

**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO**  
**Facultad Metalurgia Electromecánica**  
**Departamento de Metalurgia**

**Título: “ MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN DE  
LA PULPA DE MINERAL LATERÍTICO DE LA EMPRESA  
COMANDANTE PEDRO SOTO ALBA” ( MOA NICKEL S.A).**

**Tesis presentada en opción al Grado Científico de  
Doctor en Ciencias Técnicas.**

**Autor: Ing. Pedro Enrique Beyris Mazar**

**Tutor: Dr. C.José F.Falcón Hernández**

**“AÑO DEL 30 ANIVERSARIO DE LA CAÍDA EN COMBATE DEL  
GUERRILLERO HEROICO Y SUS COMPAÑEROS”**

**Moa, 1997.**

## AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer la ayuda brindada por el Dr. C. José F. Falcón Hernández que transmitió sus experiencias y sabias sugerencias para el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. C L.A. Rojas Purón por su abnegada colaboración y discusión de la parte mineralógica.

A la Dra.C. Arisbel Cerpa Naranjo por su abnegada ayuda.

Al decano de la facultad de Metalurgia y Electromecánica Dr. C. Alfredo Coello Velázquez.

Al Dr.C. Eulicer Fernández Maresma, Dr.C. e J.I Rodríguez D. y a todos los compañeros de los departamentos de Metalurgia y Química.

A las ingenieras Dania Martín, Jaquelin Acosta, Alina Laffita y Fernanda Camejo por su apoyo en materiales y medios de cómputo. También al Ing. Manuel Bisset, Ivan Pérez y a los compañeros de los Departamentos de; Mantenimiento, Planta de Pulpa, Espesadores y de otros de la ECPSA, Moa Nickel S.A.

A todas las compañeras del Centro de Información Científico Técnica (CIT) del ISMM y del CIS. A la Lic.Elsy Ferrer por su ayuda en la traducción de materiales necesarios para el desarrollo del trabajo.

Al esfuerzo realizado en la toma de muestras por los Ingenieros Daniel Sánchez J. y Miguel Figueras.

Agradezco a todo el que de una forma u otra colaboró en la materialización de este trabajo.

## SÍNTESIS

La Empresa Comandante Pedro Sotillo Alba (ECPSA); Mosa Nickel S.A. desde su puesta en marcha ha presentado dificultades relacionadas con el espesamiento de las pulpas crudas lateríticas en la planta de espesadores de pulpa, donde el porcentaje de sólido del producto espesado no se ha podido mantener en los niveles establecidos por proyecto (48%) trayendo como consecuencia considerables pérdidas a la empresa, razón por la cual en el presente trabajo se pretende dar solución a la dificultad expuesta.

En el mismo se utilizaron muestras de pulpas crudas industriales y preparadas a escala de laboratorio y de banco, las cuales se caracterizaron desde el punto de vista de su composición granulométrica, mineralógica y química que proceden de frentes de explotación diferentes. Se realizó una evaluación individual y luego conjunta de su influencia en el proceso, así como de la composición iónica de la pulpa

La separación granulométrica se realizó a través de los métodos convencionales, analizándose el comportamiento de las diferentes clases de tamaño y la variación de la composición en peso de éstas en la sedimentación. La mineralogía se conoció a través de los métodos de difracción de Rayos - X y la composición química por las técnicas analíticas instrumentales de A.A y FRX. La determinación de las fases mineralógicas y los componentes químicos presentes en cada tipo de pulpa permite establecer comparaciones tanto en buenas como en malas condiciones de sedimentación.

Para evaluar la influencia de la composición iónica de la pulpa en la sedimentación se realizaron ensayos con diferentes tipos de agua y electrolitos, siendo el más eficaz el silicato de sodio.

Se define un nuevo indicador denominado **índice de sedimentación (Ised)** como la relación metal ligero/metal pesado para efectuar la homogeneización de los minerales lateríticos, no alterando la ley de mineral para la tecnología ácida y permitiendo predecir el comportamiento de la sedimentación teniendo en cuenta la relación existente entre los factores fundamentales

que influyen como sistema en el proceso, lográndose porcentajes de sólidos superiores a 46,61%.

Se verifica experimentalmente que el uso del **índice de sedimentación ( Ised )** con valores menores que 0.22, para la homogeneización de los minerales lateríticos y del silicato de sodio como electrólito en concentraciones de (0.001-0.008) g/l constituyen vías para el mejoramiento de las condiciones de sedimentación en la planta de espesadores de pulpa de la ECPSA. , Moa Nickel S.A.

## INDICE

	Página
Índice _____	6
Introducción _____	8
CAPÍTULO I. PARTICULARIDADES DEL PROCESO DE	
SEDIMENTACIÓN DE LA PULPA CRUDA _____	11
1.1.- Características de operación de la planta de preparación de pulpa _____	13
1.2.- Características de operación de la planta de Espesadores de pulpa _____	14
1.3 .- Trabajos de investigación realizados anteriormente sobre	
el proceso de sedimentación de la pulpa cruda. _____	20
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA EL ESTUDIO	
DE LA SEDIMENTACIÓN _____	29
2.1.- Aspectos generales _____	30
2.2.- Efecto de la composición iónica de la pulpa en el proceso	
de sedimentación _____	37
CAPÍTULO III: ESTUDIO DE LOS PRINCIPALES FACTORES QUE	
INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE LA SEDIMENTACIÓN	
DE LA PULPA CRUDA. _____	41
3.1.- Características geólogo-mineras de los yacimientos lateríticos _____	43
3.2 .- Influencia de la composición mineralógica _____	47
3.3.- Influencia del proceso de preparación de la pulpa cruda _____	57
3.4.- Influencia de la composición granulométrica del mineral laterítico _____	60
3.5.-Influencia de la composición química _____	75

3.6.- Influencia de la composición iónica _____	80
CAPÍTULO IV. MEJORAMIENTO DE LAS CONDICIONES DE	
SEDIMENTACIÓN DE LAS PULPAS DE MINERALES LATERÍTICOS	
EN LA ECPSA, MOA NÍCKEL S.A. _____	88
4.1.- Utilización del índice de sedimentación para la homogeneización de los minerales lateríticos _____	89
4.2.- Utilización del silicato de sodio para mejorar las condiciones de sedimentación en la ECPSA, Moa Níckel S.A. _____	98
4.3.- Aplicabilidad de los resultados de la investigación _____	101
5.- CONCLUSIONES _____	105
6.- RECOMENDACIONES. _____	107
7.- BIBLIOGRAFÍA _____	108
8. ANEXOS _____	119
9. SIMBOLOGÍA _____	120

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la producción de Níquel constituye un imperativo de la economía cubana, por lo que se realizan importantes trabajos de modernización y perfeccionamiento de las tres instalaciones industriales en operación, dos por la tecnología carbonato-amoniaco: Empresas Comandantes René Ramos Latour y la Ernesto Ché Guevara de Nicaro y Moa respectivamente, y una por la tecnología de lixiviación con ácido sulfúrico a presión, Comandante Pedro Sotto Alba (ECPSA) Moa Níquel S.A (Moa), así como se trabaja en la terminación de la cuarta planta por la tecnología carbonato-amoniaco (Las Camariocas) y se prevé la construcción de una quinta planta por la tecnología de lixiviación con ácido sulfúrico a presión (Pinares de Mayarí).

La tecnología de lixiviación ácida, única en operación a escala industrial en nuestro país, ha demostrado ser la más eficiente en el proceso de extracción del Níquel y el Cobalto de los minerales lateríticos, con índices de recuperación de ambos metales superiores al 90% e indicadores económicos de costos relativamente bajos que la hacen muy competitiva en la actualidad.

No obstante a esto, la capacidad de producción y la eficiencia metalúrgica final del proceso dependen, en gran medida, de una de las operaciones unitarias básicas de la tecnología: la sedimentación de la pulpa de mineral laterítico, conocida como “pulpa cruda”, la cual no se ha comportado en la práctica industrial de acuerdo con el parámetro de diseño fundamental, el % de sólidos de la pulpa a la salida de la Planta de Espesadores.

Se han realizado varios trabajos de investigación con el objetivo de buscar las causas por las cuales no se alcanza el % de sólidos de diseño (48 %, en peso)[Moa Bay Mining Co, 1959] de la pulpa cruda, que incluyen el estudio de los distintos factores que inciden en este proceso: entre los que pueden señalarse: % de sólidos de la pulpa de alimentación, altura de la zona de compresión , torque del mecanismo central , temperatura, y adición de floculantes. También se han desarrollado estudios sobre la influencia de los fenómenos

los fenómenos electrosuperficiales (141, 142) la composición iónica (51), y mineralógica en el comportamiento de sedimentación de la pulpa cruda.

No se conoce ningún resultado científico o investigativo que de forma integral resuelva la problemática planteada por lo que constituye **objetivo** de esta tesis **"mejorar las condiciones de sedimentación de las pulpas crudas de mineral laterítico a través de medidas que permitan predecir y regular el comportamiento del proceso de sedimentación evitando que se produzcan crisis "**

En el trabajo se plantean las siguientes **hipótesis**:

- " Si se determina un indicador que caracterice el comportamiento de sedimentación de la pulpa cruda de mineral laterítico, es posible operar sobre este, para establecer condiciones adecuadas de sedimentación para la tecnología ácida".
- " Si se utiliza una sustancia que actúe sobre la composición iónica de la pulpa se puede mejorar también las condiciones de sedimentación de las pulpas lateríticas."

Para evaluar el proceso de sedimentación de la pulpa cruda fue necesario revisar las teorías mas universales desarrolladas hasta el momento (46, 135, 86), los modelos de Robert, Deer Roberts-Yoshioka, Tory-Shanon, Michel- Bolger y otros, así como otros trabajos relacionados con el dimensionamiento de los sedimentadores industriales a partir de pruebas batch de laboratorio (55, 56, 60, 109).

De trabajos anteriores (82, 83) ya se conocía la dificultad para aplicar estas teorías en el dimensionamiento de los sedimentadores para la pulpa cruda, debido al alto grado de floculación natural y a las altas concentraciones de sólido que estas presentan, se decidió aplicar el método de Talmage y Fitch (135) para la evaluación del comportamiento de sedimentación de las diversas muestras de pulpa cruda investigadas.

Para la caracterización granulométrica se emplearon métodos convencionales: análisis de tamices, elutriación y levigación, y en el estudio mineralógico de las muestras de mineral laterítico se aplicaron técnicas analíticas instrumentales, tales como Difracción de Rayos-X y Microscopía Electrónica de Transmisión. Además se utilizaron los métodos instrumentales de Absorción Atómica y Fluorescencia de Rayos-X, para la determinación de la composición química. Los resultados de las experiencias fueron tratados estadísticamente a través de los programas de computación : Excel, Amigo (88), Microsta.

Paralelamente se analizan diferentes electrolitos comprobándose la influencia del Silicato de Sodio que influye en la composición iónica de la fase líquida de la pulpa, lo cual incrementó la velocidad de sedimentación y el % de sólido en la pulpa espesada. A través de la teoría electrostática se explica el fenómeno que ocurre al añadir este electrolito y su efecto en el comportamiento de la sedimentación.

Se destacan como novedades del trabajo:

- El establecimiento de un nuevo indicador: **Índice de sedimentación** (relación metal ligero/ metal pesado) para efectuar la homogeneización del mineral de los diferentes frentes de explotación que garantice condiciones favorables de sedimentación.
- Se obtiene una ecuación multilínea que revela la relación que existe entre **el índice de sedimentación (Ised)** y las características químicas, físicas (granulométricas) y mineralógicas.
- Establecimiento de la correlación entre la composición iónica de la pulpa y las condiciones en que se puede incrementar la velocidad de sedimentación.

## **CAPÍTULO I**

# **PARTICULARIDADES DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN DE LA PULPA CRUDA.**

## **CAPÍTULO I: PARTICULARIDADES DEL PROCESO DE SEDIMENTACIÓN DE LA PULPA CRUDA.**

El proceso de sedimentación de la pulpa cruda juega un rol fundamental en la parte final del proceso de preparación del mineral laterítico para la lixiviación en la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba” (ECPSA). Este proceso se lleva a cabo en 3 tanques espesadores, localizados en la planta del mismo nombre. La calidad del producto final de esta planta es controlada mediante la determinación del porcentaje (%) de sólido en la pulpa de descarga del espesador. Este parámetro, según diseño, debe promediar 48% en peso, valor que no se ha logrado de forma estable, ocasionando dificultades operacionales y afectando la productividad y eficiencia metalúrgica de la ECPSA.

A lo largo de los más de 30 años de operación de la ECPSA se han hecho numerosos estudios y puestos en práctica diversas alternativas para incrementar el % de Sólido de la pulpa espesada y a pesar de los esfuerzos realizados no se han logrado los resultados esperados. En los últimos años, con el reforzamiento de los mecanismos centrales de los espesadores y la construcción del tercer espesador, se ha podido mejorar la operación de la planta, aunque, en determinados períodos, se presentan dificultades en el proceso de sedimentación, lo que indica que la eficiencia de este proceso está muy estrechamente relacionada con las características de la pulpa alimentada y por consiguiente con el tipo de mineral laterítico minado y la preparación de la pulpa cruda.

Es por ello, que este trabajo trata de dar una explicación racional a los problemas de sedimentación que se presentan en ocasiones, denominados “períodos críticos de sedimentación”, tomando como base la hipótesis de que el mineral laterítico de cada frente de explotación minera tiene condiciones de sedimentación diferentes que varían de acuerdo con sus características minero-geológicas.

Por lo tanto es importante conocer las características operativas de los procesos a través de los cuales se obtiene la pulpa cruda laterítica

## 1. 1.- Características de operación de la planta de preparación de pulpa.

La preparación de la pulpa se realiza a través de la clasificación y lavado, que tienen como objetivos separar las rocas contenedoras de serpentinita, debido al alto contenido de magnesio que éstas poseen, lo cual provoca un incremento en el consumo de ácido sulfúrico en la lixiviación.

El mineral se transporta desde la mina en camiones Belaz, los que descargan en la tolva de recepción debajo de la cual está situado un extractor de placas encargado de descargar el mineral en la trituradora de rodillos a través de una criba fija que separa las partículas de tamaño superior a 250 mm. El producto triturado se descarga sobre el transportador principal que garantiza que el mineral llegue a la planta de preparación de pulpa donde existe una tolva de tipo By Pass accionada eléctricamente en dependencia de las necesidades de la producción. Si se producen interrupciones este transportador puede ser alimentado por una grúa a recoger el mineral de los depósitos de reserva, que están a los lados del punto de recepción, con capacidad de 30 000 t cada uno. La capacidad de alimentación es de 800 t/h, estimándose un rendimiento de 90 %.

Del tolván de By Pass, el mineral cae por gravedad a las tolvas y se extrae de estos mediante extractores de placa de velocidad variable descargándose en las correas de los transportadores de alimentación regulándose la proporción de alimentación del mineral a la planta controlando la velocidad de los extractores de placas.

Cada transportador descarga el mineral en las cribas vibratorias que presentan orificios de un diámetro de 127mm. Aquí el mineral es lavado con agua, con el objetivo de separar las partículas finas de las rocas y romper las bolas del material compactado.

El producto retenido de las cribas es descargado por una canal inclinada al tambor lavador, donde se produce el lavado y se rompen los conglomerados con características arcillosas. Cuando el tambor lavador está fuera de línea ese producto retenido constituye parte del rechazo.

Los materiales lavados con tamaño superior a 127 mm se descargan en un triturador de quijada y luego son transportados a los colectores de rechazo. Los materiales con tamaño menor de 127 mm, se transportan a las lavadoras de paletas en las que se mezclan con agua para producir una pulpa uniforme con una concentración de 30% de sólido.

El producto lavado en las lavadoras de paletas se descarga en las cribas primarias con tamaño de sus orificios de 10 mm; conjuntamente con el producto lavado (menor de 127 mm) del tambor lavador (cuando está en línea). La fracción menor de 10mm se lava en las cribas vibratorias secundarias con orificios de 0.833 mm. El producto retenido después de lavado con los rociadores se descarga en el colector de rechazo. El producto cernido en forma de pulpa (con un 25% de sólido aproximadamente) constituye el producto final de la planta de preparación de pulpa. Éste cae por un colector y luego al tanque de retención de donde se envía a la Planta de Espesadores de Pulpa por gravedad a través de una tubería de concreto de 0.60m de diámetro y 4800 m de longitud con un tramo intermedio de tubería de hierro fundido, la pulpa tarda en recorrer esta distancia aproximadamente 45 minutos período en el cual la pulpa que se desplaza a una gran velocidad provoca que las partículas minerales sufran caídas bruscas y choques contra las paredes de los registros dispuestos en toda la longitud del conducto lo que hace variar la composición granulométrica antes de llegar a los espesadores.

El agua que se utiliza para preparar la pulpa en la planta, proviene del rebose de los espesadores que se bombea por las tuberías de retorno de agua de 0.460 m de diámetro.

## **1.2- Características de la operación de la planta de espesadores.**

La Planta de Espesadores de la ECPSA consta de un sistema de distribución de pulpa (Caja Distribuidora) y 3 tanques espesadores abiertos, de hormigón, soterrados, presentan forma circular en la parte superior, con un diámetro de 114.6 m y una altura central de 10 m. Sus paredes son cónicas, a diferencia de la mayoría de estos equipos. El fondo del espesador también es cónico y presenta un mecanismo central con dos pares de brazos: uno largo de 99 m. y otro corto de 22 m. Los brazos giran a una velocidad de una revolución cada 45 minutos. El mecanismo central presenta un torque admisible de 225 970 Nm que arrastra todo el

material sedimentado hacia el centro del espesador donde se descarga por un tubo de forma cónica (cono). El mecanismo presenta un torque que debe protegerse para evitar posibles averías, para ello están establecidos determinados límites que sobrepasado estos pueden producir el rompimiento del mecanismo y la pérdida de todo el material que se encuentra retenido en los tanques. Para evitar lo antes expuesto se adiciona agua por el cono para disminuir el esfuerzo que se debe realizar. Esta acción produce la descompactación de los sólidos en las capas inferiores del tanque lograda en horas

En los inicios de la década de los noventa, se cambiaron los mecanismos de los tanques por otros más potentes. Sánchez (1991) analizó el comportamiento del porcentaje de sólido con respecto a los mecanismos elevándose a 0.65 % en el año 1991. Sin embargo el porcentaje de sólido es inferior que en el año precedente Posteriormente se cambiaron los mecanismos con un torque superior y las condiciones del sólido no presentaron mejorías, el porcentaje de sólido del año 1994-1996 registra un descenso. Esto muestra que la problemática del producto espesado en la planta de espesadores independientemente de la importancia del torque, necesita de otro (s) factor (es) tan esencial (es) como el mencionado para aumentar su calidad.

El tanque espesador tiene, dos funciones principales :

- Elevar el % de Sólido de la pulpa.
- De almacenaje, con una capacidad de almacenamiento de 25 000 toneladas de mineral, base seca.

La Caja Distribuidora está dividida en 11 secciones que le permiten realizar diferentes operaciones, entre ellas, enviar la pulpa del fondo del espesador al pozo de alimentación del mismo, o sea recircular, y además alimentar a la Planta de Lixiviación y recircular la pulpa de un espesador, mientras el otro permanece fuera de circulación.

En la fig.1 se representa el esquema constructivo del espesador, en el que aparece una división por capas o niveles (en m) de acuerdo a la toma de muestras de transversos en los

tanques espesadores de la planta del mismo nombre. En dependencia del comportamiento del proceso los niveles pueden oscilar desde el 1<sup>er</sup> hasta el 8<sup>vo</sup>.

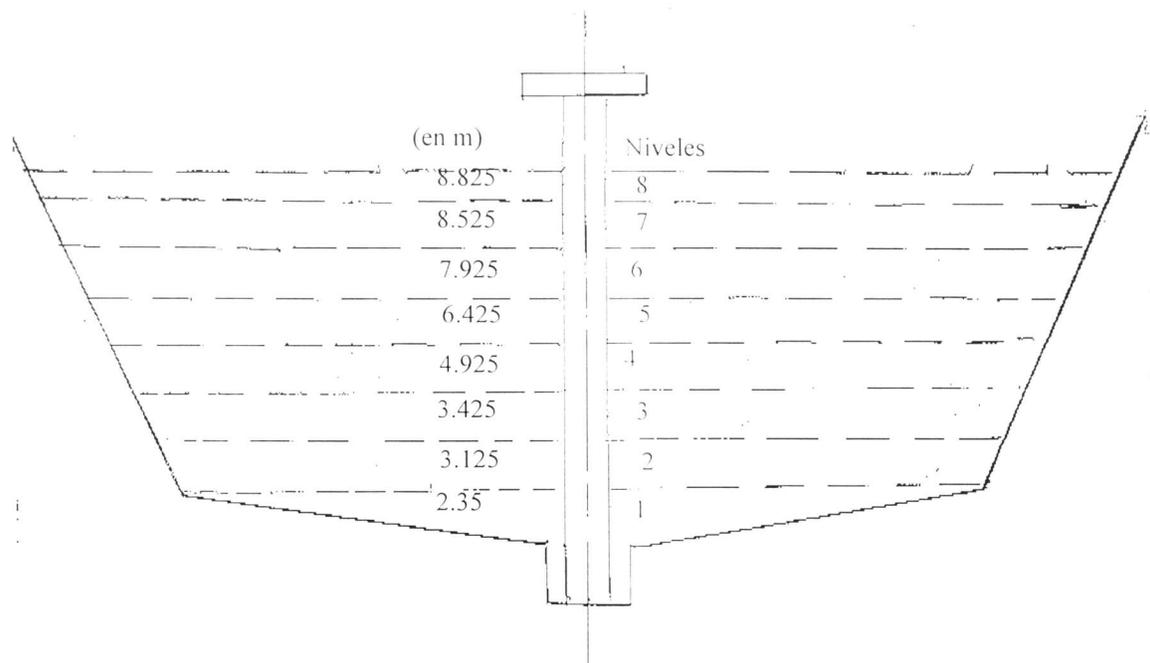


Fig .1 Representación esquemática del espesador industrial.

El control del proceso de sedimentación se lleva a cabo mediante la determinación del % de sólido por los niveles señalados en la figura 1 y en la descarga del espesador. También se determina la velocidad de sedimentación de la pulpa alimentada, según metodología propia de la Empresa, y, en ocasiones, el contenido de sólidos en suspensión en el agua de reboso.

Es importante destacar que para lograr el régimen estacionario en el proceso de sedimentación es necesario mantener el balance de flujos de entrada y salida de la pulpa a fin de no alterar la consolidación de las capas de pulpa a diferentes alturas del espesador. Este requisito de la operación unitaria, por lo general, no se cumple, lo que dificulta la estabilización del proceso de sedimentación y por consiguiente el logro de un porcentaje estable de sólido en la pulpa espesada.

No obstante, en períodos donde se ha logrado una estabilidad operacional aceptable, los porcentajes de sólidos de la pulpa han sido muy bajos, del orden del 44 %, lo que determina la importancia de las características del material de la pulpa cruda en la efectividad del proceso de sedimentación.

