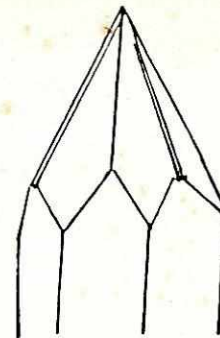
Ver en la figura # 17 descripción esquemática de los cristales minerales típicos.



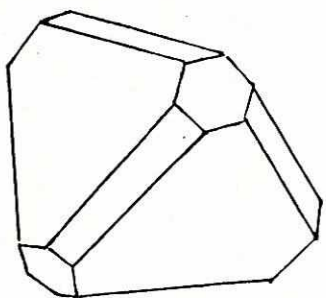
Cerusita  
 $PbCO_3$



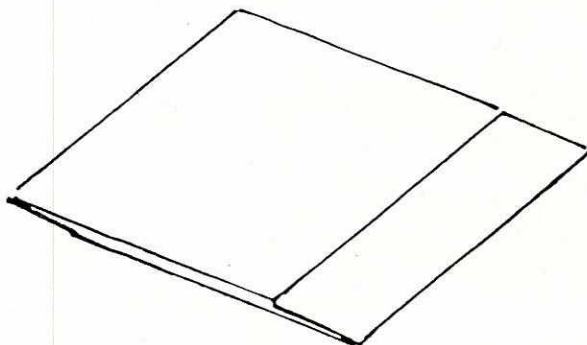
Galena  
 $PbS$



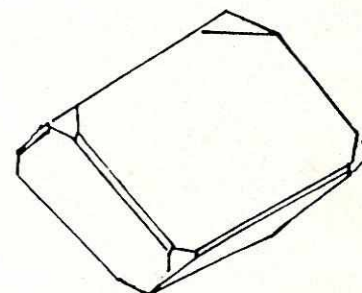
Esmitsonita  
 $ZnCO_3$



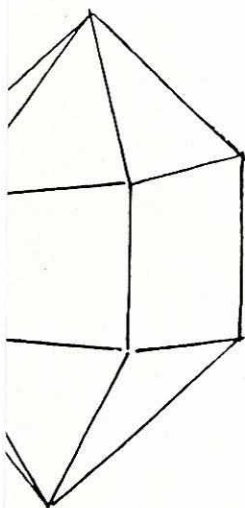
Esfalerita  
 $ZnS$



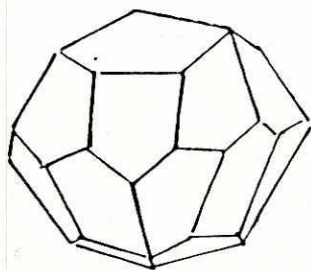
Calcita  
 $CaCO_3$



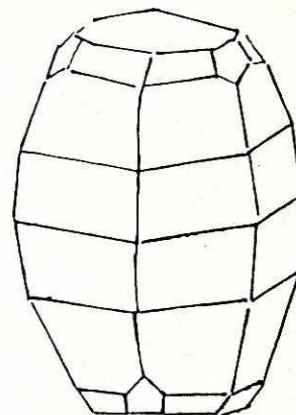
Magnesita  
 $MgCO_3$



Cuarzo  
 $SiO_2$   
(licatos)



Hematita  
 $Fe_2O_3$



Corundum  
 $Al_2O_3$

Figura # 17