Hasta el presente el promedio más alto del % de Sólido de la pulpa espesada para un año fue de 46% (1990), y el más bajo de 43.22 (1968), siendo el histórico desde la puesta en marcha hasta 1996, de 44.88%, con una desviación media cuadrática de 0.9 y un coeficiente de variación de 2.76. Al analizar este período de trabajo por décadas se puede observar que en los años 60, la planta de espesadores de pulpa se mantuvo prácticamente en crisis de sedimentación lo cual puede estar influenciado tanto por factores tecnológicos como operacionales. En las décadas de los 70, 80 y 90 el porcentaje de sólido se ha mantenido prácticamente estable, ligeramente superior a 45 %, lo que puede estar relacionado por diversos factores. Sin embargo en la última década existe una tendencia a su disminución (ver fig. 2).

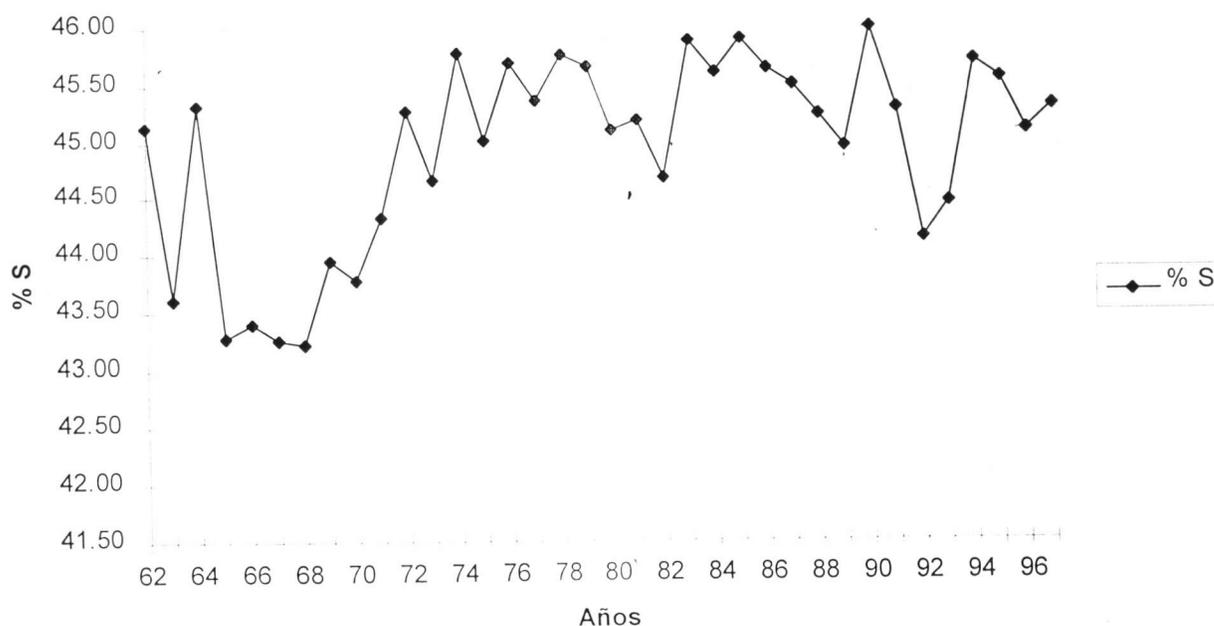


Fig. 2 Comportamiento del porcentaje de sólido (%S) promedio del producto espesado.

En los últimos 15 años se tomaron datos del porcentaje de sólido del producto espesado de los tres espesadores (A, B y C) y se trataron estadísticamente observándose un comportamiento de la sedimentación similar a lo observado en la fig. 3

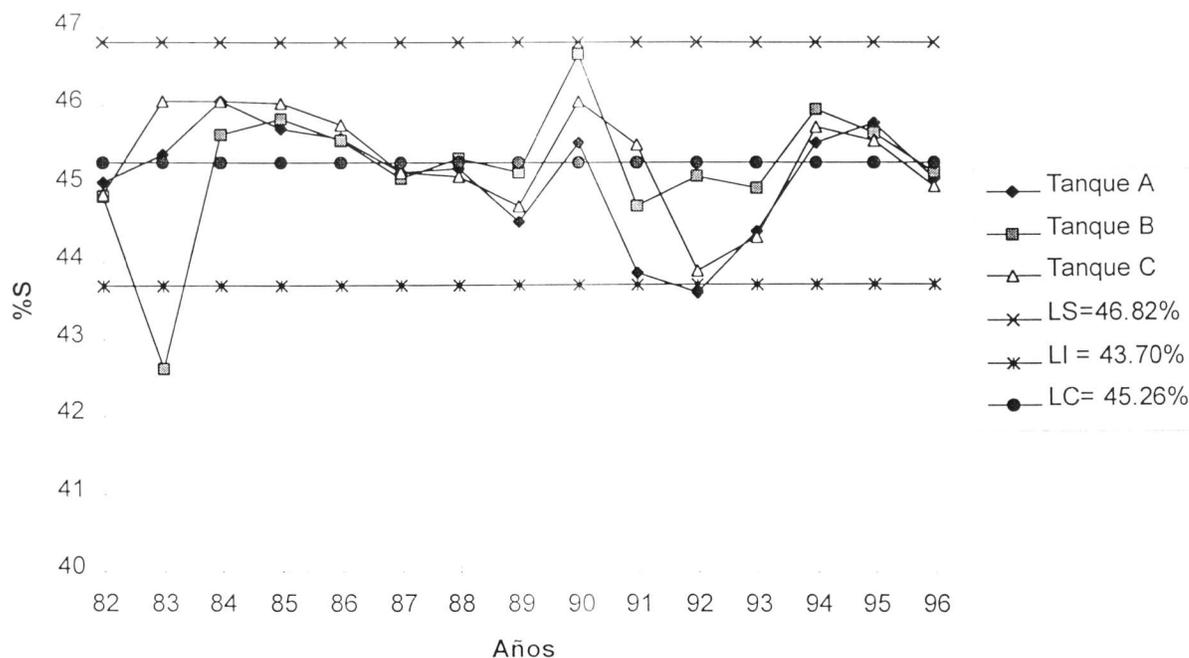


Fig.3. Gráfico de control del % de sólido en los últimos quince años.

De las figs 2 y 3 se puede apreciar una gran variabilidad en el % de sólido de la pulpa espesada, lo cual incide de manera muy significativa en el proceso tecnológico siguiente; la lixiviación ácida del mineral.

Por otra parte, en estos valores promedios anuales no se reflejan con toda claridad las denominadas "crisis de sedimentación", durante las cuales se altera considerablemente la consolidación de las capas de pulpa en el espesador y los sólidos no sedimentan adecuadamente, extrayéndose pulpas muy diluidas, con valores por debajo de 40% de sólidos; además, el agua de rebose se enturbia hasta alcanzar 10-15% de Sólidos (96, 140). Esta pulpa tiene dificultades en la transportación hasta la planta de lixiviación, donde han incidido los fenómenos reológicos (62).

Como resultado de una mala sedimentación del mineral los indicadores de consumo de materiales y eficiencia del proceso de lixiviación ácida son muy bajos, representando pérdidas cuantiosas para la Empresa. Observe la siguiente tabla en la que se representa un estimado de las pérdidas de toneladas de sulfuro de Ni+Co en el proceso de lixiviación y los valores en USD por concepto de porcentaje de sólido dejado de alcanzar por espesadores. El cálculo se realiza considerando el aumento sólo de un 1% de sólido, con un valor promedio anual de níquel en el mercado de 7480 USD/t para el año 1996.

**Tabla 1: Comportamiento de la producción de sulfuro de Ni+Co en el año 1996.**

Meses	$Q_1 S_{Ni+Co}$ (t)	%S	$Q_2 S_{Ni+Co} + 1\%S$ (t)	Pérdidas(t) $P = Q_1 - Q_2$	Pérdidas(en USD)
Enero	2 566.12	45.84	2 625.14	59.02	441 298
Febrero	1 938.44	45.79	1 983	44.65	333 292
Marzo	2 318.57	44.93	2 373.19	54.62	408 426
Abril	1 923.19	44.45	1 969.92	46.73	349 428
Mayo	2 360.63	45.21	2 416.42	55.83	417 474
Junio	2 256.96	44.69	2 311.25	54.29	405 958
Julio	2 259.08	44.73	2 313	54	403 790
Agosto	2 036.89	44.16	2 065.98	49.98	373 879
Septiembre	2 224.12	42.86	2 280	55.95	418 745
Octubre	2 064.69	44.09	2 114.7	50.7	381 357
Noviembre	2 082.25	44.99	2 132.04	49.79	372 384
Diciembre	2 002.57	44.84	2 050.36	47.79	357 429
$X_{media}$	2 169.45	44.69	2 219.71	51.9	388 621
Total	26 033		26 636.54	623	4 658 544

Observaciones:

$Q_1 S_{Ni+Co}$  : Producción de sulfuro de Ni+Co en el año 1996. (t)

$Q_2 S_{Ni+Co}$  : Producción de sulfuro de Ni+Co al aumentarse en 1%. (t)

% S: Porcentaje de sólido producido por espesadores.(%)

Sólo la disminución del contenido promedio anual de sólidos de la pulpa espesada en un 1% en el año 1996 significó una pérdida de 4 658 344 USD, por concepto de Ni y Co dejado de producir siendo el promedio de toneladas de sulfuro de Ni+ Co dejadas de producir de 51.9 t mensualmente lo que equivale a un promedio de 388 621 USD.

Por consiguiente, la obtención de un determinado % de sólidos cercanos al de diseño en el producto espesado de la Planta de Espesadores, constituye una tarea de gran importancia para la producción de la ECPSA, y para ello es necesario tener un conocimiento profundo de todos los factores que influyen en este proceso y las posibles vías para su mejoramiento.

### **1.3.- Trabajos de investigación realizados anteriormente sobre el proceso de sedimentación de la pulpa cruda.**

Sobre la sedimentación de la pulpa de mineral laterítico en agua, pulpa cruda, existe un conocimiento bastante limitado en el mundo. No es hasta finales de la década del 1960 que se comienza a tener conciencia de los problemas que se originan en la ECPSA en el proceso de sedimentación. En tal sentido el conocimiento sobre el comportamiento de estas pulpas es relativamente joven.

La sedimentación de la pulpa cruda ha sido objeto de estudio por un amplio grupo de investigadores de diferentes instituciones de prestigio nacional, entre ellas, las radicadas en el territorio de Moa: la ECPSA y el Instituto Superior Minero-Metalúrgico (ISMM), en las cuales se ha desarrollado el mayor volumen de trabajo, así como el Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM), en La Habana, la Universidad de Las Villas, en Villa Clara y la Universidad de Oriente, en Santiago de Cuba. También han participado en estos estudios especialistas de los Institutos Mejanobr, Guintzvetmet y de Novosibirsk, todos de Rusia.

Las investigaciones han estado dirigidas fundamentalmente al estudio de los factores que tienen mayor incidencia en la operación de la Planta de Espesadores: el % de sólido en la pulpa alimentada (83), la adición de floculantes orgánicos (65, 91, 100), la floculación

magnética (103), la utilización de pickets (65, 96, 141), el aumento del torque del mecanismo central (70), el pH (106), la composición iónica (51), la granulometría inicial (81) y otros.

Al estudiar la incidencia del tiempo de agitación en la preparación de la pulpa (18, 50, 54) se determinó que los minerales de diferentes frentes de explotación y sus mezclas presentan diferencias significativas en los indicadores del proceso: velocidad de sedimentación y % de sólido en la pulpa espesada. Ellos también analizaron el efecto del pH y de la conductividad eléctrica de la fase líquida de la pulpa, observándose que ambos disminuyen su valor a medida que aumenta el tiempo de contacto de la fase líquida con el mineral, lo cual coincide con lo expresado por Valdés (140, 141)

En otros trabajos (103) donde se ensayan las pulpas lateríticas en un campo magnético variaron la intensidad del campo desde 0 hasta 4000 Gauss, no se obtuvieron resultados satisfactorios. La magnetización de esta pulpa se dificulta por la variabilidad tan grande del mineral, por sus escasas propiedades magnéticas y por el tamaño de partículas. Posterior a este trabajo Arencibia, (8) separó las fracciones magnéticas y no-magnéticas de la pulpa, realizándose con estas pruebas de sedimentación por separado sin que tampoco se obtuvieran resultados positivos.

Se investigó además la adición de mineral lixiviado a la pulpa cruda con relaciones Mineral Lixiviado/Mineral Laterítico entre 2 y 5%. En estas pruebas se aplicó la agitación lenta de la pulpa en la probeta de medición (99). Los resultados tampoco fueron favorables. El mineral lixiviado es muy fino y al adicionarse a la pulpa cruda se incrementa la fineza del sólido, provocando fenómenos superficiales que empeoran las condiciones de sedimentación.

Teniendo en cuenta que las investigaciones realizadas no daban resultados positivos, se pensó en que los tanques espesadores no cumplían con la función para la cual fueron diseñados, por lo que (97) realizó un estudio de los parámetros de diseño constructivo de los tanques espesadores y comprobó que no existía desviación en la construcción del tanque, haciéndose alusión a la probabilidad de la incidencia del mineral en el proceso de sedimentación.

Los floculantes han sido de gran utilidad en el mejoramiento de los procesos de sedimentación y clarificación. En el caso del proceso de sedimentación de la pulpa cruda de la ECPSA este factor no ha sido obviado. Por diferentes autores ( 65, 83, 100, 101) se ha estudiado una amplia variedad de floculantes orgánicos, entre ellos, los de la serie Magnafloc, Sedomax, Glycol, Poliox, Percol y Alcopat no obteniéndose efectos beneficiosos, ni en la sedimentación ni en la compactación de la pulpa cruda. Inclusive, durante la prueba realizada en uno de los espesadores industriales ( 64 ), al cabo de varios días de operación hubo un efecto negativo, relacionado con el aumento de viscosidad de la pulpa, dificultando el bombeo de la misma hacia la Planta de Lixiviación. En estos resultados negativos pueden haber influido muchos factores: concentración de floculantes, lugar de adición, control de pH, conductividad u otros, los que no fueron totalmente definidos. Es conocido que cuando las sustancias se adicionan en pequeñas concentraciones y, específicamente, durante la preparación de la pulpa los indicadores del proceso de sedimentación se favorecen (26, 27, 51, 69 ).

El pH juega un papel importante en el proceso de sedimentación de la pulpa cruda. La experiencia indica que en el agua de reboso el pH disminuye su valor con el tiempo de contacto con el mineral laterítico. Novoa (106) propone controlar el pH de la pulpa para valores óptimos de 5.5-5.7 con el objetivo de lograr una mejor sedimentación y expone que a valores mayores o menores de ese rango se observa un efecto negativo en la velocidad de sedimentación. Los valores de pH alcanzados en este trabajo difieren de los obtenidos por Valdés (141), quien estudió los fenómenos químico-coloidales de las pulpas lateríticas, determinando el rango óptimo de pH entre 6.6 y 7.6, cercano al punto isoeléctrico, lo que ha sido comprobado en otros trabajos (18, 50, 52, 54, 69, 108). Sin embargo en (43) se muestra que el punto isoeléctrico se alcanza a pH= 4.8-8.4 .

Esta diferencia puede estar dada por las condiciones de trabajo utilizadas en cada caso y las características del mineral (43). Novoa en 1976 se limitó al estudio de las condiciones de sedimentación variando el pH en un rango muy estrecho (4-6.2). Por otra parte Valdés (141) realizó un estudio más profundo a través de mediciones del potencial electrocinético de la partícula por los métodos de macro y microelectroforesis en un intervalo de pH entre 0.3 y

12.4 estableciendo dos puntos isoelectricos a pH 2 y 7 respectivamente; entre estos dos valores la superficie de la partícula tiene carga positiva. Para un valor de pH inferior a 2 o superior a 7 las partículas se cargan negativamente. Cerca del punto isoelectrico a pH 6.6-7 no existen fuerzas electrostáticas capaces de separar las partículas entre sí y éstas tienden a coagularse con la formación de agregados que sedimentan a mayor velocidad; es a estos valores de pH que se alcanzan las mejores condiciones de sedimentación de la pulpa cruda. Este trabajo establece el valor de pH en que las pulpas sedimentan mejor, pero no tiene en cuenta la procedencia o tipo del mineral de la pulpa, o sea su composición granulométrica, mineralógica y química.

Otros autores (63, 96, 141, 142) experimentaron la utilización de pickets (cortadores) angulares y cilíndricos, los cuales hacen la misma función que los rastrillos de los brazos del mecanismo central. Estos pickets se colocaron en diferentes posiciones, vertical y horizontal, con alta y baja frecuencia de colocación. También se hicieron pruebas adicionando floculantes de la serie Magnafloc. Se detectó que los pickets angulares en sentido general producen un efecto positivo en la velocidad de sedimentación al colocarse en posición vertical. En las pruebas combinadas de pickets-floculantes se comprobó que no existen grandes diferencias para concentraciones de floculantes menores a 50 mg/l. Además se comprobó la tendencia a la homogeneización de las capas de sólidos a medida que aumentaba la relación floculante/mineral. Estos resultados permitieron su introducción a escala industrial.

Las pruebas a escala industrial con pickets verticales y cilíndricos fueron realizadas entre mayo de 1969 y febrero de 1972, posteriormente fueron eliminados, debido a que no se obtenían resultados positivos. Estos resultados pudieron estar afectados por inestabilidad operacional, como por ejemplo la adición de agua al cono, desbalance entre la alimentación y la extracción, y otros.

También se estudió a escala de laboratorio (104), la sedimentación de la pulpa cruda preparada con mineral de los yacimientos Yamanigüey y Zona B, así como el compuesto de ambos, con y sin agitación. A todas las muestras se les hizo análisis granulométrico. No se establecieron diferencias en las pruebas con y sin agitación, lo cual contradice lo establecido

por (81). Es evidente que en estos resultados influyeron la granulometría del mineral, mineralogía y composición química del mineral.

Nebot (98) al ensayar la sedimentación de pulpas preparadas con diferentes granulometrías iniciales, con tamaños máximos de partículas de 1.65, 1.17 y 0.833 mm, después de pasar por las lavadoras de paletas, afirma que no hay resultados satisfactorios. Los porcentajes de sólido obtenidos no satisfacen las exigencias del proceso y las velocidades de sedimentación son bajas. Al utilizarse granulometrías superiores al tamaño de diseño (0.833 mm), se dificulta la preparación de las pulpas lateríticas, específicamente el lavado. Las partículas con tamaño superior a 0.833 mm presentan características granulométricas, químicas y mineralógicas que pueden mejorar las condiciones de sedimentación, y a la vez, empeoran la calidad del producto que se envía a lixiviación. Las partículas + 0.833 mm son contenedoras de minerales serpentínicos, ricos en silicatos, de magnesio (120, 121), que afectan considerablemente el proceso de lixiviación.

Kondukov, (81) realizó trabajos relacionados con el efecto de la variación del porcentaje de sólido (20-40)% de la pulpa alimentada al proceso de sedimentación, obteniendo resultados positivos en la velocidad de sedimentación y en el % de sólido final. Al aumentar el % de sólido inicial se alcanzaron mejores condiciones de sedimentación. Pero las pulpas lateríticas durante su preparación no debe excederse de 25 % de sólido, ya que también, se dificultaría el lavado de los minerales .

Plummer (110) mostró que existen diferencias significativas entre la pulpa preparada normalmente con tamaños menores de 0.833 mm y la compuesta sólo por partículas menores de 0.044 mm. (ver fig.4). Aquí también se realizó un estudio granulométrico a la pulpa que sedimenta por capas, utilizando el método de elutración. Se determinó que existe una distribución desigual de los distintos tamaños de partículas a través de la columna de sedimentación, predominando las más finas en orden decreciente desde la capa superior a la inferior. En el mismo trabajo se comprobó que la adición de  $MgCl_2$ ,  $H_2SO_4$ ,  $Na_2CO_3$  y  $Na_2SiO_3$  (0.1-2%) influye negativamente en el proceso de sedimentación. También planteó la

variación del pH durante las pruebas, lo cual está relacionado con las características mineralógicas del mineral, aunque no se hace el estudio mineralógico correspondiente.

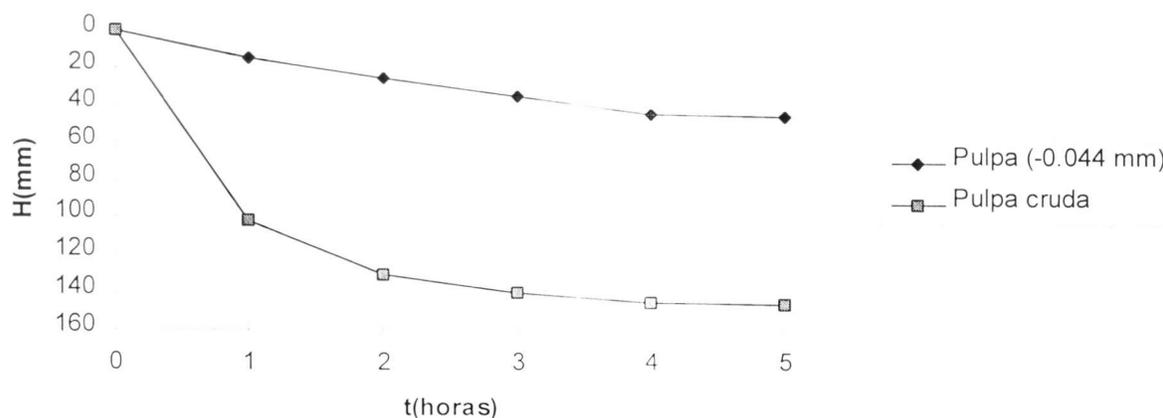


Fig. 4 Comportamiento de la sedimentación de la pulpa cruda y la pulpa que contiene partículas (-0.044) mm.

Con estas mismas sustancias químicas (51, 69) determinaron el efecto positivo que éstas producen en pequeñas concentraciones (0.001-0.008 %), particularmente el  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , el  $\text{MgCl}_2$  y el  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Ha sido polémico el tema sobre la diferencia de la velocidad de sedimentación de la pulpa a la salida de la Planta de Preparación de Pulpa y a la entrada de la Planta de Espesadores. Taquechel, (136) estudió la sedimentación de la pulpa en todo el tramo comprendido entre ambas Plantas (~ 4 km) y se determinó que la composición granulométrica del mineral varió con el aumento de la proporción de partículas finas, y por consiguiente disminuyó la velocidad de sedimentación (Fig .5). Se pone de manifiesto la influencia de la constante agitación de la pulpa en su recorrido

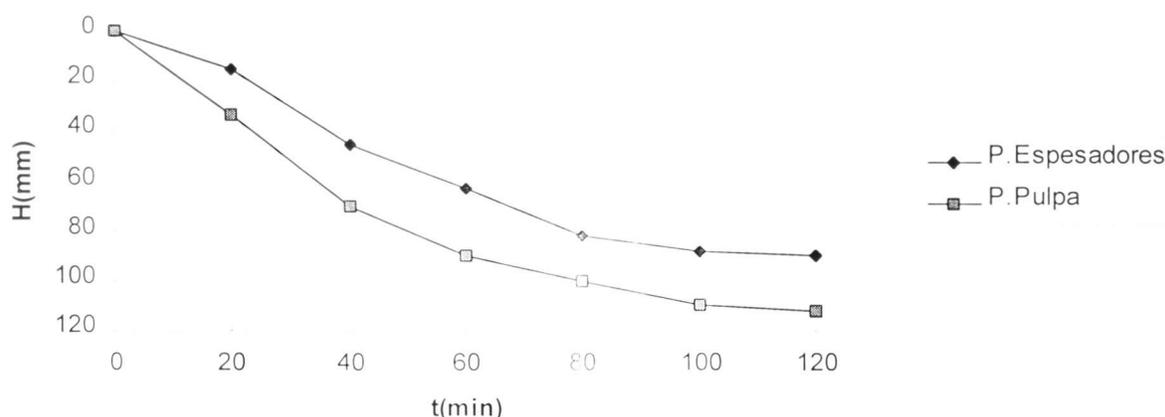


Fig 5. Comportamiento de la sedimentación de la pulpa en Planta de Pulpa y en Espesadores

Algunos trabajos (27, 47) trataron de explicar que la sedimentación de las pulpas lateríticas está influenciada por el contenido de Mg y Al presentes en el mineral. En el estudio estadístico realizado por (47) se comprobó que no existe ninguna relación entre el contenido de estos elementos y la velocidad de sedimentación. Por otra parte, (27) a través de muestras tomadas de los diferentes frentes de explotación, ensayó la sedimentación de cada uno, así como mezclados y los resultados de las pruebas se trataron estadísticamente para definir las posibles relaciones entre el contenido de estos elementos y la velocidad de sedimentación, obteniéndose similares resultados, sin embargo, las muestras de estos últimos experimentos fueron tratadas con electrolitos ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  y  $\text{MgCl}_2$ ), los cuales, favorecieron la velocidad de sedimentación y el porcentajes de sólido.

Otros trabajos se han realizado aprovechando los períodos críticos del proceso productivo en la Plantas de Espesadores y de Lavaderos (130). Mediante un análisis de los datos de operación en esos períodos, se destaca que la mala sedimentación está dada por el desbalance entre alimentación y extracción y sostienen que la baja velocidad de sedimentación se debe al bajo contenido de Magnesio en el mineral (132), que origina un pH muy bajo en los tanques espesadores y por tanto la saturación de cargas positivas que originan repulsión de las partículas. Se destacan dos aspectos a considerar como causas principales de los problemas de sedimentación: las características del mineral y la operación de la Planta de Espesadores.

Ponce (111) estudió por primera vez la influencia de la composición mineralógica del mineral en el proceso de sedimentación de la pulpa cruda. Se tomaron muestras de esta pulpa en los principales puntos de muestreo de la Planta de Preparación de Pulpa en un período de trabajo de sedimentación regular. Se aplicaron diversos métodos de investigación: análisis mineralógico, petrográfico, granulométrico, químico y separación magnética. Como resultado se obtuvo un comportamiento anómalo de la clase  $-0.044$  mm, conformada fundamentalmente por la fase gibbsita. Asimismo, explicaron la relación entre la composición mineralógica y química y la posibilidad de que sus variaciones influyan en la sedimentación de la pulpa cruda. No se establecieron comparaciones con otros períodos de trabajo que permitieran detectar y explicar las diferencias. A pesar de ello, éste es uno de los trabajos más completos realizados en la búsqueda de las causas que influyen en el comportamiento de la sedimentación de la pulpa cruda. Al igual que la inmensa mayoría de los trabajos de investigación, toma como materia prima para su estudio la pulpa alimentada al proceso sin conocer el origen del mineral que la compone.

Posteriormente, Quintana (116, 117) hizo un estudio de la composición granulométrica y mineralógica del mineral de forma independiente, sin establecer relación con los indicadores del proceso de sedimentación. Se tomaron muestras de pulpa cruda en diferentes puntos de la Planta de Preparación de Pulpa y se realizó análisis granulométrico del mineral por las vías de tamices, levigación y Difracción de Rayos-X. Se determinó que la fracción másica de la fracción menor de  $0.037$  mm alcanza entre 82 y 87%, y está constituida principalmente por goethita e hidrogoethita en un 80-92% y por hematita en un 5%.

En otro trabajo (72) se refiere la influencia negativa del componente Mn-Ni-Co (asbolanas) de las lateritas sobre las propiedades de sedimentación. Por otra parte, las asbolanas se encuentran en muy poca cantidad en las cortezas de intemperismo de los minerales lateríticos cubanos, por lo que su incidencia en el proceso de sedimentación puede no ser significativa.

Muchos de los factores analizados no están estudiados con suficiente grado de certeza y la explicación del efecto obtenido se hace difícil, en primer lugar, debido a que se han investigado de forma individual o combinadamente con otro factor, no analizándose los

restantes. Asimismo, la inmensa mayoría de los ensayos realizados tomaron como base la pulpa preparada, sin conocer el origen mineralógico y granulométrico del mineral que la conforma. Por ello, está latente la posibilidad de que resultados que fueron negativos pudieran ser positivos al variar las características del mineral.

### **Conclusiones**

1. La generalidad de las investigaciones realizadas sobre el proceso de sedimentación han estudiado la influencia de cada factor o la combinación de algunos de ellos sin tener en cuenta su interrelación para garantizar las buenas condiciones de sedimentación.
2. De forma general se ha estudiado el proceso de sedimentación de las pulpas crudas lateríticas utilizando las pulpas industriales sin tener en cuenta las características de origen de la fase sólida.
3. Diferentes autores se han referido al importante papel que juega la granulometría y la mineralogía en el proceso de sedimentación de las pulpas lateríticas.
4. Existe un problema en la Planta de Espesadores de Pulpa de la ECPSA que hasta el momento está latente. Inciden una variedad de factores que lo hacen complejo, entre ellos se destacan: La composición iónica de la fase líquida de la pulpa, la granulométrica y la mineralógica de la fase sólida. Por lo tanto, para enfrentar y dar solución a este problema se hace necesario realizar una caracterización integral del mineral laterítico, así como del proceso de preparación de la pulpa cruda, lo cual constituye uno de los principales objetivos del presente trabajo.

## **CAPÍTULO II**

# **FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA EL ESTUDIO DE LA SEDIMENTACIÓN.**

## CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA EL ESTUDIO DE LA SEDIMENTACIÓN.

### 2.1.- Aspectos generales

La sedimentación es una operación de separación sólido-líquido que ocurre de una manera aparentemente sencilla pero engendra una gran complejidad. Se realiza en equipos denominados sedimentadores, y la eficiencia de este proceso depende en gran medida de la diferencia de densidades entre el sólido y el fluido, así como de la viscosidad del último.

La teoría de separación sólido líquido mediante la sedimentación se basa en la mecánica de interacción de un sólido y un fluido que se encuentran en un movimiento relativo. Cuando una partícula se desplaza en un medio fluido o cuando este último la contornea, la interacción entre ambas se manifiesta en la aparición de ciertas fuerzas y resistencias que tienden a arrastrar el cuerpo sólido o retardar su movimiento según sea el caso (59, 123).

La condición de arrastre o de la resistencia depende en alto grado del carácter del movimiento del fluido y de la forma de la partícula.

La fuerza que un fluido ejerce sobre una partícula inmóvil al que contornea se llama fuerza de arrastre y ésta es equivalente a la fuerza de resistencia que el fluido ejerce a un cuerpo en movimiento y se puede expresar según Newton por:

$$F_D = C_D A \delta u^2 / 2$$

Donde:

$F_D$ : Fuerza de resistencia o de arrastre; N

$C_D$ : Coeficiente de arrastre

A: Área proyectada del cuerpo sobre un plano perpendicular al movimiento del fluido o del sólido;  $m^2$

$\delta$ : densidad del fluido;  $Kg / m^3$

u: velocidad de movimiento del cuerpo;  $m / s$

El proceso de sedimentación consiste en la separación de sistemas heterogéneos sólido - líquido bajo la acción de la fuerza de gravedad, en el que se obtienen dos productos: un fluido claro que sobrenada y un producto espesado cuya concentración de partículas sólidas aumenta (33, 36, 56, 78, 79, 95, 123)

La sedimentación está enmarcada dentro de los procesos gravitacionales, sujeto a consideraciones teóricas con carácter de hipótesis. En las investigaciones teóricas se han determinado dos direcciones científicas sobre la velocidad de desplazamiento de los granos o partículas; la determinista y la probabilística estadística (44).

Las pulpas compuestas por mineral laterítico presentan partículas muy finas (lamas) y alta concentración de sólidos (53). Esta pulpa se espesa desde 25 hasta alrededor de 48% de sólido en peso, bajo estas condiciones se ha comprobado que la sedimentación se realiza en condiciones de caída contrariada, y puede ser comparada con las suspensiones utilizadas en los procesos de beneficio de Medios Densos. El proceso de separación de los granos minerales en los equipos gravitacionales ocurre por lo general en pulpas polidispersas caracterizadas por su densidad, viscosidad, resistencia al esfuerzo cortante, estabilidad, etc.

En el proceso de espesamiento de las pulpas pueden crearse dos condiciones particulares de desplazamiento de los sólidos; Mono y Polidispersa y a su vez puede dividirse en dos tipos de movimientos;

- movimiento conjunto de partículas similares.
- movimiento de partículas no similares.

Las pulpas estudiadas son polidispersas y de tamaños no similares, estas se diferencian de las primeras por la interacción de partículas de diferentes tamaños produciendo fenómenos físico - químicos complejos que afectan tanto su sedimentación como su reología (43, 61)

Es conocido que las partículas sólidas en un medio fluido en reposo (agua) tienden a caer bajo la acción de la fuerza de gravedad. Si una partícula cae en un medio lo suficientemente grande sin

la influencia de otras fuerzas, excepto la resistencia del propio medio, la misma alcanzará la velocidad límite de caída que depende del tamaño, densidad de la partícula y de las propiedades del fluido utilizándose diversas expresiones matemáticas para determinar la misma. En el caso que se precipite más de una partícula como son las pulpas conformadas por minerales lateríticos, a la resistencia del medio se le sumarán otras fuerzas que dificultan la caída de las partículas dando lugar a condiciones de caída contrariadas (59, 44).

- La velocidad de sedimentación de una partícula en una suspensión concentrada puede ser considerablemente inferior a su velocidad límite de caída en condiciones de caída libre cuando los efectos de las interacciones mutuas son despreciables.

El grado de contrariedad y por tanto la disminución de la velocidad de caída se encuentra en dependencia directa con la concentración de partículas que caen, permitiendo explicar la disminución del número de partículas al aumentar la altura en la columna de sedimentación.

- Las pulpas constituidas por partículas finas tienden a comportarse de forma distinta a las constituidas con partículas gruesas, poniéndose de manifiesto en las primeras el alto grado de floculación como consecuencia de su elevada superficie específica.

En el caso de partículas muy pequeñas (lamas), del orden de varios micrómetros, el peso de éstas y sus velocidades de caída resultan tan pequeñas que las fuerzas superficiales y las interacciones entre las partículas pueden mantenerlas en suspensión. En este caso también tienen una fuerte influencia los fenómenos de coagulación y repulsión en la pulpa, teniendo en cuenta que la coagulación se produce por la compresión de la doble capa eléctrica.

Las teorías acerca de la estabilidad de los coloides se basan en la interacción química. La desestabilización se contemplaba como el resultado de reacciones químicas ocurriendo entre partículas coloidales (63). La teoría física moderna utilizaba el concepto de la doble capa eléctrica (Verwey, Overbeek, 1948). Dado que las partículas presentan una carga neta, debe existir un potencial eléctrico en sus superficies al igual que en todos los campos eléctricos. El valor del potencial disminuye con la distancia desde la superficie. Los iones de una carga

eléctrica opuesta a la de la partícula tienden a emigrar de la solución a una región estrecha que rodea la partícula bajo la influencia del campo eléctrico.

En los casos en que se combina una mezcla de partículas muy pequeñas (lamas) y otras mayores ocurre que estas últimas para precipitar tienen que vencer no sólo la resistencia del medio sino también desplazar a las partículas más pequeñas que tienen menor velocidad de caída, de esta forma las partículas pequeñas le comunican al medio fluido un "aumento de la densidad" respecto a las partículas grandes, y estas últimas resultan las causantes de la suspensión de las partículas en el medio, de tal forma que prácticamente se detiene el proceso de sedimentación.

Para la determinación de la velocidad de caída contrariada de partículas de diferentes géneros no se cuenta con fórmulas suficientemente fundamentadas.

En tales casos se puede utilizar la fórmula de Gaudin:

$$V_{ct} = V_0 (1 - \gamma)(1 - \gamma)^{2/3} (1 - 2.5 \gamma) m / s \quad (1)$$

donde:

$V_{ct}$  - velocidad de caída contrariada : m/s

$V_0$  - velocidad límite de caída libre (por Stokes) : m/s

$m$  - Coeficiente de llenado

$\gamma = (1-m)$  - concentración volumétrica del sólido..

Esta fórmula, sólo puede ser utilizada para partículas pequeñas y concentraciones menores de 30 % de sólido por volumen ( si la concentración es 40 % o mayor  $V_{ct} = 0$ ).

Durante la sedimentación de partículas relativamente grandes en presencia de pequeñas (100 o más veces mayores que otras) puede considerarse que las primeras caen en una suspensión, o sea, se considera el líquido con una determinada densidad y viscosidad determinada por las partículas pequeñas que le comunican sus propiedades.

La velocidad de caída de las partículas grandes en la suspensión no estructurada se puede determinar aproximadamente según las investigaciones del Instituto Mejanoobr (44) por :

$$V = V_{ct} \frac{\rho_s - \rho_p}{\rho_s - \rho_p} \frac{\rho_{pct}}{\rho_p} \quad (2)$$

Donde:

$V_{ct}$  : velocidad de caída contrariada: m / s

$\rho_s$  : densidad del sólido: kg / m<sup>3</sup>

$\rho_p$  : densidad de la pulpa; kg / m<sup>3</sup>

$\rho_{pct}$  : densidad de la pulpa compuesta solo de aquellas partículas cuya velocidad se determina por la concentración volumétrica de las partículas en suspensión.: Kg / m<sup>3</sup>

Se evidencia que al cambiar la composición de tamaño de las partículas se afecta la velocidad de caída de las partículas relativamente grandes como pequeñas.

Sin embargo, su estudio teórico siempre ha confrontado dificultades, el problema estriba en la naturaleza hidrodinámica del desplazamiento de una partícula a través de un fluido, lo cual, en principio, fue solucionado por la Ley de Stokes para partículas esféricas, la cual se expresa en (44, 59) mediante la fórmula:

$$V = gD^2(\delta - \rho) / 18\eta, \quad (3)$$

Donde,

V - velocidad de caída de la partícula con respecto al medio(m/s)

g - aceleración debida a la gravedad; ( m / s )

D - diámetro de la partícula,( mm )

$\delta$  - densidad específica de la partícula,( kg / m<sup>3</sup> )

$\rho$  - densidad del medio( Kg / m<sup>3</sup> )

$\eta$  - viscosidad del medio( Ns / m<sup>2</sup> )

Esta fórmula es aplicable en sistemas dispersos sólido-líquido cuando la concentración del sólido es muy pequeña, de forma tal que la distancia entre partículas sea mayor que su diámetro. De hecho no hay teoría que haya podido interpretar los resultados experimentales cuando la concentración de partículas es relativamente grande.

Kynch (86), trata de remediar esta dificultad asumiendo que en cualquier punto de un sistema disperso, la velocidad de caída de una partícula depende solamente de la concentración local de partículas en ese punto, " $\tau$ ". El proceso de sedimentación, entonces, es determinado enteramente por una ecuación continua, desconociendo los detalles de las fuerzas que inciden en las partículas.

- Kynch demostró que la velocidad de sedimentación y la concentración de cualquier capa de la pulpa puede ser determinada por la variación de la velocidad de sedimentación observada en una simple prueba discontinua de laboratorio, de acuerdo con esta teoría se predice la formación de una superficie divisoria superior durante el proceso de sedimentación de las partículas, cuyo desplazamiento, conjuntamente con el conocimiento de la concentración inicial de las partículas, es suficiente para determinar la variación de la velocidad de sedimentación  $V$  a medida que varía la concentración local de las partículas ( $\tau$ ), se establece que la velocidad de sedimentación de una partícula es función de la concentración local de sólidos alrededor de esa partícula, o sea:

$$V = f(\tau) = dS / d\tau. \quad (4)$$

donde  $S$  es el flujo de partículas que atraviesa una sección horizontal de unidad de área del recipiente en la unidad de tiempo. Esta función no se define con claridad y puede cambiar de

diferente manera según cambie la concentración de sólido. Se distinguen dos zonas de sedimentación, la denominada "sedimentación libre", en la cual la concentración de sólido es menor y la velocidad de sedimentación es mayor, y la de "compresión", donde las partículas están mucho más cerca y su concentración local es mayor, siendo la velocidad de sedimentación mucho menor.

Posteriormente Talmage y Fitch hacen una revisión de la teoría de Kynch (86), y parten de la conjugación de ésta con el trabajo realizado por Coe y Clevenger (135) sobre la determinación del área unitaria de sedimentación en sus pruebas a diferentes concentraciones de sólido (pruebas por zonas).

Como resultado de este trabajo se sugiere un método para evaluar el comportamiento de sedimentación de la pulpa en una sola prueba discontinua a su concentración de sólidos inicial, ( $C_o$ ), mediante la determinación del tiempo unitario, ( $t_u$ ), el cual se calcula a partir de la curva de sedimentación  $H_i = f(t_i)$ . Según norma; NRIB,579,1983.

$$t_u = t_c (H_1 - H_u) / H_1 - H_c, [ \text{min} ] \quad (5)$$

Donde,  $t_c$  y  $H_c$  son determinados gráficamente y desde el punto de vista físico constituyen el tiempo y la altura respectivamente a partir de la cual se alcanza la “zona de compresión” de la pulpa;  $H_1$  también se determina gráficamente como la intersección de la tangente en el punto de compresión, con el eje de las ordenadas. Físicamente, representa la zona de “sedimentación libre” de la pulpa.

A partir del tiempo unitario se calcula el flujo de sólidos por unidad de área en la unidad de tiempo,  $Q_u$ ,

$$Q_u = 1440 C_o H_o / t_u, [ \text{ton} / \text{m}^2 \cdot \text{día} ] \quad (6)$$

Donde  $H_o$  es la altura de la pulpa al inicio de la prueba, en metros (m).

Además, se determina la concentración de sólidos en el tiempo unitario,  $C_u$ , o el porcentaje

de sólidos final en el tiempo unitario (%Su) de acuerdo con las siguientes proporciones:

$$C_u = C_o H_o / H_u, [ \text{ton} / \text{m}^3 ] \quad (7)$$

$$\%Su = 100 C_u / \partial_t, [ \% ] \quad (8)$$

donde  $\hat{\rho}_t$ , es la densidad final de la pulpa en el tiempo  $t_u$ , dada en ton /m<sup>3</sup>.

Por otra parte se calcula la velocidad de sedimentación en ese punto, a través de:

$$V_s = K(H_0 - H_c) / t_c \text{ , [ m / s ] } \quad (9)$$

donde:  $K = 0.0888$

Por su sencillez y fundamentación teórica, este método fue aplicado en las pruebas de sedimentación realizadas.

Por supuesto, el método, como ya se ha explicado anteriormente, no puede ser utilizado para el dimensionamiento del espesador, pero sí puede reflejar, comparativamente, un mejor o peor comportamiento de sedimentación.

De acuerdo al tamaño de las partículas que componen las pulpas lateríticas es indudable la incidencia de los fenómenos superficiales de las partículas que se producen al hacer contacto con el agua, lo que provoca la complejidad de la sedimentación de las partículas minerales en el medio.

## **2.2.- Efecto de la composición iónica de la pulpa en el proceso de sedimentación**

La composición iónica de la pulpa (presencia de diferentes iones en una concentración dada) influye decisivamente en el fenómeno de dispersión (repulsión) o coagulación (adhesión) de las partículas. Esto se debe a la presencia de iones en la fase líquida que actúan en la superficie de las partículas sólidas variando las propiedades superficiales y el potencial

electrocinético, que determinará la atracción o repulsión entre las superficies sólidas (63, 74).

El fenómeno que tiene lugar ha sido estudiado por diferentes investigadores, los cuales han formulado criterios referentes a la acción de los iones (43, 53, 54, 77, 134).

Según Szekely y Popa (134), en el caso de la pulpa de caolín alrededor de la micela de

colinita se sitúan empaquetaduras de iones hidrógeno  $H^+$  y a una cierta distancia de  $d$  (ver fig.6) se sitúan los iones  $OH^-$  que le confieren una carga negativa.

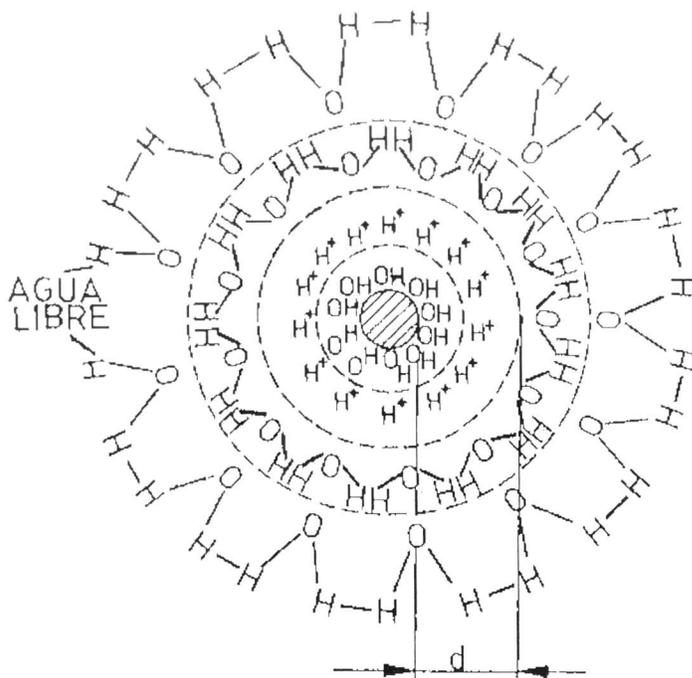


Fig. 6. Representación gráfica de la atmósfera iónica en la estructura de una micela de caolín.

Concretamente la diferencia de potencial entre las superficies negativas de las micelas y el espacio que la envuelve según la teoría electrocinética, expresa el potencial electrocinético, ( $\zeta$  potencial)

La zona alrededor de la partícula está determinada por la doble capa eléctrica y los iones que componen la atmósfera externa que no están ligados directamente a la partícula.

En la suspensión constituida por multitud de partículas existen fuerzas antagónicas, de una parte ellas repelen las cargas superficiales (positivas o negativas) y de otra parte están sometidas a las fuerzas de atracción molecular (fuerzas de Van Der waals). Si cuando las partículas se aproximan los gradientes de potencial son tan grandes, que las fuerzas de

repulsión superan las de atracción, se produce la dispersión de las partículas, la pulpa se hace estable y la sedimentación lenta (124). En el caso contrario las partículas tienden a formar agregados y por tanto la sedimentación se acelera.

La presencia de iones de signos opuestos al de las partículas coloidales provoca una disminución en el valor numérico del  $\zeta$  potencial y mediante experimentos se ha demostrado que las sales alcanzan un valor crítico, la repulsión entre las partículas que se aproximan se reduce a un valor tal que chocando con cierta velocidad pueden unirse y de esta forma se realiza la coagulación (68, 74, 134). La unión en este caso puede explicarse por que al unirse la partícula disminuye su superficie total y la energía libre del sistema, por lo que puede producir la unión entre las partículas, oponiéndose las cargas eléctricas.

Los estudios sobre la arcilla (134), explica que los cationes de fuertes cargas, y pequeños radios iónicos solubles  $\text{Ca}^{++} = 0.97\text{A}^0$ ,  $\text{Mg}^{++} = 0.65\text{A}^0$ ,  $\text{Al}^{+++} = 0.57\text{A}^0$ , son fuertemente atraídos por las cargas negativas de las micelas, y en este caso al adsorberse, estos iones disminuyen el radio de la capa iónica y las fuerzas de atracción superan las de repulsión.

Por el contrario los iones de gran radio y con cargas que puedan ser fuertemente adsorbidos  $\text{Na}^+ = 0.98\text{A}^0$ ;  $\text{K} = 1.33\text{A}^0$ , mantienen una atmósfera iónica de gran diámetro. Por tanto puede afirmarse que cualquier modificación en la atmósfera iónica en la carga eléctrica superficial de la partícula o en la constante dieléctrica del líquido tienden a modificar las condiciones de estabilidad de la suspensión.

Los minerales lateríticos se encuentran conformados por una gran variedad de partículas muy pequeñas (alrededor de 60 % con tamaño menor de 10 micrones) y resultan precisamente estas partículas las que determinan la estabilidad de las pulpas que tienen un comportamiento similar a las arcillas (53) y a su alrededor se crean condiciones como las explicadas anteriormente (52-54). En este caso la complejidad se incrementa por la gran variabilidad de la composición química y mineralógica en los minerales de las diferentes zonas de explotación en el yacimiento. Esto último condiciona las frecuentes variaciones que se observaron en la fig. 3.

En los estudios realizados por (18, 53, 134) se ha puesto de manifiesto que los minerales de diferentes zonas del yacimiento presentan diferencias significativas tanto en la velocidad de sedimentación como en la de compactación del sólido espesado. También las mezclas de los minerales en dependencia de la zona de donde proceden presentan un comportamiento diferente.

### Conclusiones

1. La sedimentación de pulpas lateríticas presentan un comportamiento complejo, y se enmarca dentro de los procesos gravitacionales, sujetos a consideraciones teóricas con carácter de hipótesis en la que puede establecerse un nexo entre la dirección científica determinista y la probabilística estadística.
2. El método de Talmage y Fitch constituye uno de los métodos más sencillos para estudiar el comportamiento del proceso de sedimentación de las pulpas lateríticas.
3. Los fenómenos de coagulación y repulsión en las pulpas dependen de la composición iónica de la fase líquida y puede ser regulada con la utilización de sustancias químicas.

## **CAPÍTULO III**

**ESTUDIO DE LOS PRINCIPALES FACTORES  
QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE  
LA SEDIMENTACIÓN DE LA PULPA CRUDA.**

### **CAPÍTULO III. ESTUDIO DE LOS PRINCIPALES FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO DE LA SEDIMENTACIÓN DE LA PULPA CRUDA.**

Las investigaciones precedentes, realizadas sobre el proceso de sedimentación de las pulpas crudas de minerales lateríticos, han estado dirigidas a estudiar los factores que influyen de forma independiente o a la combinación de algunos de ellos, sin establecerse relaciones que permitan indicar el comportamiento de la sedimentación de las pulpas crudas.

En el presente trabajo se estudian los factores fundamentales que inciden en el proceso de sedimentación buscando en ellos las causas que producen su deficiente comportamiento, así como también establecer relaciones, que permiten indicar el futuro comportamiento de esta operación o actuar sobre los parámetros que afectan esas relaciones para conducir al buen comportamiento del proceso de sedimentación. Para ello se estudian :

- Características geólogo-mineras de los yacimientos lateríticos
- Composición mineralógica del mineral
- Proceso de preparación de la pulpa
- Composición granulométrica del mineral
- Composición iónica de la fase líquida de la pulpa

En las investigaciones se utilizaron un considerable número de muestras 80 en la caracterización química-mineralógica, 86 en la granulométrica , y 255 en la caracterización de la cinética de la sedimentación.

Los aspectos relacionados con la metodología de Talmage y Fitch expuesta en el capítulo anterior permitirá el estudio del comportamiento de la sedimentación de las pulpas de minerales lateríticos, en el presente capítulo.

### 3.1 Características geológico mineras de los yacimientos lateríticos

Los yacimientos lateríticos de Moa están localizados al nordeste de la provincia de Holguín. En esta área, de alrededor de 50 km<sup>2</sup>, las cortezas lateríticas encierran importantes reservas de Níquel y de Cobalto. Cuba constituye uno de los países con mayores reservas de Ni, las cuáles se explotan y procesan por la tecnología de lixiviación ácida a presión en la Empresa Comandante Pedro Sotelo Alba (Moa). También se explotan por vía carbonato amoniacal en las Empresas: Comandante, Ernesto Che Guevara (de Moa) y René Ramos Latour (de Nicaro)

La laterita, es una mezcla de minerales de óxidos e hidróxidos de hierro y de aluminio con minerales arcillosos. En (12) este mineral se define como “suelo rojo tropical que se desarrolla en regiones húmedas tropicales con buen drenaje”.

Los yacimientos ferroniquelíferos están constituidos por lateritas típicas, producto de los procesos de intemperismo sobre las rocas básicas y ultrabásicas serpentinizadas bajo las condiciones de un clima tropical y húmedo, donde se establecen concentraciones residuales de Ni, Co, Fe, Cr, Al y Mn, entre otros, y se lixivian la Sílice y el Magnesio (1, 39, 118).

Estos yacimientos se distinguen por presentar cierta regularidad vertical. En su perfil geológico pueden establecerse determinadas zonas u horizontes (87, 119, 121, 145). Cada una de las zonas representa las distintas etapas del desarrollo evolutivo de la corteza de intemperismo (131), presentando características químicas propias.

Los depósitos ferroniquelíferos se caracterizan por estar compuestos por muestras de minerales entremezclados, físicamente difíciles de separar, de fina granulometría.

Del perfil típico de alteración laterítica, sólo se utiliza como alimentación a la fábrica, la parte constituida por los Ocreos Superior, Medio e Inferior, conocida como Laterita de Balance (LB) (87, 121). La composición química de los tres horizontes que constituyen la LB, así como su composición mineralógica según están dadas en las tablas 2 y 3 respectivamente.

**Tabla 2: Composición química de los diferentes horizontes del yacimiento Moa.**

Componentes	Concentración por Horizontes. %		
	OS	OM	OI
MgO	0.43	0.55	1.08
SiO <sub>2</sub>	2.30	2.37	3.93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.42	5.904	4.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	67.36	68.84	61.56
NiO	1.35	1.51	1.86
CaO	0.17	0.12	0.07
MnO	0.92	0.85	0.54
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.20	4.185	2.194
CuO	0.012	0.016	0.017

Las zonas superiores se caracterizan por estar formadas por óxidos e hidróxidos de hierro principalmente. En tanto hacia la parte inferior predominan los compuestos silicatados magnesianos.

**Tabla 3. Composición mineralógica de la LB.**

Fase Mineral	%
Goethita	69
Espinelas	10
Hematita	5
Gibbsita	8.5
Cuarzo	2.5
Cloritas	2.5
Serpentina	2.5

De esta forma se evidencia que la materia prima está constituida básicamente por óxidos e hidróxidos de hierro: Goethita e Hidrogoethita, y Hematita, así como y Cromoespinelas.

Por otra parte, uno de los aspectos característicos de estos yacimientos es el hecho de que para un mismo componente químico, pueden existir varias formas mineralógicas, (ver tabla 4), las que pueden explicar las variaciones observadas en diferentes frentes de explotación del yacimiento. Además, vale señalar que el desarrollo de la corteza de intemperismo no ha sido homogéneo en todos los sectores del yacimiento. Existen sectores con perfiles de alteración laterítica con un alto grado de intemperización y otros con un nivel evolutivo de meteorización mucho menor. Por lo tanto, se puede afirmar que la corteza de intemperismo se presenta con diferente grado de madurez en los distintos sectores del yacimiento (121).

**Tabla 4 : Posibles formas minerales de presentarse los principales componentes en la corteza de intemperismo ferroniquelíferas. (Según Rojas Purón, 1994).**

Componente principal.	Mineral.	Fórmula química.	Contenido del componente (%).	Peso específico.(g/cm <sup>3</sup> )
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (1)	goethita	FeOOH	(1)89.9 (8)10.1	4,0 - 4,4
FeO (2)	magnetita	FeFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(1)69 (2)31	4,9 - 5,2
	maghemita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(1)100	
	hematites	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(1)100	5,0 - 5,2
	lepidocrosita	FeOOH	(1)89.9 (8)10.1	4,0 - 4,4
	akaganeíta	FeOOH	(1)89.9 (8)10.1	
	ferrihydrita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2FeOOH.6H <sub>2</sub> O		
	fayalita	Fe <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )	(2)76 (9)24	4,0 - 4,35
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (3)	espinelas cromíferas.	(Mg,Fe)(Cr, Al, Fe) <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(1)2-3 (2)0-18 (3)18-62 (5)0-33 (6)6-16	4,8-5,2
MnO <sub>4</sub> (4)	psilomelano	mMnO.MnO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O	(inconstante)	4,4 - 4,7
MnO <sub>2</sub> (5)	braunita	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(4)44.8 (5)55,2	4,7 - 5,0
	pirolusita	MnO <sub>2</sub>	(4)100	4,7 - 5,0

	hausmanita elizabethskita. todoroskita.	$MnMn_2O_4$	(4)62 (5)38	4,7 - 4,9
$Al_2O_3$ (6)	gibbsita boehmita caolinita halloysita	$Al(OH)_3$ $Al(OOH)$ $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$	(6)65,4 (8)34,6 (6)85 (8)15 (6)39,5 (9)46,5 (8)14	2,43 3,01 - 3,06 2,58 - 2,60
$MgO$ (7)	antigorita crisotilo- asbestos lizardita enstatita forsterita olivino magnesita brucita talco  Ciniclora pennina	$Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$ $Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$ $(Mg,Ni)_6(Si_4O_{10})(OH)_8$ $Mg_2(Si_2O_6)$ $(Si_4O_{10})(OH)_8$ $(Mg_2(Si_2O_6)$ $Mg_2(SiO_4)$ $(Mg,Fe)_2(SiO_4)$ $Mg(CO_3)$ $Mg(OH)_2$ $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)$ $(Mg,Fe)_3 Al(Si_3 AlO_{10})$ $(OH)_8$	(7)43 (8)12,8 (9)44,1 (7)43 (8)12,8 (9)44,1 (7)57,1 (9)42,9 mineral isomórfico (7)47,6 (10)52,4 (7)69(8)31 (7)47,6 (10)52,4 (7)69 (8)31 (7)31,7 ((9)63,5 (8)4,8 composición variable	2,5-2,7   2,5-2,7 3,27-4,37 3,27-4,37 3,0-3,2 2,39 2,7-2,8  2,6-2,85
$SiO_2$	cuarzo nepouita nontronita	$Ni_6(Si_4O_{10})(OH)_8$ $Fe_2((Si,Al)_4O_{10})(OH)_8$ $nH_2O$	(9)100 (composición variable) $n.H_2O(variable)$	2,65  1,72-1,87

Nota: \*, pueden incluirse como formas de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) los silicatos presentes en las formas mineralógicas de (7).

- |   |  |
|---|--|
| (8), para el componente: $\text{H}_2\text{O}$ . | Además deben considerarse las fases de cloritas, |
| (10), para el componente: $\text{CO}_2$ .       | esmectitas (nontronita y montmorillonita) entre  |
| (11), para el componente: $\text{NiO}$ .        | las fases de silicatos.                          |

El grado de madurez de la corteza de intemperismo determina las características físicas (densidad, granulometría), química y mineralógica del mineral laterítico que compone dicho perfil, permitiendo explicar la diferencia en el comportamiento de la pulpa cruda durante el proceso de sedimentación.

Todo esto puede explicar la variación de las características físicas (densidad, color, granulometría) que se observa en diferentes frentes de explotación de los yacimientos de Moa. De acuerdo a la intensidad del proceso de intemperización las distintas zonas que componen el perfil laterítico poseen diferentes potencias, composición granulométrica, química y mineralógica.

Debe especificarse que en el trabajo se utilizaron muestras de frentes de dos períodos de trabajo diferentes. El primero abarcó la etapa 1982-1988, donde fundamentalmente se utilizaron los frentes de explotación, que se identifican según la pala donde labora por la letra D y el número de ella en la zona de minado.; es decir los frentes D-2, D-24, D-30, D-29, D-34 y D-38-1, en los que no se tuvo en cuenta la composición mineralógica, y el otro de 1989-1994; D-23, D52, D-38, D-43; se tuvieron en cuenta todos los factores analizados. Todas las muestras fueron tomadas por personal especializado de la Empresa.

### **3.2. Influencia de la composición mineralógica**

Los estudios sobre la mineralogía datan desde la antigüedad (17). Sin embargo a pesar del desarrollo que se ha alcanzado en esta rama, en nuestros días, no se aprovecha en toda su potencialidad para resolver determinados problemas que afrontan las diferentes tecnologías en el mundo moderno.

Las Empresas productoras metalúrgicas, químicas, etc. están presionadas por las tecnologías de avanzada existente en el mundo, a elevar la calidad de los productos con un incremento de la eficiencia de los procesos tecnológicos, por lo que ellas están en la necesidad de apropiarse de esas determinadas vías que permitan el desarrollo acelerado con el consecuente aprovechamiento más racional de la materia prima. Una de esas vías es la utilización adecuada de la mineralogía.

El estudio de la mineralogía de los minerales lateríticos juega un papel preponderante en el desarrollo científico técnico, y sin embargo, es censurable su poco aprovechamiento en las fábricas de la región y del país; en específico, la E.C.P.S.A., donde es utilizado solamente en la determinación de algunas fases minerales (Millerita) de interés en el producto final. Más que su uso en el producto final, pudiera utilizarse para eliminar muchas dificultades que se presentan en la industria, fundamentalmente en el proceso de minería.

Para el estudio de la mineralogía se tomaron:

1. Muestras de pulpa de transverso en los tanques espesadores de pulpa en períodos de buena y mala sedimentación .
2. Muestras de pulpas crudas alimentadas al proceso de espesamiento en períodos de buena y mala sedimentación.
3. Muestras compósitos de los diferentes frentes de explotación ( D-43, D-38, D-23, D-52).

Estas muestras fueron sometidas a análisis mineralógico directamente ( 1 y 2 ) y la otra (3), se separó en las clases de tamaño;  $[- 0.833 + 0.4; -0.4 + 0.074$  y  $- 0.074]$  mm y sometidas a análisis mineralógico.

El análisis mineralógico se realizó a través de la técnica de difracción de rayos-x (ADR-X), que es el método esencial para ello. Se empleó la metodología propuesta por Grin (1953) con goniómetro alemán del tipo HZG-4 según el régimen siguiente:

- Generador de alto voltaje,tur-62M,V:30-40Kv
- Amperaje 20 mA
- Radiación Co k-alfa.

La mineralogía estudiada en el primer punto, muestra primero los datos de los porcentajes de sólidos obtenidos por niveles dentro del tanque (transverso) y posteriormente los resultados roentgenográficos para las pulpas lateríticas en cada período analizado. Como resultado del estudio mineralógico las intensidades reflejadas por las diferentes fases minerales se representan a través de un difractograma. Para un mejor entendimiento se han llevado a tablas los resultados del difractograma según el orden de aparición de las intensidades de los picos reflejados en fases principales y fases secundarias. Son principales aquellas que presentan intensidades altas y son secundarias, las de reflejos menos intensos que las primeras, pero que su presencia en la muestra es significativa.

Las muestras analizadas en el período de mala sedimentación presenta los siguientes resultados.

**Tabla 5: Resultados del porcentaje de sólidos por transverso en período de MALA SEDIMENTACIÓN.**

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
nivel (m)	0.0	2.35	3.125	3.425	4.925	6.425	7.925	8.525	8.825
% sólido	44.2	42.43	41.62	40.7	32.56	27.32	23.6	21.4	16.62

Estas fueron sometidas a secado a una temperatura no mayor de 60<sup>0</sup> C. De ellas una parte, denominadas muestras totales (MT) fueron sometidas a ADR-X y las otras separadas en clases de tamaño 0.074 mm y 0.044 mm.

Los resultados roentgenográficos aparecen en la tabla 6 de acuerdo al orden de las intensidades de los picos reflejadas por las diferentes fases mineralógicas, más importantes.

**Tabla 6: Resultados del análisis roentgenográficos de las muestras de transverso (por niveles) en un período de MALA SEDIMENTACIÓN.**

Muestras por niveles(m)	Fases mineralógicas	
	Principal	Secundarias
1	Goethita	Magnetita, cloritas, Gibbsita, Hematita, Antigorita.
2	Goethita	Gibbsita, Hematita, Antigorita, Clorita, Magnetita.
3	Goethita	Antigorita, Clorita, Gibbsita, Magnetita, Hematita.
4	Goethita	Gibbsita, Clorita, Cuarzo, Hematita, Magnetita.
5	Goethita	Antigorita, Clorita, Gibbsita, Cuarzo, Magnetita, Hematita.
6	Goethita	Gibbsita, Antigorita, Clorita, Hematita, Cuarzo, Magnetita.
7	Goethita	Gibbsita, Cuarzo, Clorita, Antigorita, Hematita.
8	Goethita	Magnetita, Gibbsita, Hematita, Clorita, Antigorita.
9	Goethita	Gibbsita, Magnetita, Cuarzo, Clorita, Antigorita, Hematita.

Durante uno de los períodos de buena sedimentación se analizaron las muestras dadas por los datos obtenidos del porcentaje de sólidos en cada nivel del tanque espesador. Vea tabla 7

**Tabla 7: Resultados del porcentaje de sólidos por transverso en período de BUENA SEDIMENTACIÓN**

Muestra	1	2	3	4	5	6	7
Nivel(m)	0.0	2.35	3.125	3.42	4.923	6.425	7.925
%S	46.43	46.0	42.97	42.63	40.86	33.61	25.05

Estas muestras fueron sometidas al mismo procesamiento que las muestras anteriores de mala sedimentación, y los resultados del análisis mineralógico se reflejan en la tabla siguiente :

**Tabla 8: Resultados del análisis roentgenográfico de las muestras de transverso (por niveles) en un período de BUENA SEDIMENTACIÓN.**

Muestras por niveles	Fase principal	Fases secundarias
1	Goethita	Magnetita, maghemita, hematita, Gibbsita, Cuarzo, Antigorita
2	Goethita	Magnetita, maghemita, hematita, Gibbsita, Cuarzo
3	Goethita	Magnetita, maghemita, hematita, Gibbsita, Cuarzo
4	Goethita	Magnetita, maghemita, hematita, Gibbsita, Cuarzo
5	Goethita	Magnetita, maghemita, hematita, Gibbsita, Cuarzo
6	Goethita	Magnetita, maghemita, hematita, Gibbsita, Cuarzo
7	Goethita	Magnetita, maghemita, hematita, Gibbsita, Cuarzo

Las muestras analizadas en ambos períodos, presentan una composición mineralógica similar desde el punto de vista de la composición de las fases. Los difractogramas reflejan las intensidades de los diferentes picos de las fases minerales que caracterizan a las muestras. Las fases mineralógicas representadas se encuentran de acuerdo al orden de la intensidad de los picos. Es evidente que la fase principal determinada en cada muestra es la goethita, sin embargo existen diferencias en cuanto a las fases secundarias en cada caso. En las muestras de períodos de mala sedimentación, (ver tabla 6), las fases minerales secundarias que se destacan son la Gibbsita, Clorita, Cuarzo y Antigorita como silicatos de aluminio y magnesio que presentan baja densidad y aportan al mineral laterítico difíciles condiciones de sedimentación provocando la obtención de un producto espesado con porcentaje de sólido bajo (44,2 %) como muestra la tabla 5, denominándose las pulpas con estas características de mala sedimentación.

Al analizar otra muestra de transverso, hasta el límite de la zona de compresión (nivel 4, 95 m), a la que se le aplica un complejo de métodos de análisis que incluyó análisis químico por absorción atómica y fluorescencia de rayos -X, para la detección de fases mineralógicas, y microscopía electrónica por transmisión y barrido a muestras de partículas en suspensión y en sólidos respectivamente para precisar tamaño y forma de partículas así como la distribución de elementos (94) unido con el trabajo de identificación de las fases minerales, a muestras monominerales según su forma (121) se pudo comprobar que en las diferentes capas del espesador se producen variaciones en la composición de las fases, su forma y su sedimentación. Durante el análisis de las microfotografías obtenidas de cada muestra permiten expresar que la

muestra alimentada al espesador presenta diferentes formas de las partículas y por ende diferentes fases minerales [foto1 ]. También se muestran microfotografías de las partículas en suspensión a diferentes niveles de profundidad del espesador [fotos 2, 3, 4, 5 y 6..]

En la foto 5 se puede apreciar con claridad que las partículas forman conglomerados de forma isométrica donde se pueden encontrar granos en forma aciculares y de agujas muy finas, las que se mantienen en suspensión retardando el proceso de sedimentación. También aparecen en la capas cercana a la de compresión, como los granos prismáticos alargados de Goethita y fibrosos de hematita (foto 3) que tienden a formar conglomerados en forma de estrella lo que constituye un freno en el medio fluido para el resto de las partículas que caen en el medio fluido.

(4, 43) También observaron que las partículas al unirse tienden a formar una red a veces densa como una malla, y que en algunos casos se tienden a la nucleación apreciándose al parecer como tamaños de granos más grandes.

Las muestras de buena sedimentación se caracterizan por presentar en las fases minerales secundarias a la Magnetita, Maghemita y Hematita, tabla 8, como minerales de hierro, los cuales le aportan a los minerales lateríticos alta densidad y favorecen el proceso de sedimentación, lo que hace al proceso de sedimentación; bueno, en la tabla 7 se observa que el porcentaje de sólido obtenido en el producto espesado es de 46,43 %.

Al analizar las muestras de pulpas lateríticas alimentadas a la planta de espesadores en períodos de buena y mala sedimentación, utilizando la misma metodología de tratamiento que a las muestras anteriores se obtienen resultados similares. Es decir para las muestras de mala sedimentación el comportamiento de las diferentes fases minerales es como se representa en la Tabla 9

Foto 1. Muestra de pulpa alimentada a la Planta de Espesadores de Pulpa. Se aprecian diferentes formas de las partículas, tabulares idiomórficas y granos isométricos



Foto 2. Muestra de los niveles superiores del espesador (reboso) . Representa granos minerales tubulares idiomórficos unidos por material ferruginoso y/o silicio.

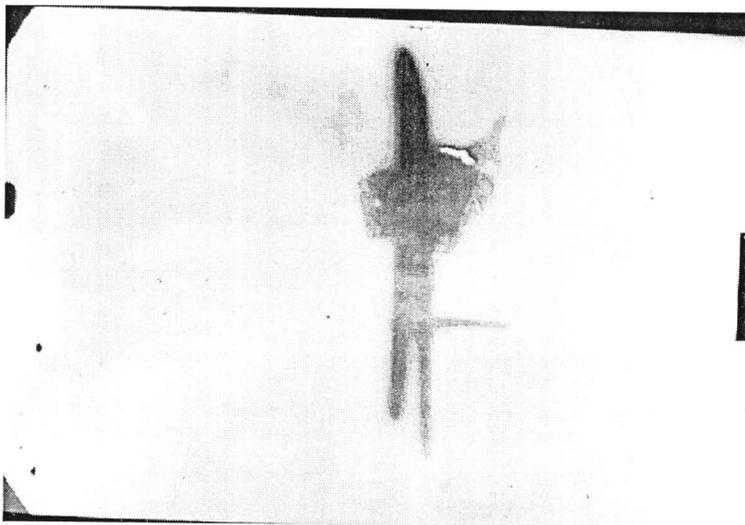


Foto 3 . Muestra que representa el nivel medio del espesador. Se presentan granos prismáticos y en forma de agujas , así como un proceso de aglomeración de los cristales.

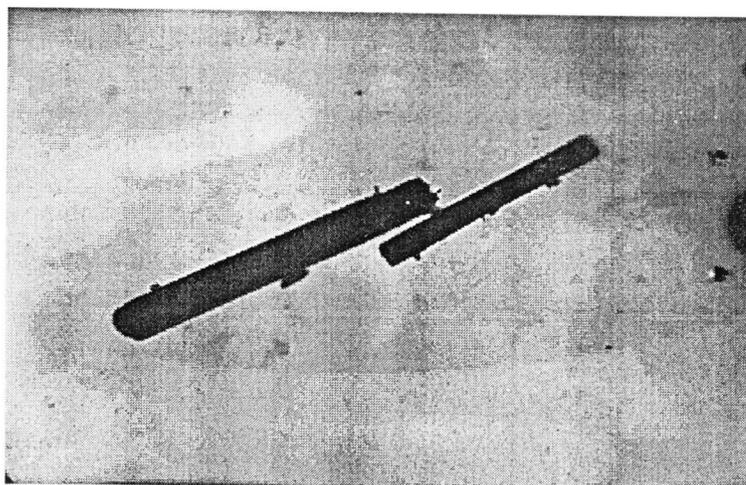


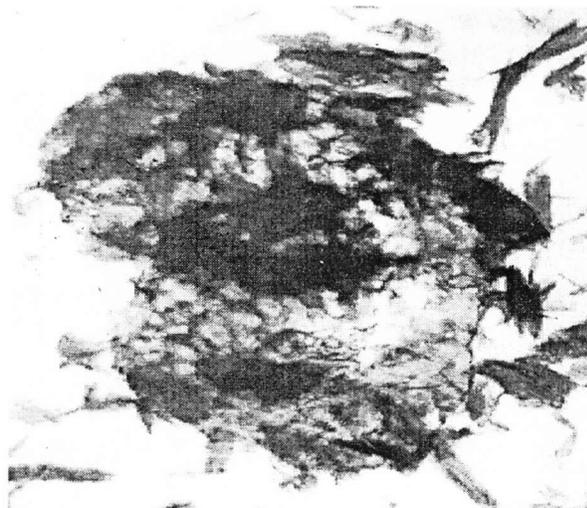
Foto 4. Muestra del nivel inferior del espesador cerca de la zona de compresión. Representa granos en forma de agujas (Goethita), laminares fibrosos de Hematita, isométricos de Magnetita y aciculares con entrecrecimiento estrellado. (17 700X)



Foto 5 Muestras de partículas en suspensión en el nivel 4. 95 m .  
A= 17 700X



Foto 6. Ampliación de un conglomerado en suspensión de la foto 5. A= 35 300X



**Tabla 9: Resultados del análisis roentgenográficos de diferentes muestras alimentadas al tanque de espesadores de pulpa en períodos de MALA SEDIMENTACIÓN.**

Muestras	Fase principal	Fases secundarias
M-3	goethita	Gibbsita, Magnetita, Hematita, Maghemita, cuarzo, Caolinita, Lizardita
M-4	goethita	Gibbsita, Magnetita, Maghemita, Lizardita, Cuarzo, Caolinita.
M-7	goethita	Magnetita, Maghemita, Lizardita, Gibbsita, Cuarzo, Caolinita.
M-10	goethita	Gibbsita, Magnetita, Maghemita, Lizardita, Cuarzo, Caolinita.
M-11	goethita	Magnetita, Maghemita, Lizardita, Gibbsita, Cuarzo, Caolinita

Con respecto a las muestras de pulpas lateríticas tomadas en períodos de buena sedimentación en la industria, observe la tabla 10.

**Tabla 10: Resultados del análisis roentgenográficos de diferentes muestras de pulpas alimentadas al tanque de espesadores de pulpa en períodos de BUENA SEDIMENTACION.**

Muestras	Fase Principal	Fases secundarias
M-5	Goethita	Magnetita, Gibbsita, Hematita, Maghemita, Cuarzo, Caolinita, Lizardita
M-6	Goethita	Magnetita, Gibbsita, Hematita, Maghemita, Cuarzo, Caolinita
M-8	Goethita	Magnetita, Gibbsita, Hematita, Cuarzo, Caolinita,
M-9	Goethita	Magnetita, Gibbsita, Hematita, Maghemita, Cuarzo, Caolinita, Lizardita
M-14	Goethita	Magnetita, Gibbsita, Hematita, Maghemita, Cuarzo, Caolinita, Lizardita

Las pulpas alimentadas a los espesadores de pulpa presentan características mineralógicas similares a las encontradas en los tanques espesadores de pulpa en cada período de trabajo analizado anteriormente.

En las pulpas tomadas en períodos de mala sedimentación las fases minerales secundarias que se representan son similares que las analizadas en el transversal del período de mala sedimentación. En este caso la gibbsita (mineral de Aluminio) tiene un papel importante entre los minerales de baja densidad, luego se reflejan algunas fases de minerales de hierro y minerales silicatados, como el Cuarzo, Caolinita, y Lizardita.

En las tablas 6, 8, 9 y 10, se muestran los resultados de las experiencias realizadas con pulpas preparadas industrialmente en períodos de buena y mala sedimentación, los que resultan de gran interés para el conocimiento de las causas que provocan las dificultades durante el proceso de sedimentación. Pero resulta aún, más interesante, si se realiza éste estudio con los minerales de origen, con los que se prepara la pulpa que llega al proceso industrial, razón por la cual se procede a este estudio.

### **Caracterización mineralógica de los frentes de explotación**

Los frentes de explotación de la mina (D-43, D-38, D-23, D-52) a diferencia de las muestras anteriores no se analizan como muestras totales, sino, que se separan granulométricamente y posteriormente se analizan mineralógicamente, permitiendo identificar en que fracciones se concentran las diferentes fases mineralógicas y de que forma pudieran controlarse su participación en el proceso tecnológico.

Al estudiar el efecto de la granulometría en el proceso de sedimentación (32) se muestra que las fracciones  $- 0.074$  mm tienen un efecto significativo en el proceso de sedimentación, aunque su naturaleza mineralógica y química no se tuvo en cuenta. Para ello, las muestras se separaron en fracciones o clases de tamaño relativamente gruesas y finas:  $+ 0.074$  mm y  $- 0.074$  mm, respectivamente y sometidas a ADR-X obteniéndose la siguiente composición mineralógica para cada frente (ver tabla 11):

**Tabla 11: Resultados roentgenográficos de los frentes de explotación**

Frentes	Fase principal	Fase secundaria	$\delta(\text{g/cm}^3)$
D-38 Fg	Goethita,	Hematita, Magnetita, Gibbsita	3.65
Ff	Goethita,	Hematita, Magnetita, Gibbsita	
D-43 Fg	Goethita,	Hematita, Magnetita, Gibbsita, Clorita, Olivino	3.51
Ff	Goethita,	Hematita, Magnetita, Gibbsita	
D-23 Fg	Goethita, Cuarzo	Hematita, Magnetita, Gibbsita Clorita, Enstatita, Cromoespinelas	3.35
Ff	Goethita	Hematita, Magnetita, Gibbsita	
D-52 Fg	Goethita, Clorita	Olivino, Cuarzo Goethita, Hematita, Magnetita, Gibbsita, Enstatita.	3.28
Ff	Goethita	Hematita, Magnetita, Gibbsita,	

Estas características mineralógicas aportan determinadas propiedades a la pulpa que la diferencian.

Todo indica que la composición mineralógica de los materiales lateríticos tienen una incidencia significativa en el comportamiento de la sedimentación de las pulpas. Las características expuestas en cada una de las experiencias permiten establecer un criterio acerca de la tendencia de determinadas fases, de favorecer o no el proceso de sedimentación. Existe una determinada regularidad en las fases minerales presentes, en los períodos de MALA y de BUENA SEDIMENTACIÓN que permite su caracterización.

Los frentes ( D-23 y D-52 ) presentan en la fracción gruesa como fases principales: Goethita (mineral de hierro) y Cuarzo, Clorita, representados por sílice y aluminosilicatos, respectivamente, los cuales son de baja densidad y como fases secundarias Olivino (silicatos de Magnesio y Aluminio) de baja densidad y Hematita y magnetita (minerales de hierro ) de alta densidad y Gibbsita, Clorita , Enstatita (silicatos de Aluminio y magnesio) de baja densidad , sin embargo en la fracción fina en ambos frentes está compuesta por las fases principales de Goethita, Hematita y Magnetita como minerales de hierro y la Gibbsita como mineral de Aluminio. En ambos frentes los minerales tienen una densidad relativamente

inferior a los frentes ( D-43 y D-38) que también permite diferenciarlos al igual que las fases minerales presentes en cada uno de ellos.

Algo similar ocurre al analizar la reología de las pulpas lateríticas en períodos de buena y mala sedimentación (61). En este caso las fracciones granulométricas fueron separadas en + 0.044 y - 0.044 mm y las mismas sometidas a análisis mineralógico. Vea Tabla 12

**Tabla 12: Resultados de análisis roentgenográficos de las muestras estudiadas por Garcell y Cerpa**

Período de sedimentación	Muestra ( YAC)	Fases minerales por clases de tamaño(mm)	
		+0.044	0.044
BUENA	1(Yamanigüey) C-I	Goethita.Lizardita,Cuarzo.Calcita.Maghemita,Elizabetiska	Goethita.Forsterita,Hematita.Magnetita. Calcita.
BUENA	2(Yamanigüey) C-I	Goethita.Magnetita.Maghemita.Magnesiocromita	
BUENA	3(Yamanigüey) C-I- Depósito. Atlantic.	Goethita, Magnetita.Maghemita,Hematita, Magnesiocromita	Goethita,Hematita.Magnetita.Maghemita.Cuarzo.
MALA	4(Yamanigüey) C-I- Depósito. Atlantic,	Maghemita,Magnetita,Gibbsita	Goethita,Hematita,maghemita,Fayalita.Lizardita,AntigoritaThuringuinita, Calcita,Magnesita.
MALA	5(Atlantic, Bloque A-21 y 22	Minerales de serpentina,Gibbsita,Magnetita,Goethita,Cuarzo.	Goethita,Gibbsita, mineral de serpentina,mineral arcilloso,espinelas cromíferas.
MALA	6(Atlantic, Bloque A-21 y 22	Goethita.Gibbsita,minerales cromíferos,espinelas cromíferas, Cuarzo	Goethita,Gibbsita,mineral arcilloso,Espinelas cromíferas, mineral de serpentina
MALA	7(Zona sur(Bloque m-21 )	Gibbsita,espinelas cromíferas,magnetita,goethita, Cuarzo.	Goethita,Gibbsita, Cuarzo.

Para ambos período de trabajo, se determinó la viscosidad de las pulpas y sus diferencias. Es decir para una misma concentración (alta o baja) de sólidos, las muestras de mala sedimentación presentan un esfuerzo cortante superior que en las de buena sedimentación.

Los fenómenos reológicos al igual que el proceso de sedimentación de los minerales lateríticos dependen de las características mineralógicas del mineral que se procese.

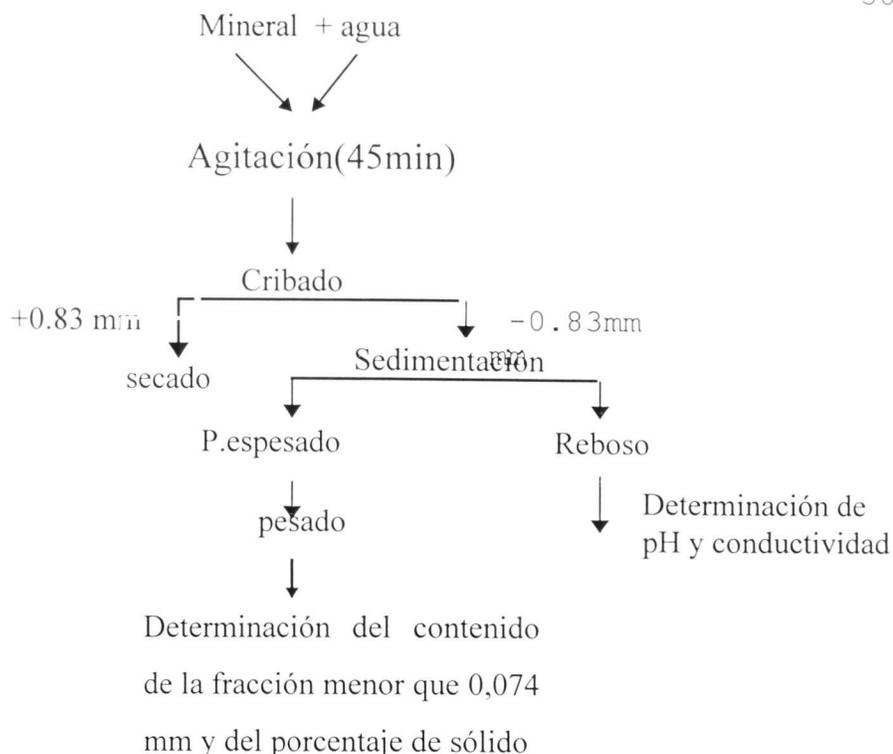
Se puede observar en las diferentes tablas 6, 8, 9, 10, 11 y 12 similitud entre las muestras analizadas en los períodos de mala y buena sedimentación. Se refleja que las muestras al ser separadas por clases de tamaño y analizadas mineralógicamente permiten caracterizar más el material tratado, donde las fases minerales de hierro se concentran en las clases de tamaño finas y las de silicatos de magnesio y de aluminio, en las gruesas en sentido general (120).

Es importante conocer que de acuerdo a la procedencia de la muestra analizada, así será la distribución de las fases minerales por clases de tamaño. En las tablas (11 y 12) se observan que tanto en las clases finas como en las gruesas, se encuentran, fases minerales de hierro como de silicatos de magnesio o de aluminio. Para dar una mayor caracterización al material tratado no bastan sólo la mineralogía sino también el efecto que produce la preparación de la pulpa, la composición granulométrica y química en la sedimentación.

### **3.3.- Influencia de la preparación de la pulpa en el proceso de sedimentación.**

En las investigaciones precedentes realizadas sobre la preparación y sedimentación de las pulpas de minerales lateríticos no fueron utilizadas condiciones de trabajo iguales, lo que hace que se diferencien en los resultados obtenidos de ellas y por consiguiente no existe uniformidad en los mismos.

El estudio del comportamiento de la sedimentación se realizó a través de un esquema de trabajo que simula las operaciones de preparación y sedimentación de las pulpas lateríticas antes del proceso de lixiviación, a escala de laboratorio y de banco en el que se controlan parámetros similares a los de la industria, vea figura 8.



.Fig.7 Esquema de trabajo para la preparación de las muestras

El mineral procedente de los distintos frentes de explotación se mezcla con agua según la relación líquido-sólido 3:1, el cual se agita variando el tiempo en 15, 30 y 45 minutos, en un agitador mecánico de laboratorio, luego se criba por un tamiz de 0.833 mm, obteniéndose dos productos; el rechazo con tamaño superior a 0.833 (+0.833 mm) y el producto cernido en forma de pulpa con aproximadamente 25 % de sólido y un tamaño menor de 0.833 mm, ésta es sometida al proceso de sedimentación en probetas de 1000 cm<sup>3</sup> donde se lee la altura descendida cada 10 minutos durante dos horas y cada 100 minutos hasta 12 horas. A los resultados obtenidos, promediados, se les aplica la teoría de Talmage y Fitch, para determinar algunos parámetros de espesamiento controlándose una serie de parámetros, como; el contenido de la fracción +0.833 mm, el pH y la conductividad del agua antes y después de la sedimentación.

Los resultados obtenidos de la sedimentación para cada frente se representan en la figura 8 y tabla siguiente

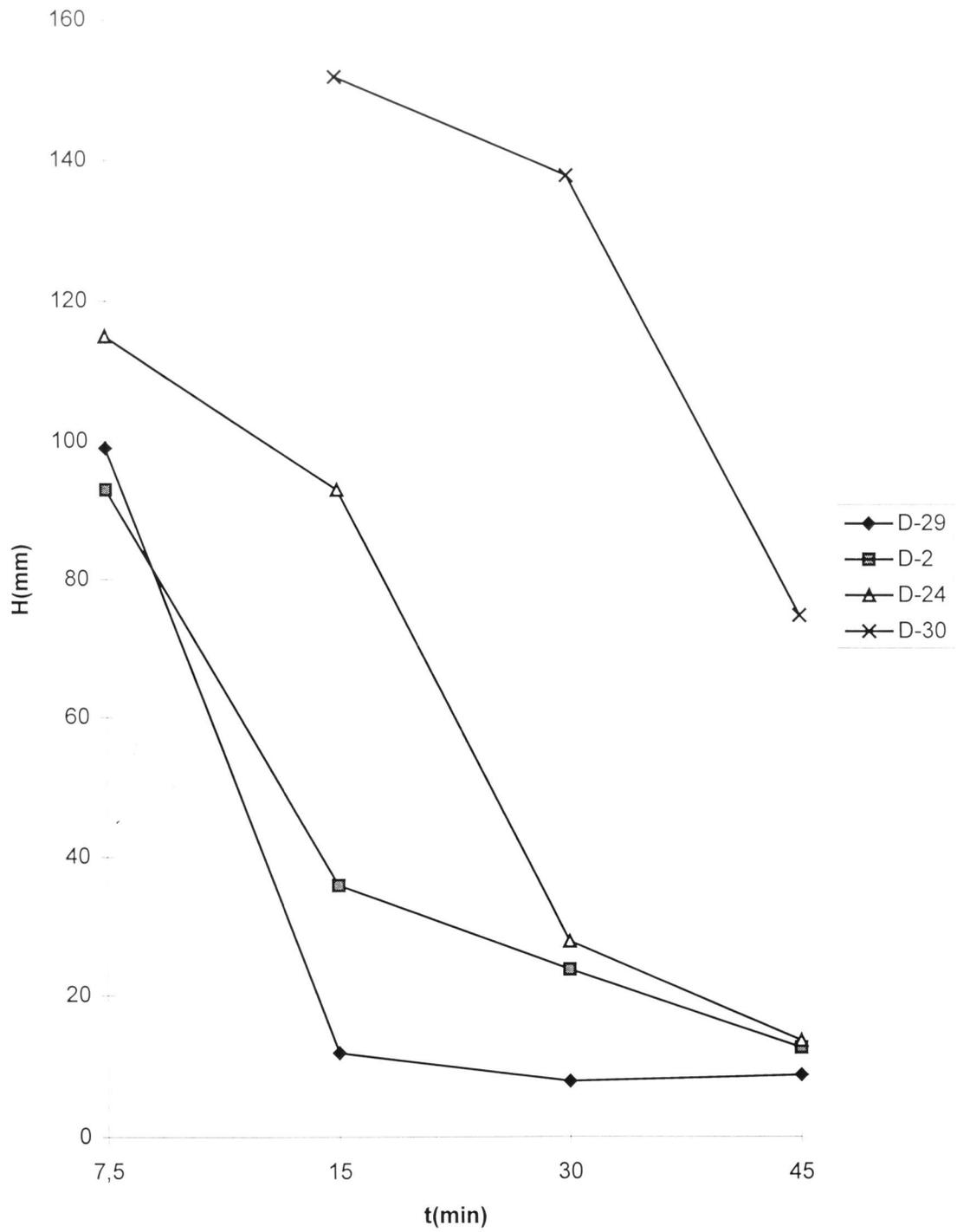


Fig. 8. Comportamiento de la sedimentación con diferentes tiempos de agitación.

**Tabla 13:Comportamiento de distintos parámetros controlados durante el proceso de sedimentación en los diferentes frentes de explotación.**

Parámetros	D-30			D-24			D-2			D-29		
	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
Tagit.	15	30	45	15	30	45	15	30	45	15	30	45
%+0.83	28.5	17	14.5	5.0	0.1	0.01	15.1	11.1	10.6	1.5	1.2	1.3
%Si	21.1	25	34.9	23.1	24.2	22.3	24.5	24.7	23.7	24	25.1	23.5
%Sf	31.4	29.1	40.7	26.5	27.6	25.4	27.8	26.1	25.3	24.8	25.8	24.3
pHi	8.0	8.62	8.36	8.0	8.32	8.26	8.40	8.40	8.14	8.2	8.2	8.6
pHf	7.2	7.3	7.42	7.4	7.24	6.86	6.25	6.5	6.8	7.49	6.57	6.87
$\lambda_i$	0.37	0.19	0.21	0.43	0.24	0.29	0.26	0.28	0.24	0.24	0.35	0.35
$\lambda_f$	0.27	0.23	0.33	0.19	0.18	0.26	0.24	0.23	0.18	0.22	0.20	0.26
$\beta^{-74}$	78.6	74.3	71	67	68.5	74	73.8	75.2	78.5	75.2	78.8	80

Observación:

Tagit.-Tiempo de agitación

%+0.83mm-porciento en peso de la clase de tamaño mayor que 0.833 mm.

%Si- Porcentaje de sólido inicial.

%Sf- Porcentaje.de sólido final.

$\lambda_i$  - Conductividad eléctrica inicial(antes de la sedimentación).: milisiemens

$\lambda_f$  - Conductividad eléctrica final(después de la sedimentación); milisiemens

$\beta^{-74}$  -Contenido de la fracción(%)

Se puede observar que al aumentar el tiempo de agitación de la pulpa, aumenta el rompimiento de conglomerados de las partículas minerales muy pequeñas reflejado por una disminución del contenido de la fracción + 0.833 mm, tendiendo al aumento del contenido de la fracción - 0.074 mm, (aunque estas fracciones no presentan el mismo grado de rompimiento en los diferentes frentes ensayados, a diferentes tiempos de agitación) que constituyen partículas coloidales, arcillosas y dispersas, como consecuencia de una disminución de la velocidad de sedimentación de las pulpas preparadas con los minerales

El material laterítico es predominantemente de grano fino donde las partículas menores de 0.044mm representa un 50-60% en peso de la muestra desde los horizontes de ocre medios hasta las concreciones ferruginosas (C); el material ocreo inferior (OI) es de fina granulometría también, siendo en éste significativa la clase granulométrica  $-0.074 \text{ mm} + 0.044 \text{ mm}$  que junto con la más fina representa prácticamente el 60% en peso de la muestra (121).

Sin embargo de acuerdo a los trabajos realizados por (65, 116, 132), sobre las pulpas crudas de mineral laterítico se observa que las mismas están compuestas por aproximadamente el 85 % de la clase menor de 0.074 mm y dentro de esta un alto porcentaje lo tiene la fracción  $-0.010 \text{ mm}$ . Estos resultados están relacionados con el origen de las pulpas lateríticas en un momento dado, ya que la variabilidad de la granulometría de los minerales que componen las pulpas de este tipo depende de las características de yacencia del mineral.

Se conoce que la granulometría influye en el proceso de sedimentación pero no se ha determinado, que clase de tamaño dentro de la amplia gama de partículas que compone el mineral laterítico es la que favorece o retarda el proceso de sedimentación. Para analizar la incidencia de la granulometría se desarrolla la investigación atendiendo a aspectos esenciales como:

- Comportamiento de la sedimentación por fracciones
- Comportamiento de la sedimentación al incrementar el porcentaje de sólido de una determinada clase de tamaño en las pulpas lateríticas.
- Comportamiento de la sedimentación de las pulpas industriales y de frentes de explotación.

#### **Estudio de la sedimentación de fracciones granulométricas.**

Consiste en tomar de la pulpa original las diferentes fracciones o clases de tamaño que la conforman y ponerlas a sedimentar por separado. También analizar la influencia que ejerce

el tiempo de agitación (15 y 45 min) en la sedimentación de pulpas lateríticas preparadas con las fracciones  $-0.833 + 0.044$  mm y las  $-0.044$  mm, durante la sedimentación.

Para el trabajo se analizaron los minerales procedentes de diferentes zonas de trabajo de la mina de la E.C.P.S.A., las cuales presentan una composición granulométrica variada. Vea tabla 15.

**Tabla 15: Composición granulométrica de los distintos frentes de explotación.**

Frentes	Contenido (en %) de las clases de tamaño(mm)					
	+83	-83+0.074	-0.074+0.044	-0.044+0.030	-0.030+0.020	-0.020+0
D-2	10	10.8	4.8	0.3	0.5	73.6
D-24	2	5.9	3.5	0.35	0.52	83.73
D-29	1.8	6.4	4.1	0.29	0.29	86.8
D-30	20.5	11.1	4.5	0.41	0.41	63.04

Las fracciones o clases de tamaño separadas ( $- 0.833 + 0.044$ ;  $-0.833 + 0,030$  y  $-0.833 + 0,020$ ) mm , se denominan relativamente gruesas, y las menores que  $0,044$ ;  $0,030$  y  $0,020$  mm relativamente finas.

Las pulpas preparadas con las fracciones relativamente gruesas se dejan sedimentar por un tiempo de dos horas y se toma lectura de la altura descendida por la pulpa cada 10 minutos durante dos horas, las pulpas con fracciones relativamente finas se toma la lectura de la altura descendida cada 12 horas por un tiempo de 96 horas. Vea Figuras 9 y 10.

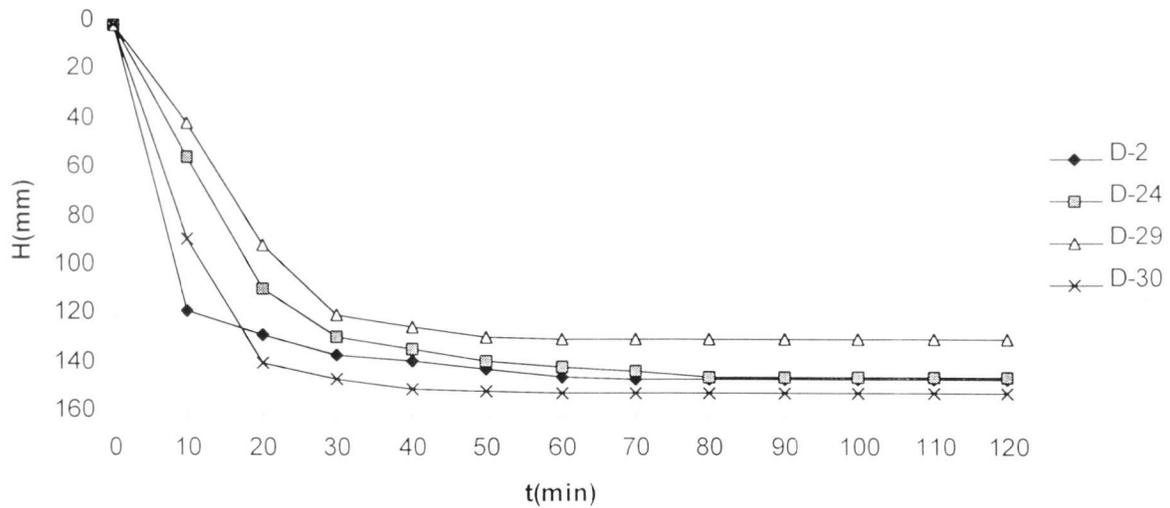


Fig. 11. Comportamiento de la sedimentación de las partículas  $-0.833+0.044$  mm de los diferentes frentes de explotación. Para 15 minutos de agitación.  $S_i = 25 \pm 1\%$ .

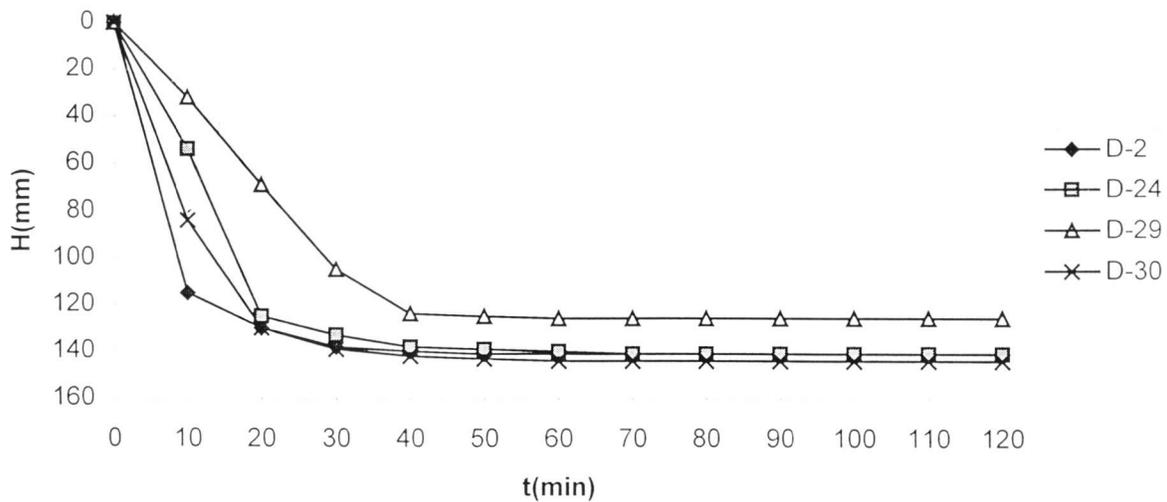


Fig. 12. Comportamiento de la sedimentación de las partículas  $-0.833+0.044$  mm de los diferentes frentes de explotación. Para 45 minutos de agitación.  $S_i = 25 \pm 1\%$ .

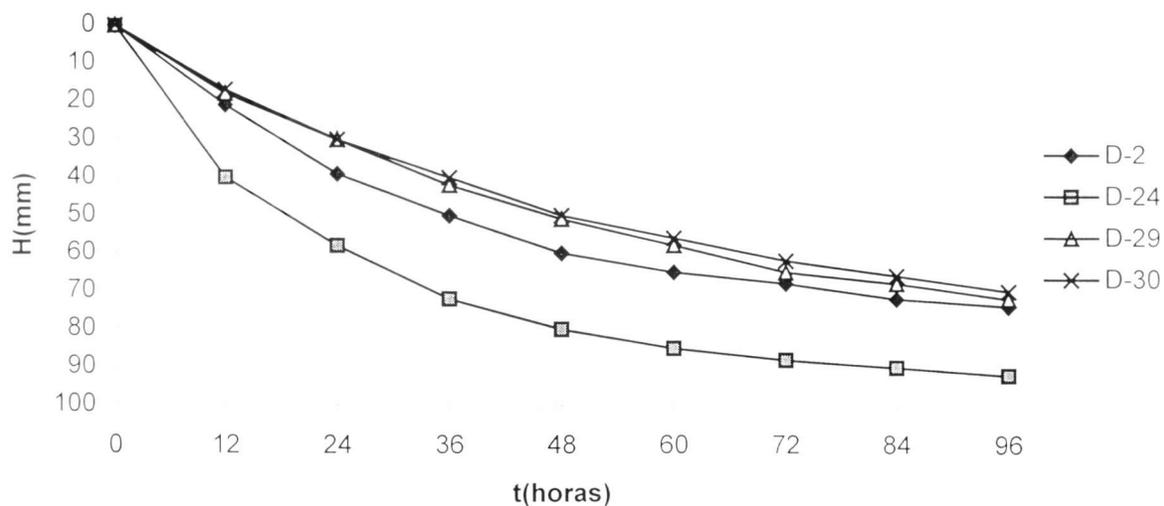


Fig. 13. Comportamiento de la sedimentación de las partículas  $-0.044$  mm de los diferentes frentes de explotación. Para 15 minutos de agitación.  $S_i = 25 \pm 1\%$ .

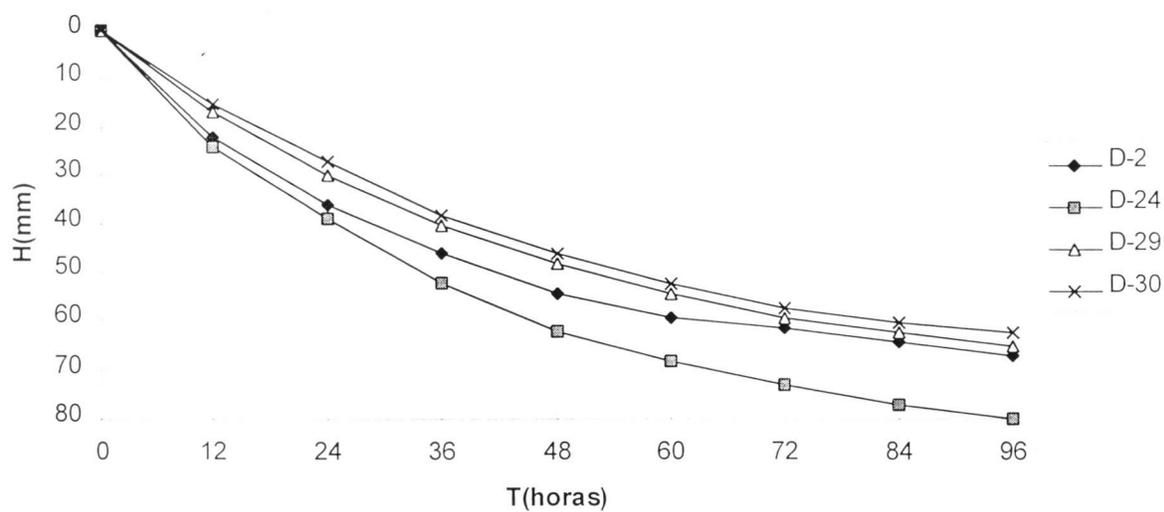


Fig. 14. Comportamiento de la sedimentación de las partículas  $-0.044$  mm de los diferentes frentes de explotación. Para 45 minutos de agitación.  $S_i = 25 \pm 1\%$ .

A los resultados obtenidos en la cinética de sedimentación se les aplicó el método de Talmage y Fitch para determinar algunos parámetros de espesamiento como el flujo de sólido por unidad de área en la unidad de tiempo ( $Q_u$ ), la velocidad de sedimentación ( $V_{sed}$ ) y la concentración de sólidos ( $C_u$ ) en el tiempo unitario, y el % de sólido final, los cuales se determinan en cada uno de los ensayos cinéticos efectuados. Ver tabla 16. Se refleja que el % sólido final,  $C_u$ ,  $Q_u$  y la  $V_{sed}$  disminuyen con el tamaño de las partículas

Se aprecian diferencias significativas entre las pulpas lateríticas preparadas con fracciones relativamente gruesas y con fracciones relativamente finas. Vea figuras correspondiente en cada caso. Además también se aprecian diferencias significativas entre la preparación de las pulpas lateríticas con 15 y 45 minutos de agitación para las pulpas con las fracciones granulométricas + 0.044 y - 0.044 mm. Observe las figuras 11, 12, 13 y 14 y tabla 16

**Tabla 16: Parámetros del espesamiento al aplicar la metodología de Talmage y Fitch a las pulpas preparadas con fracciones granulométricas del frente D-2**

Fracciones(mm)	$Q_u$	$C_u$	%S	$V_s$
+0.044.	5.13	0.576	40.74	12.03
+0.030	2.48	0.546	40.5	5.46
+0.020	2.99	0.536	38.56	6.91
-0.044	2.25	0.411	31.86	0.042
-0.030	2.23	0.403	31.48	0.039
-0.020	2.10	0.384	30.23	0.036

Al analizar las muestras de fracciones relativamente gruesas y relativamente finas se puede observar que existen diferencias significativas entre cada uno de los parámetros, siendo de interés el porcentaje de sólido medio obtenido en el punto crítico para cada caso.

**Tabla 17: Valores medios de los parámetros de espesamiento de las pulpas preparadas con las fracciones relativamente gruesas y con las fracciones relativamente finas.**

Fracciones	Qu	Cu	%S	Vs
Gruesas	3.53	0.55	39.9	8.13
Finas	2.18	0.399	30.95	0.039

### **Influencia del incremento del % de sólidos de determinadas fracciones granulométricas en las pulpas lateríticas**

En el presente estudio se realiza una caracterización granulométrica de cada uno de los frentes de explotación con los que se trabajó en la mina. Para ello se utilizó el análisis de tamices y elutriación.

Las pulpas lateríticas se preparan con cada uno de los minerales de los frentes de explotación, según el esquema de trabajo referido. De cada pulpa se separan las diferentes clases de tamaño o fracciones granulométricas de forma similar al caso explicado anteriormente, que posteriormente se añaden con un porcentaje de sólido determinado en cada ensayo de forma progresiva. Las clases de tamaño separadas son:  $-0.833 + 0.074$ ;  $-0.074 + 0.044$ ;  $-0.044 + 0.040$ ;  $-0.040 + 0.030$ ;  $-0.030 + 0.020$ ; mm y cada una de ella se añade con los porcentajes de sólidos siguientes: 26, 32, 38, 44 y 51 %.

La experiencia se desarrolló en probetas de  $1000 \text{ cm}^3$  de volumen y se tomó la lectura de la altura descendida por la pulpa cada 10 min durante dos horas y luego cada 100 minutos hasta 12 horas. Esto se realizó en cada caso y se comparó con la prueba realizada en blanco, es decir sin añadir fracciones granulométricas. A cada una de las pruebas les fue aplicado la metodología empleada por Talmage y Fitch para determinar algunos parámetros de espesamiento igual que en los ensayos anteriores.

Los resultados obtenidos para cada uno de los frentes, incluso, para las mezclas de los frentes es similar. Por esta razón en el trabajo aparecerán los resultados de uno de ellos. Vea las figuras siguientes 16-20 y anexos.

Las figuras muestran que existen diferencias apreciables en cada uno de los casos con respecto al ensayo en blanco. Al añadir las clases de tamaño relativamente gruesas  $-0.833 + 0.074$  mm la velocidad de sedimentación y el porcentaje de sólido alcanzado en el punto crítico es superior a cuando se añaden partículas relativamente finas. Se observa algo peculiar con la fracción  $-0.074 + 0.044$  mm y es que al comenzar a añadirse las primeras cantidades, el porcentaje de sólido alcanzado aumenta hasta un determinado valor, en el que, el contenido de esta fracción en la pulpa alcanza alrededor de 78%, que provoca que la velocidad de sedimentación y el porcentaje de sólido en el punto crítico disminuyan.

La adición de diferentes fracciones granulométricas con porcentajes en peso en orden creciente a las pulpas lateríticas produce un determinado efecto en el comportamiento de la sedimentación; su curva cinética, en forma de ese invertida depende de la naturaleza química, física y granulométrica del mineral con que se prepara la pulpa y de las fracciones añadidas. Por consiguiente se encuentra variación en la curva de sedimentación y en el porcentaje de sólido obtenido, tanto para cuando se añade el mismo porcentaje para las diferentes clases de tamaño, como para cuando al analizar una misma fracción o clase de tamaño se añaden diferentes porcentajes de sólido, obsérvese la tabla 18 y las figuras 16-20 y anexos.

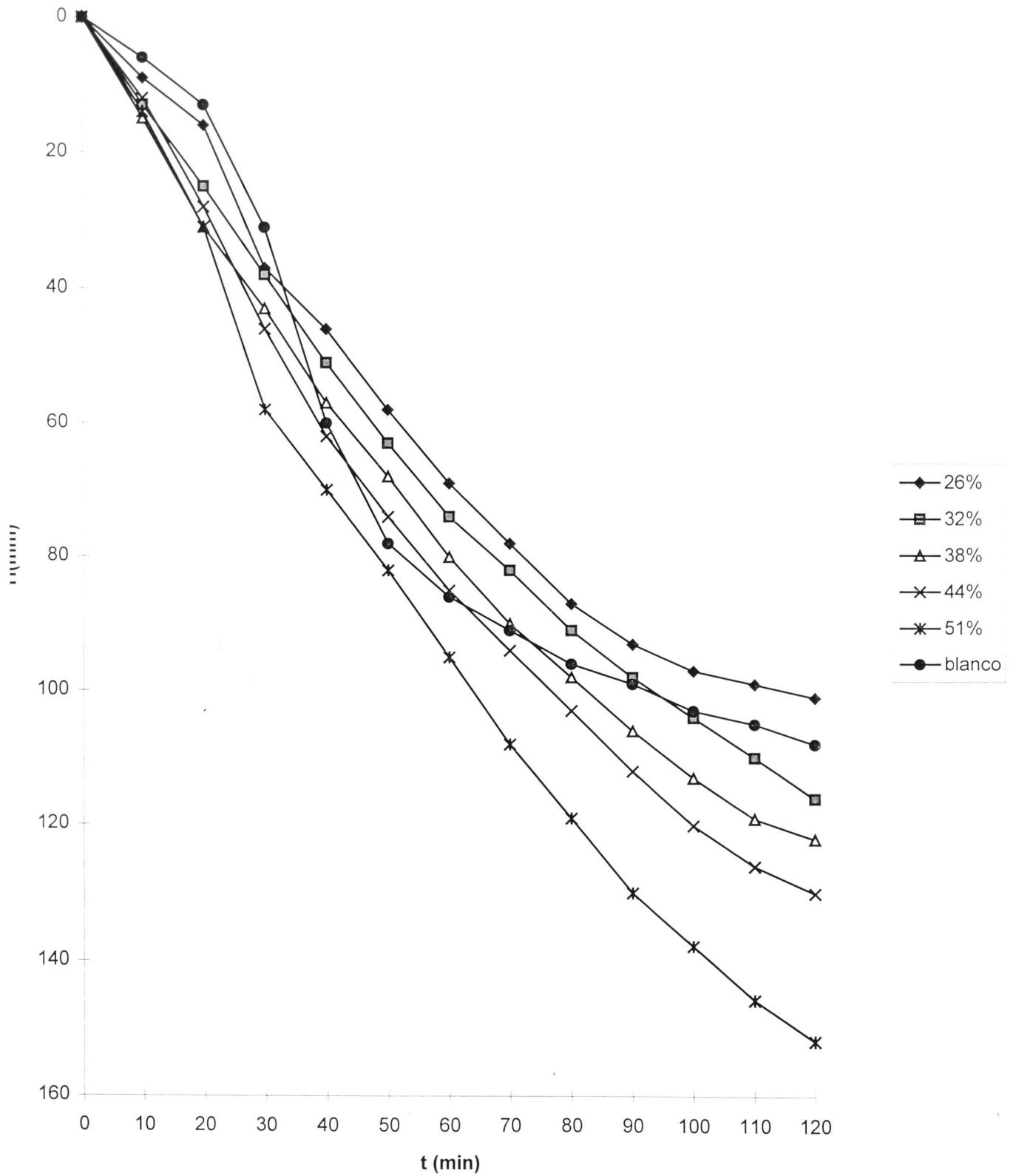


Fig.16.Comportamiento de la sedimentación de las pulpas al añadir la fracción  $-0.833+0.074$  mm

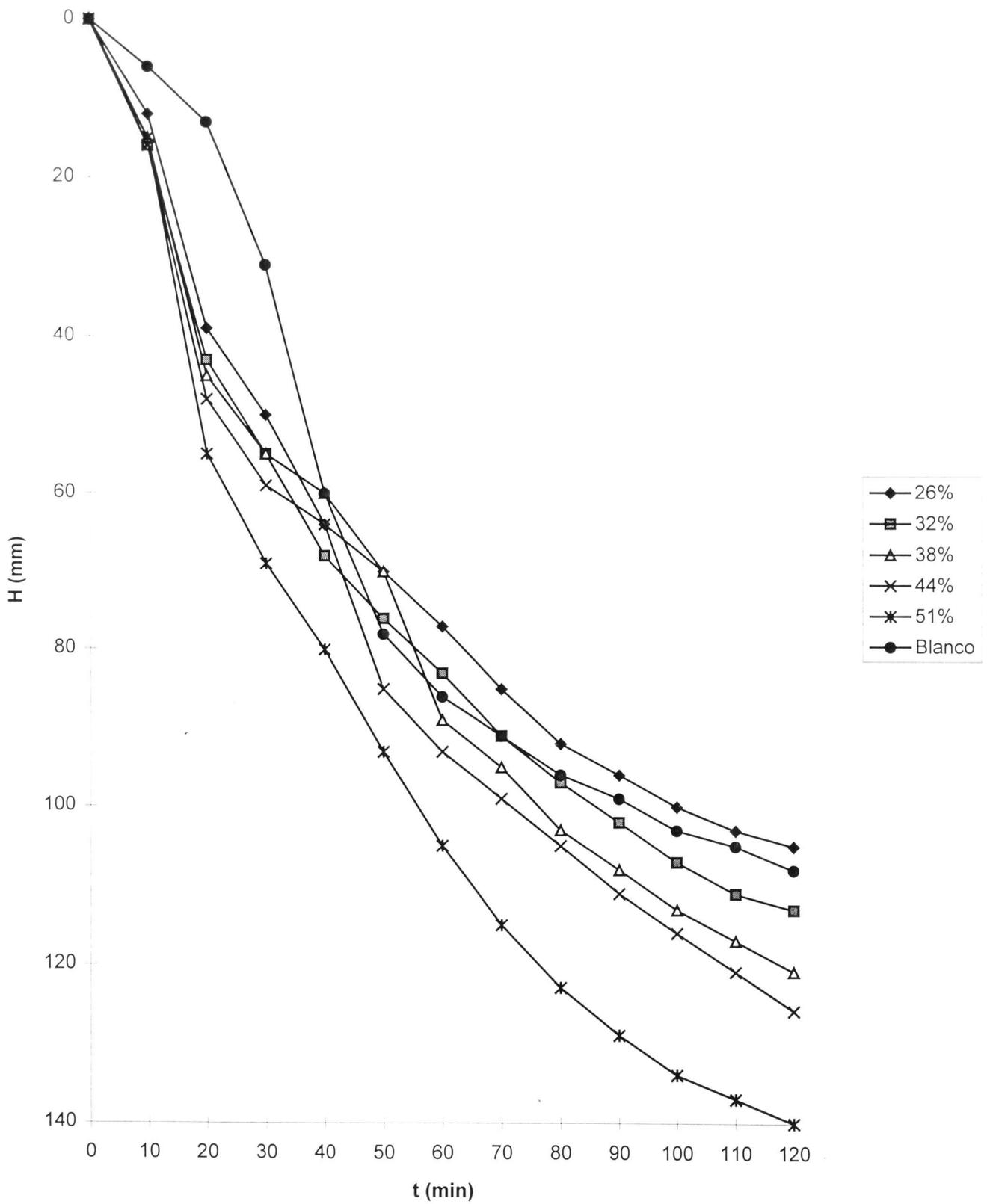


Fig.17. Comportamiento de la sedimentación de las pulpas al añadir la fracción  $-0.074+0.044$  mm

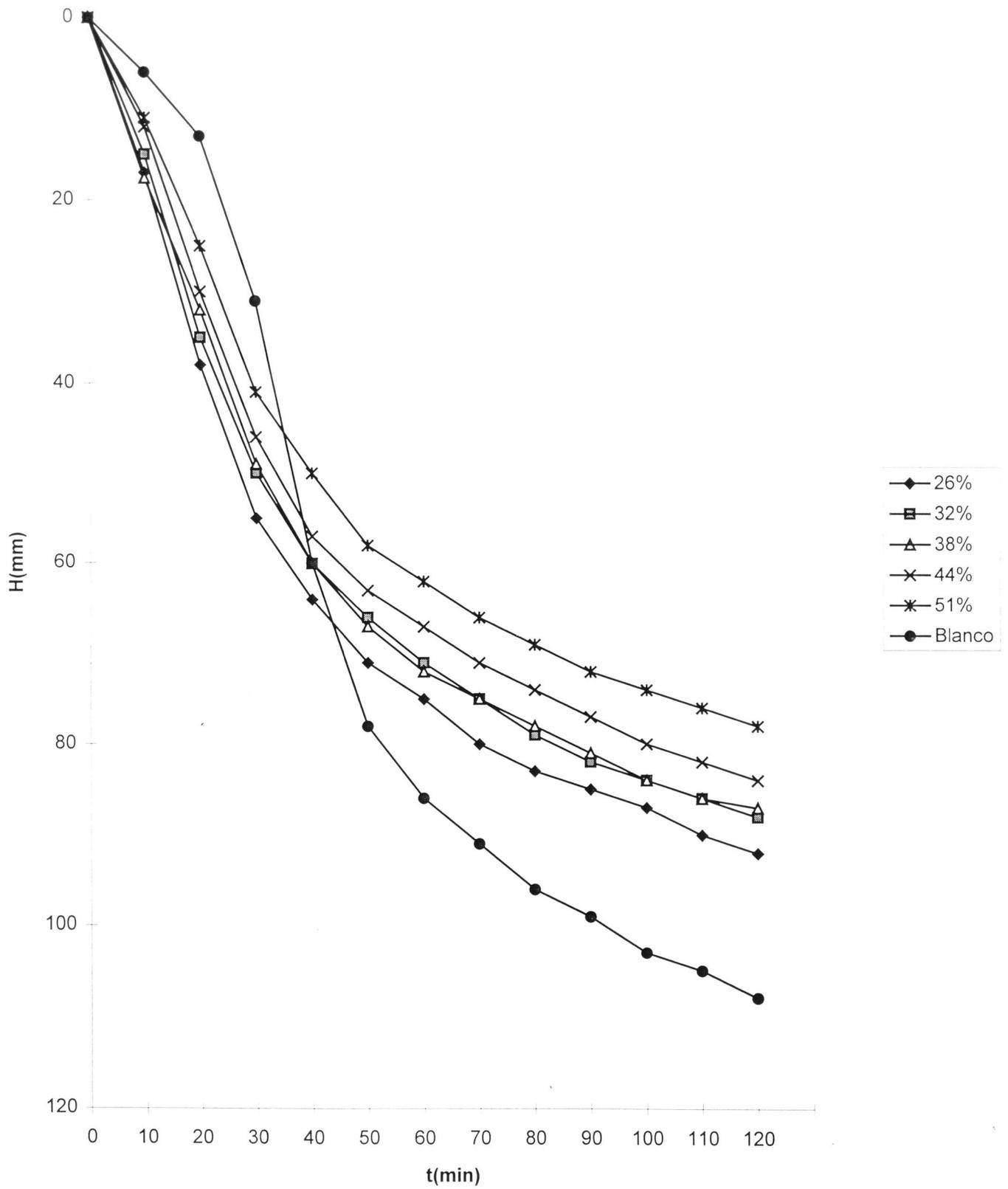


Fig.18 Comportamiento de la sedimentación al añadir la fracción  $-0.044+0.040$  mm.

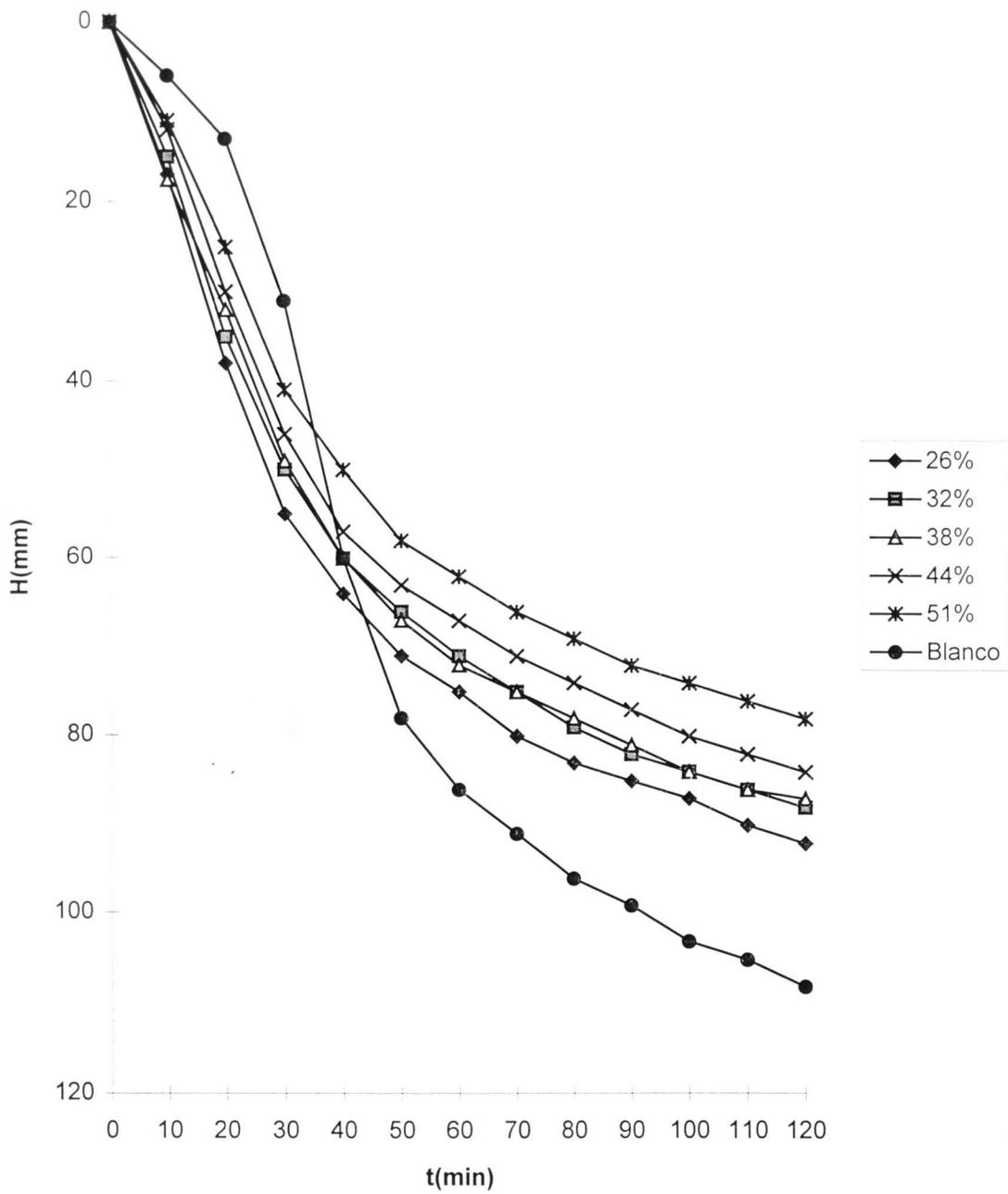


Fig19. Comportamiento de la sedimentación al añadir la fracción  $-0.040+0.030$  mm

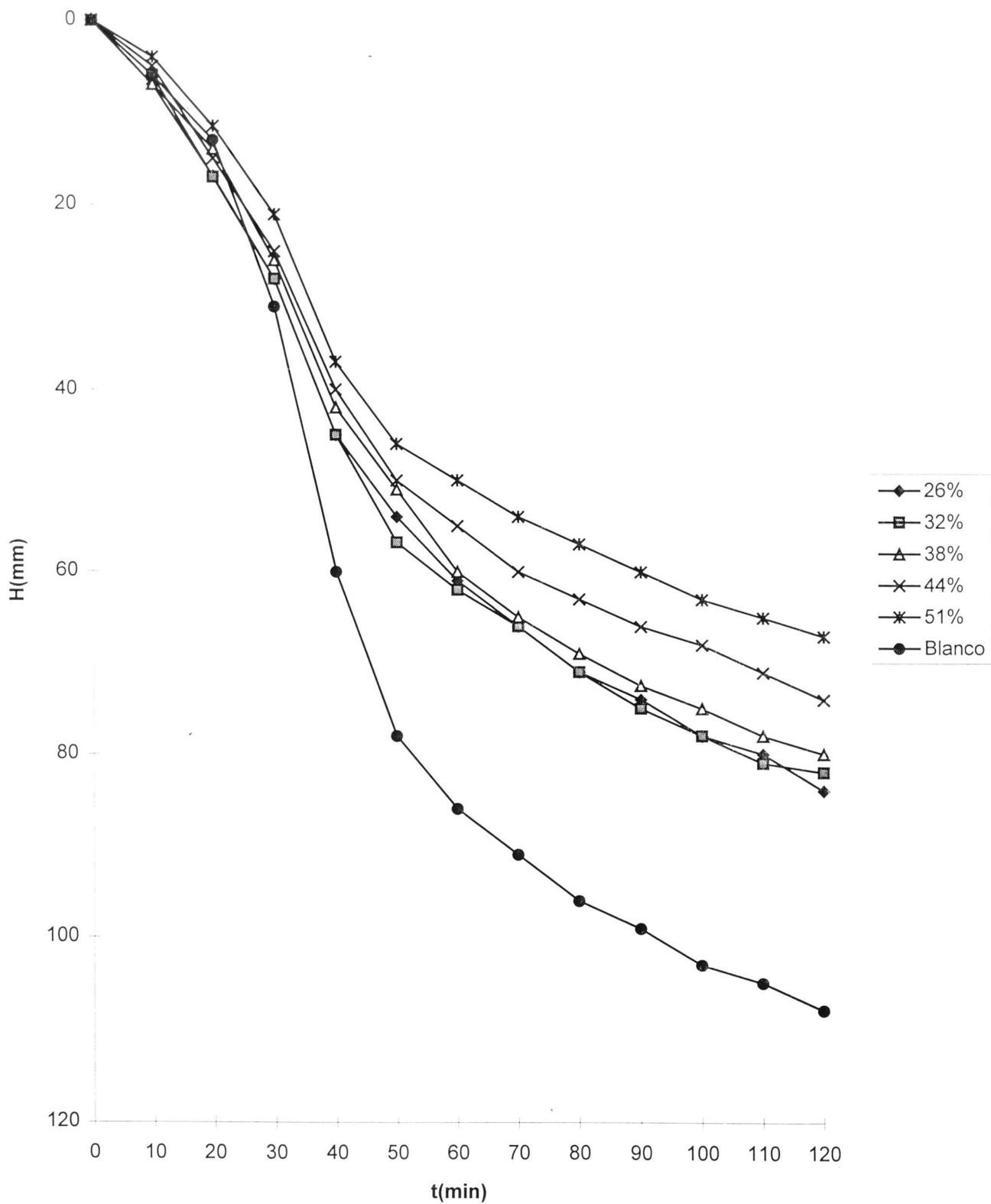


Fig.20 Comportamiento de la sedimentación de las pulpas al añadir la fracción  $-0.030+0.020$  mm

**Tabla 18 Resultados obtenidos del porcentaje de sólido en el punto crítico al añadir diferentes % en peso del mineral, al aplicarle la metodología de Talmage y Fitch a las pulpas con las fracciones añadidas.**

%sólido añadido	Clases de tamaño(mm)				
	-0.83+0.074	-0.074+0.044	-0.044+0.040	-0.040+0.030	-0.030+0.020
16	33.38	33.33	32.48	31.53	31.62
32	34.12	35	31.53	31.53	31.03
38	34.79	35	31.53	31.86	31
44	37.13	35	31.53	31.80	30
51	41.42	33	30.46	30.54	29
Blanco	34.29				

La adición de partículas relativamente gruesas (+0.074 mm) favorece la velocidad de sedimentación y el porcentaje de sólido, sin embargo, las clases de tamaño finas retardan el proceso de sedimentación y la compactación .

#### **Comportamiento de la sedimentación de las pulpas crudas industriales y de otros frentes de explotación.**

Las muestras de pulpas tomadas en la zona de alimentación de la planta de espesadores de pulpa de la E.C.P.S.A., en períodos de buena y mala sedimentación fueron analizadas teniendo en cuenta, sólo, el análisis granulométrico, obteniendo las clases de tamaño + 0.074; -0.074 + 0.044; - 0.044 + 0.010 y - 0.010 mm. En la tabla 19 se relacionan las muestras, las clases de tamaño y la velocidad de sedimentación de pulpas lateríticas industriales tomadas en momentos de mala y buenas condiciones de sedimentación.

**Tabla 19: Resultados del análisis granulométrico de las pulpas en buenas y malas condiciones de sedimentación (mm).**

Muestras	-0.074+0.044	-0.044+0.010	-0.010 + 0	Vs(mm/h)
M-5	8.75	73,76	6,46	46
M-6	12.1	69,95	9,63	52.5
M-8	15.45	42.76	9.76	65
M-9	26.18	32.73	8.73	65
M-14	14.83	49.57	6,07	60
M-3	19.26	67,99	10,49	23
M-4	14,44	57,95	16,27	25
M-7	27,22	51,01	11,09	27.5
M-10	17,38	48,50	18,45	25
M-11	16,19	55,12	25	16

Las cinco primeras muestras de acuerdo a los datos de la Planta se considera mala sedimentación cuando se alcanzan velocidades inferiores a 42.5 mm/h y de buena cuando presenta valores superiores a ese valor, aunque existen ocasiones en los que la velocidad de sedimentación presentan valores similares y el comportamiento es deficiente. No obstante tomándose lo primero expresado las primeras cinco muestras pertenecen al grupo de **Buena sedimentación** y las cinco restantes al de **Mala sedimentación**

De la tabla 19 al determinar los valores medios de las clases de tamaño; se toma el contenido de la clase menor de 0.074mm y las velocidades de sedimentación para cada grupo de muestras: Buena y Mala sedimentación, se obtiene:

**Tabla 20 : Valores medios de la granulometría y la velocidad de sedimentación**

Tipo de sedimentación	$\beta^{-0.074}$	$\beta^{-0.010}$	Vsed(mm/h)
Buena	77	8	57.7
Mala	91	16	23.3

Observación

$\beta^{-0.074}$ - contenido de la clase menor que 0.074mm

$\beta^{-0.010}$  contenido de la clase menor que 0.010mm

Al realizar un análisis de la fracción - 0.074 mm en las muestras se observan diferencias en cuanto a la composición que presenta cada grupo de pulpas. Las pulpas de períodos de buena sedimentación presentan un contenido medio de esta clase de 77 % , siendo el de la clase + 0.074 de 23 % y para las pulpas en períodos de mala sedimentación el contenido de la clase -0.074 mm es superior de 77 % y el de la clase + 0.074 mm inferior de 23 %.

Es decir existe un desbalance granulométrico entre ambos grupos de pulpas que pudiera ser una de las causas de la diferencia en la sedimentación de estos minerales. Al establecer la correlación entre la velocidad de sedimentación y el contenido en peso de las diferentes clases de tamaño se observa : tabla 21

**Tabla 21: Dependencia entre la granulometría y la velocidad de sedimentación**

Fracciones (micrones)	Vs
+74	0.95205
-74 +44	- 0.88353
-44+10	- 0.98272
-10+0	-0.98903

La clase +0.074 mm favorece el proceso de sedimentación, sin embargo con las fracciones más finas ocurre todo lo contrario, la correlación es inversa, lo que significa que influyen en el proceso de sedimentación, retardándolo. Algo similar ocurre al preparar las pulpas artificialmente cuando se incrementa el contenido de las clases finas (menores de 0.074mm.) en la pulpa.

(53) expresó que la fracción -0.010mm, debe influir en el proceso de sedimentación. Al analizar la tabla 19 y 20 puede observarse que estas partículas cuando presenta más de un contenido aproximadamente de 10 % de esta fracción, la sedimentación es mala y cuando es menor de 10% la sedimentación es buena. Pero para valorar las condiciones de sedimentación se escoge la fracción -0.074mm y no otra debido a que esta puede determinarse con mayor grado de exactitud a través del análisis de tamices, el rango del cernido oscila de 60-90 %, para estos minerales, escogiéndose en casos como por ejemplo: la característica de reducción de tamaño; 80% [Bond y otros, 1980]

### **Características granulométricas de las pulpas preparadas con los diferentes frentes de explotación.**

A las pulpas preparadas según el esquema de trabajo, fig.8, (a nivel de laboratorio y a escala de banco ) se les realiza un análisis granulométrico por vía húmeda antes de la sedimentación, obteniendo las clases de tamaño y porcentajes en peso que aparecen en la siguiente tabla:

**Tabla 22: Composición granulométrica de las clases por frentes(% en peso)**

Fracciones(mm)	D-43	D-38	D-23	D-52
-0,833+0,4	12,77	8,02	5,73	5,86
-0,4+0,074	26,71	20,85	15,49	14,3
-0,074+0	60,52	71,13	78,78	79,84

Las pulpas de cada frente se vierten en probetas y se les aplica la misma metodología que en los ensayos anteriores. Al realizar una comparación entre los frentes agrupándolos por las similitudes en sus granulometrías, se toman los valores promedios de las mismas las que se representan en la siguiente tabla:

**Tabla 23: Composición granulométrica media de las clases de tamaño mayores y menores que 0.074mm.**

Clases de tamaño(mm)	Porcentaje en peso( $\gamma$ ).%	
	D38+D43	D23+D52
+0.074	34	21
-0.074	66	79

En la tabla 23 los frentes D-43 y D-38 presentan un contenido de la clase -0.074mm relativamente bajo con un valor medio de 66% y de la clase relativamente gruesa de 34 %. Además alcanzan un % de sólido y una velocidad de sedimentación relativamente alto en el punto crítico de la sedimentación, además de obtener porcentajes de sólidos elevados (promedio de 55 % ) en el producto final lo que permite caracterizarlos como frentes de buena sedimentación. En los frentes D-23 y D-52 el contenido de la fracción - 0.074 mm alcanza un valor promedio de 79 % de mala sedimentación y la mayor de 0.074 mm de 20.69 %. Estos presentan velocidades de sedimentación y porcentajes de sólidos muy bajos (promedio de 42 %), lo que permite caracterizarlos como frentes de mala sedimentación. Observe la figura 20 donde se muestran las curvas cinéticas del proceso de sedimentación de cada frente.

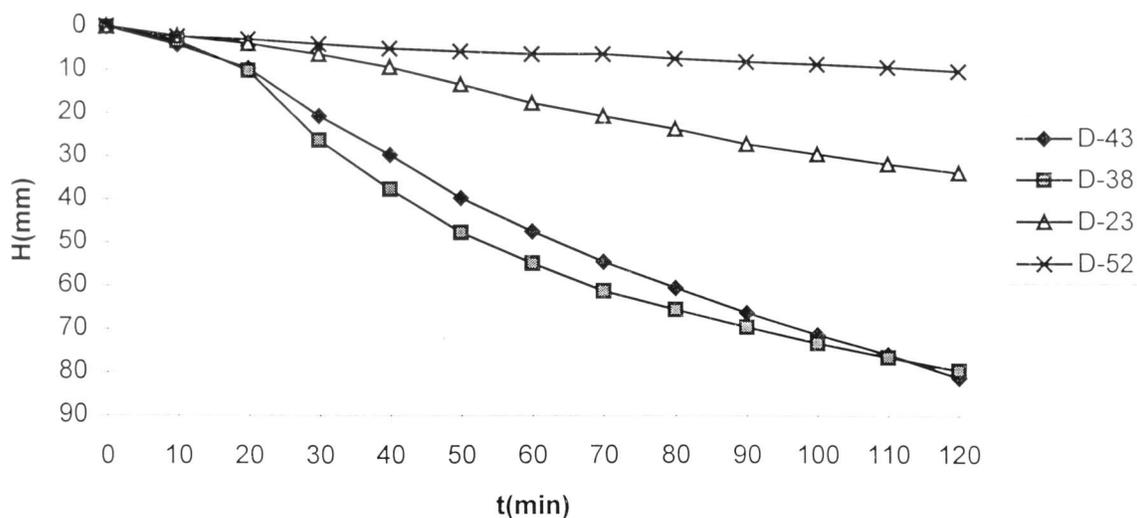


Fig. 20. Comportamiento de la sedimentación de los diferentes frentes de explotación.

Si = 25 +/- 1%

Vea algunos resultados obtenidos al aplicarle la metodología referida. Tabla:24

**Tabla 24: Parámetros obtenidos por la metodología de Talmage y Fitch**

Muestra	Qu(T/m <sup>2</sup> .d)	Cu(T/m <sup>3</sup> )	% S	Vs(mm/s)	δ( g / cm <sup>3</sup> )
D-43	0.469	0.48	36.9	0.703	1.34
D-38	0.457	0.476	35.52	0.73	1.34
D-52	0.391	0.321	26.09	0.078	1.22
D-23	0.42	0.369	29.4	0.30	1.26

Existe una diferencia notable entre cada una de los parámetros analizados, por ejemplo entre las dos primeras muestras y el resto, los parámetros fundamentales; porcentaje de sólido y velocidad de sedimentación, así lo demuestran.

Como se ha visto en todos los resultados obtenidos de las experiencias realizadas, analizando la granulometría como uno de los factores considerado de gran interés en el comportamiento de la sedimentación de los minerales lateríticos que conforman las pulpas crudas; un aspecto

la sedimentación o tal vez cuando el bajo contenido ( $\approx 22\%$  en peso) superior a esta clase de tamaño tenga características diferente al tamaño que la hagan comportarse de la forma explicada. Razón por la cual se hizo necesario estudiar la composición química del material laterítico.

### **3.5- Influencia de la composición química en el proceso de sedimentación**

La composición química de los minerales lateríticos, que se someten al proceso tecnológico de lixiviación ácida a presión, resulta de gran importancia, y el control de los diferentes elementos químicos permite el trabajo eficiente de los diferentes procesos u operaciones.

La industria niquelífera Pedro Sotro Alba en cada una de sus operaciones controla una composición química definida por los objetivos que se persiguen en ellas. Por su parte la operación de minado, encargada de suministrar la materia prima al proceso, controla históricamente para su trabajo los contenidos de Ni, Fe, Co y Mg. Estos con un valor mínimo exigido constituyen la ley de mineral que debe alimentarse al proceso. Esta ley debe obtenerse como consecuencia de la homogeneización de los minerales procedentes de los distintos frentes en explotación, la cual debe garantizar la eficiencia de los procesos siguientes, en específico los de sedimentación y lixiviación.

La eficiencia de estos procesos, está estrechamente relacionada con el producto espesado, obtenido en la planta de espesadores de pulpa, que es enviado al proceso de lixiviación. Si el producto espesado alcanza el valor de diseño  $48\%$ , en peso, la eficiencia y productividad del proceso de lixiviación, es máxima, de lo contrario, estará en la medida del porcentaje de sólido obtenido.

La obtención del producto espesado con la calidad adecuada constituye una de las grandes preocupaciones de la dirección del proceso productivo de la empresa y que aún se desconoce como resolver la problemática tratada.

**Tabla 25: Composición química(en %) por fracciones (en mm)de los frentes**

Clases de tamaño(mm)	Ni	Co	Fe	Mg	Al	Mn	Cr	SiO <sub>2</sub>
FrenteD-23								
-0.83+0.4	1.13	0.269	27.0	1.96	6.85	1.8	2.93	13.06
-0.4+0.074	1.01	0.2	29.8	1.44	4.75	1.40	2.8	18.7
-0.074+0	1.48	0.08	44.1	0.38	2.66	0.74	1.43	0.127
FrenteD-52								
-0.83+0.4	0.95	0.119	33.5	2.99	6.13	0.68	3.0	15.08
-0.4+0.074	0.73	0.245	29.5	1.83	6.10	0.88	0.45	9.77
-0.074+0	1.5	0.079	45.6	1.27	3.68	0.49	1.57	4.63
FrenteD-43								
-0.83+0.4	1.0	0.14	45.0	0.14	4.79	0.67	3.16	3.72
-0.4+0.074	1.03	0.183	45.5	0.21	4.45	0.69	4.91	5.75
-0.074+0	1.2	0.116	48.2	0.28	3.21	0.51	2.86	4.29
FrenteD-38								
-0.83+0.4	0.99	0.22	40.9	0.12	8.17	1.47	4.65	3.38
-0.4+0.074	0.99	0.44	39.0	0.01	10.21	1.27	1.3	0.06
-0.074+0	1.093	0.241	43.66	0.16	7.38	1.096	2.78	1.69

Cada frente presenta una composición química diferente según sus contenidos. Los frentes D-43 y D-38, tienen un alto un contenido de Fe y Cr siendo bajo el de sílice. Los frentes D-52 y D-23 presentan bajo porcentaje de hierro, alto de magnesio y sílice. Esto hace que su comportamiento durante la sedimentación, sea diferente. Vea Fig.20.

Para diferenciar ésta se necesita de un parámetro que lo indique y a la vez permita mezclar a los frentes en función de él, ya que su explotación de forma independiente no es adecuada. Para mezclarlo es necesario lograr que los objetivos esenciales del proceso tecnológico se cumplan, para ello es necesario efectuar una mezcla cuyo resultado favorezca los procesos que le siguen a la preparación de los minerales en específico la sedimentación.

## Índice de sedimentación

El **índice de sedimentación (Ised)** surge como una necesidad de diferenciar los frentes de minerales durante su sedimentación, basados en las características de los elementos químicos principales que se controlan en el proceso.

Cada frente tiene características químicas diferentes, por lo tanto así será su comportamiento durante la sedimentación y su índice en cada caso. El índice está dado por la relación de los contenidos de metales ligeros (Al, Mg, SiO<sub>2</sub>) y de los metales pesados (Ni, Fe, Co, Cr, y Mn). Cuando se realiza la determinación del índice de sedimentación de cada frente, se establece una clasificación física (densidad y tamaño), química y mineralógica. Al analizar las tablas 11, 12, 22, 23, 24 y 25 representan la mineralogía, granulometría y composición química, se observan diferencias.

Al estudiar la cinética de sedimentación de cada uno de los frentes de explotación y tratarlos estadísticamente a través de un análisis de varianza se comprobó que existen diferencias significativas entre ellos: Entre, el D-23 y el D-38, D-23 y D-43; D-52 y D-38, D-52 y D-43. Y entre, el D-23 y el D-52 y el D-43 y el D-38 no existen diferencias significativas. También al aplicar un análisis matricial a los datos relacionados con la composición química, granulométrica y física (densidad) con respecto a la velocidad de sedimentación se obtuvo la siguiente dependencia. Ver tabla 26.

**Tabla 26 : Dependencia entre la velocidad de sedimentación y los factores fundamentales**

Factores fundamentales	Vsed
Ised	-0.96
Densidad	0.92
+0.074 mm	0.95
-0.074 mm	-0.86
Contenido de MgO	0.99
Contenido de SiO <sub>2</sub>	0.89
Contenido de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23
Contenido de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.88
Contenido de NiO	-0.18
Contenido de CoO	0.42
Contenido de Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.81
Contenido de MnO	-0.84

Los resultados muestran la relación que existe entre cada una de las variables. Se observa que existen determinados elementos que por sí solo no tienen influencia significativa en la velocidad de sedimentación, como el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, CoO, CoO, sin embargo otros presentan una dependencia más directa como el MgO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO y el Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Unos influyen negativamente (Ised, la fracción -0.074mm, el MgO, SiO<sub>2</sub>) y otros la aceleran (densidad, la fracción +0.074 mm, el contenido de Cr), pero sin embargo todas estas variables se resumen con el índice de sedimentación, el cual es el que decide el comportamiento del proceso de sedimentación de las pulpas lateríticas.

De acuerdo a las tablas (11, 22, 25) indicadas más arriba los frentes que no presentan diferencias significativas presentan una composición física (densidad y tamaño), química y mineralógica que se relacionan con un comportamiento similar durante la sedimentación. Vea figura 20, los frentes D-23 y D-52 presentan un comportamiento diferente que el D-43 y el D-38, siendo los primeros de **mala** y los segundos de **buena sedimentación**.

Cómo se observa en la tabla 24 los parámetros de espesamiento son diferentes en cada caso, el índice de sedimentación presenta una relación inversa a la velocidad de sedimentación

A través de este parámetro se pueden establecer mezclas utilizando proporciones adecuadas que permitan obtener un índice de sedimentación que propicien buenas condiciones de sedimentación.

Durante la utilización del índice de sedimentación para establecer las mezclas debe realizarse un minucioso análisis de los factores fundamentales que inciden en dicho proceso para garantizar las buenas condiciones de sedimentación. Para la obtención de mejores resultados se realizó un análisis estadístico de los valores de la composición química de los materiales analizados agrupados en buena y mala sedimentación, lográndose obtener un rango de contenidos para cada grupo. También se establece el índice de sedimentación a partir del cual la velocidad de sedimentación se favorece y en correspondencia, el porcentaje de sólido del producto espesado.

Las características químicas de los minerales lateríticos al ponerse en contacto con el agua y formar la pulpa produce un determinado efecto en la composición iónica de ésta, que incide de manera significativa en el proceso de sedimentación y puede favorecer o no el proceso de sedimentación.

### **3.6. Influencia de la composición iónica de la pulpa en el proceso de sedimentación.**

La utilización de sustancias químicas como flocculantes para mejorar las condiciones de trabajo de los procesos industriales, en específico los de sedimentación, es una práctica bastante utilizada en el mundo tecnológico moderno.

En los esfuerzos por solucionar las difíciles condiciones de sedimentación de las pulpas crudas de mineral laterítico de estudio se han ensayado diferentes tipos de sustancias químicas, a nivel de laboratorio, banco e industrial. Al respecto se han obtenido diversos resultados que permiten emitir determinados criterios sobre la utilidad de los mismos.

- Se emplearon también mezclas de electrolitos.

Los resultados de las experiencias con diferentes tipos de agua se presentan en la tabla 27, en la que se controlan una serie de parámetros que resultan de interés.

**Tabla 27: Comportamiento de la sedimentación con diferentes tipos de agua a escala de laboratorio.**

Parámetros	Destilada	Mar	Tratada	Reboso
Frentes D.-	2 30 24 29	2 30 24 29	30 29	30 29
$t_{sed}$ (días)	6 1 5 3	4 2 2 2.5	2 2	1 4
H(mm)	144 152 125 89	120 153 92 111	152 85	165 97
% $S_f$	40,3 45 37 38	43 38 38 45	41,9 32,6	41,4 40
pH( $H_2O$ )	5,9 5,5 5,5 5,3	7,7 7,8 7,9 7,9	8,43 8,31	7,2 7,0
pH <sub>pulpa</sub>	6,8 7,4 6,3 6,4	6,4 6,5 6,6 6,7	6,8 7,3	7,0 6,3
$\lambda_i$	.05 .05 .05 .07	36 26 34 26	.25 .24	.40 .12
$\lambda_f$	.15 .12 .06 .17	27 .23. 30 24	.32 .35	.25 .25
% $S_i$	22 23 23 27	27 21 26 26	21,6 25	19 28

Observación :

$t_{sed}$ - tiempo de sedimentación

H-Altura de sedimentación

%S- porcentaje de sólido(%)

$\lambda_i$  - Conductividad eléctrica antes de la sedimentación; milisiemens

$\lambda_f$  - Conductividad eléctrica después de la sedimentación. milisiemens

En la tabla 27 se observa que existe una notable diferencia en cuanto a la altura de sedimentación alcanzada por las pulpas preparadas con los minerales de los diferentes frentes de

arranque con los distintos tipos de agua utilizados, además hay una tendencia a la disminución del pH y la conductividad después de la sedimentación. Esto permite expresar que la naturaleza del agua tiene un valor considerable en el proceso de sedimentación, por lo tanto si se altera la composición iónica del agua se puede variar la de la pulpa preparada con ésta y como consecuencia la cinética del proceso. Esto dio lugar a la realización de experiencias donde se añadiera una sustancia química: electrólito, que provocara éstas condiciones.

Los resultados experimentales reflejados en la tabla 28 muestran que los electrólitos; cloruro de magnesio y silicato de sodio tienen resultados positivos, los restantes electrólitos brindan resultados negativos o al menos, no tienen tendencia de incrementar su velocidad de sedimentación.

**Tabla 28: Ensayos con diferentes tipos de electrólito.**

Frente	D-2				D-2			
Electrólito	Na <sub>2</sub> OSiO <sub>2</sub>				MgCl <sub>2</sub>			
Nº de probeta	blanco	1	2	3	blanco	1	2	3
concentración.g/l	—	.001	.002	.003	—	.001	.002	.003
H(mm)	24	28	28	36	27,1	27	27,2	27,2
$\lambda$ (antes)	0,26				0,24			
$\lambda$ (después)	0,22	0,22	0,21	0,23	0,20	0,24	0,23	0,22
pH (antes)	8,43				8,14			
pH (después)	6,31	6,51	6,54	6,86	6,29	6,155	6,1	6,2

Se llevaron a cabo experimentos añadiéndose el electrólito durante el proceso de preparación de la pulpa, en los cuales se utilizaron aquellos que se habían ensayado con resultados positivos en las experiencias anteriores; cloruro de magnesio, silicato de sodio, cloruro de sodio y ácido sulfúrico. El comportamiento de los parámetros frente a los distintos electrólitos se muestra en la tabla 29.

**Tabla 29: Comportamiento de la sedimentación con los mejores electrolitos ensayados.**

N° de probeta	1	2	3	4
Electrolito	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgCl <sub>2</sub>	NaCl	Na <sub>2</sub> OSiO <sub>2</sub>
% S <sub>i</sub>	28.6	26	25.3	24.7
% S <sub>f</sub>	49.8	48.6	44.8	44.3
pH (antes)	8.1	8.47	8.41	8.38
pH (después)	7.01	7	7.06	6,9
λ(antes)	0.26	0.29	0.32	0.30
λ(después)	0.39	0.29	0.33	0.31

También se efectuaron ensayos con mezclas de electrolitos añadiéndolos en pequeñas concentraciones, durante la preparación de la pulpa. Las mezclas utilizadas fueron de ácido sulfúrico con cloruro de magnesio, y ácido sulfúrico con silicato de sodio(vidrio líquido). Los resultados se muestran en la tabla 30. Se observan diferencias notables entre los ensayos al ser comparados con el ensayo en blanco.

**Tabla 30: Comportamiento de la sedimentación con mezclas de electrolitos con los valores medios de los parámetros**

Frente	D-24	D-24	D-24
Electrolito	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +MgCl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> +Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	blanco
% S <sub>i</sub>	29,2	25,2	29,2
Concentración(g/l)	0.02+0,002	0,02+0,008	—
% S <sub>f</sub>	47,6	47	42,4
pH	7,7	8,24	8,42
λ(antes)	0.24	0.17	0.3
λ(después)	0.25	0.25	0.18

Los resultados de los trabajos de investigación realizados expresan claramente la relación que existe entre las características del mineral, el proceso de preparación de la pulpa (lavado) y su posterior sedimentación.

Al preparar la pulpa con diferentes tipos de aguas, se manifiestan cambios significativos en las características de sedimentación de la pulpa. También se observa que al adicionar electrólitos durante la preparación de la pulpa, ejercen una mayor influencia en el proceso de sedimentación. Esto se corrobora con los resultados de las experiencias con estas sustancias.

Además de los efectos de la dureza del agua, los parámetros reológicos son sensibles al pH. En los ensayos realizados por Avotins (48), la viscosidad Bingham parece alcanzar un máximo para las lateritas a un pH de 7,5.

En estos ensayos se han evidenciado algunas de éstas consideraciones en lo referente al proceso de sedimentación, pero contradictoriamente la mejor sedimentación no se logra con el agua más blanda y desionizada. Esto puede estar dado por el comportamiento de las fracciones arcillosas de acuerdo a su rompimiento y dispersión.

Las fracciones arcillosas u otros minerales que pasan al estado coloidal, influyen sobre la composición iónica de la pulpa que tiene una estrecha relación con diferentes clases de tamaño del mineral.

Es interesante la tendencia que manifiesta el pH a equilibrarse entre 6,5 y 7,5 independientemente del agua utilizada lo cual podría estar en correspondencia con el grado de rompimiento de los minerales y el intercambio iónico.

Los valores de pH están enmarcados en el rango del punto isoeléctrico de la pulpa donde las condiciones de sedimentación son mejores (141)

### **Ensayos de sedimentación a escala de banco.**

De los resultados obtenidos en las pruebas anteriores se seleccionó como electrólito a utilizar en las nuevas condiciones, al silicato de sodio, pues aunque sus resultados son algo inferiores que los obtenidos con el cloruro de magnesio, éste es menos costoso y menos deficitario que el último.

Los ensayos se llevaron a cabo en una instalación que cumplía con el mismo esquema de trabajo utilizado en los ensayos anteriores utilizándose como materia prima el mineral procedente de los diferentes frentes de arranque de la mina. En la tabla 31 se muestran los resultados obtenidos con el frente D-24, con el electrólito silicato de sodio a diferentes concentraciones

**Tabla 31: Resultados de los ensayos a escala de banco.**

Parámetros	1	2	3
% $S_i$	24,0	25	22,7
% $S_f/32$ h	47	48	44
pH <sub>i</sub>	8,35	8,50	8,60
pH <sub>f</sub>	5,60	5,70	5,30
$\lambda_i$	2,69	2,80	2,90
$\lambda_f$	3,20	3,5	3,33

NOTA: Los ensayos que aparecen en la tabla tienen la siguiente denominación:

1. -Con adición de electrólito a ,001 g/l.
2. -Con adición de electrólito a ,002 g/l.
3. -Con adición de electrólito a ,006 g/l.

En estos se pone de manifiesto la notable diferencia en cada uno de los casos, corroborándose lo expuesto en los ensayos a nivel de laboratorio con respecto a la influencia del silicato de sodio en el proceso de sedimentación. Además se infiere que existe un rango de concentración(0,001-0,008 g/l) en el que se alcanzan mejores indicadores para el proceso. Con valores superiores a éste ocurre el fenómeno inverso ; la repulsión.

Conclusiones :

1. Cuando la composición mineralógica de la pulpa de mineral laterítico presenta como fases secundarias con mayor intensidad de los picos, la gibbsita, cuarzo, antigorita, hematita, etc,

las condiciones de sedimentación son malas, y si la pulpa presenta como fases secundarias, la hematita, magnetita, maghemita, etc. las condiciones de sedimentación son buenas.

2. Las pulpas preparadas con minerales de los diferentes frentes de explotación se diferencian durante su sedimentación por la composición granulométrica, química y mineralógica que caracteriza a los mismos, así como también del tiempo de lavado.
3. Las fracciones finas menores que 0.074mm retardan el proceso de sedimentación y puede ser un indicador más a tener en cuenta para el control de la sedimentación, aunque este no se puede analizar por sí sólo, sino como un sistema con la mineralogía y la composición química. Las menores de 0.020 mm también juegan un papel importante durante los fenómenos de coagulación y dispersión.
4. Se generaliza un esquema de trabajo para la preparación y sedimentación de las pulpas crudas lateríticas de la ECPSA, Moa Nickel S.A.
5. La composición química de los minerales lateríticos de los diferentes frentes de explotación que componen las pulpas lateríticas pueden diferenciarse por el índice de sedimentación que establece la relación metal ligero/metal pesado y presenta una alta correlación con respecto a la velocidad de sedimentación.
6. La utilización de los electrolitos en pequeñas concentraciones(0.001-0.006) g/l pueden variar la composición iónica de la pulpa y mejorar las condiciones de sedimentación. Los mejores resultados se alcanzan con el silicato de sodio.
7. El análisis estadístico revela una estrecha relación entre la composición química granulométrica y el **índice de sedimentación (Ised)**

## **CAPITULO IV**

**MEJORAMIENTO DE LAS CONDICIONES DE  
SEDIMENTACIÓN DE LAS PULPAS DE MINERALES  
LATERÍTICOS EN LA MOA NICKEL S.A . PEDRO  
SOTTO ALBA.**

## **CAPITULO IV: MEJORAMIENTO DE LAS CONDICIONES DE SEDIMENTACIÓN DE LAS PULPAS DE MINERALES LATERÍTICOS EN LA MOA NICKEL S.A PEDRO SOTTO ALBA.**

El fenómeno de la sedimentación de las pulpas lateríticas en el proceso de obtención de los sulfuros de Ni +Co mediante la tecnología ácida ha sido ampliamente estudiado con el propósito de encontrar las vías que permitan estabilizar el porcentaje de sólido del producto espesado que se envía a lixiviación en un valor cercano al de diseño, con su correspondiente efecto económico para remediar las crisis de sedimentación de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

Se han realizado numerosos trabajos acerca de los diferentes factores que afectan la sedimentación sin embargo no se ha logrado hasta el momento incrementar el porcentaje de sólido en las pulpas espesadas.

En este capítulo se analizan dos vías que permiten favorecer el proceso de sedimentación:

- - Utilización del índice de sedimentación para realizar la homogeneización de los minerales lateríticos
- - Utilización del silicato de sodio para regular la composición iónica de la pulpa.

### **4.1- Utilización del índice de sedimentación para la homogeneización de los minerales lateríticos, como vía para mejorar las condiciones de sedimentación.**

La homogeneización es un proceso de combinación de elementos diferentes e incluso relativamente variables, de tal forma que el producto obtenido tenga características similares al promedio de sus características físicas y químicas. Este proceso tiene gran importancia por la influencia que ejerce en la sedimentación y la lixiviación de la pulpa laterítica en la que los contenidos de los elementos metálicos fundamentales Ni (>1.0%); Mg(<0.7); Fe(>30 %) constituyen la ley de mineral (11, 93) que debe alimentarse al proceso tecnológico de lixiviación ácida a presión. Como se observa, sólo se tienen en cuenta 3 de los elementos fundamentales que componen el mineral laterítico.

No siempre que se alimenta un material con los valores mínimos exigidos de la ley de mineral, se garantiza la velocidad de sedimentación adecuada, ni el porcentaje de sólido en el producto espesado de la planta de espesadores, ver fig. 2 y 3.

Los minerales procesados provienen de las diferentes zonas de explotación (frentes con distintos grados de madurez) que reúnen determinadas características que lo identifican. Esta identidad engendra similitudes y diferencias de acuerdo al proceso de meteorización que les dio origen, caracterizadas por dos zonas de la corteza de intemperismo en correspondencia con su nivel evolutivo y por sus características físicas, químicas y mineralógicas las cuales pueden atenuarse a través de la homogeneización de los minerales, tomándose como base el **índice de sedimentación**, que constituye una de las vías para mejorar las condiciones de sedimentación.

### **Metodología para efectuar la homogeneización de los minerales lateríticos**

De acuerdo con la experiencia existente son necesarios los siguientes pasos:

- -Determinación de la composición química, granulométrica y mineralógica de la muestra procedente de los distintos frentes de explotación.
- -Caracterización de la muestra de acuerdo con su velocidad de sedimentación.
- -Determinación del índice de sedimentación de cada frente  $I_{sed} = Re \cdot Ml / Mp$ . Existe un programa de computación ( Otero-Beyris, 1995) que permite realizar todo el cálculo del índice de sedimentación.

Para realizar la mezcla de los frentes se necesita determinar la masa del elemento en el mineral del frente (Me-f) y el contenido del elemento en la mezcla.(%e-m) por:

$$Me-f = Mf * \%e-f / 100: Kg \quad (10)$$

$$\%e-f = Me-f * 100 / Mm: \% \quad (11)$$

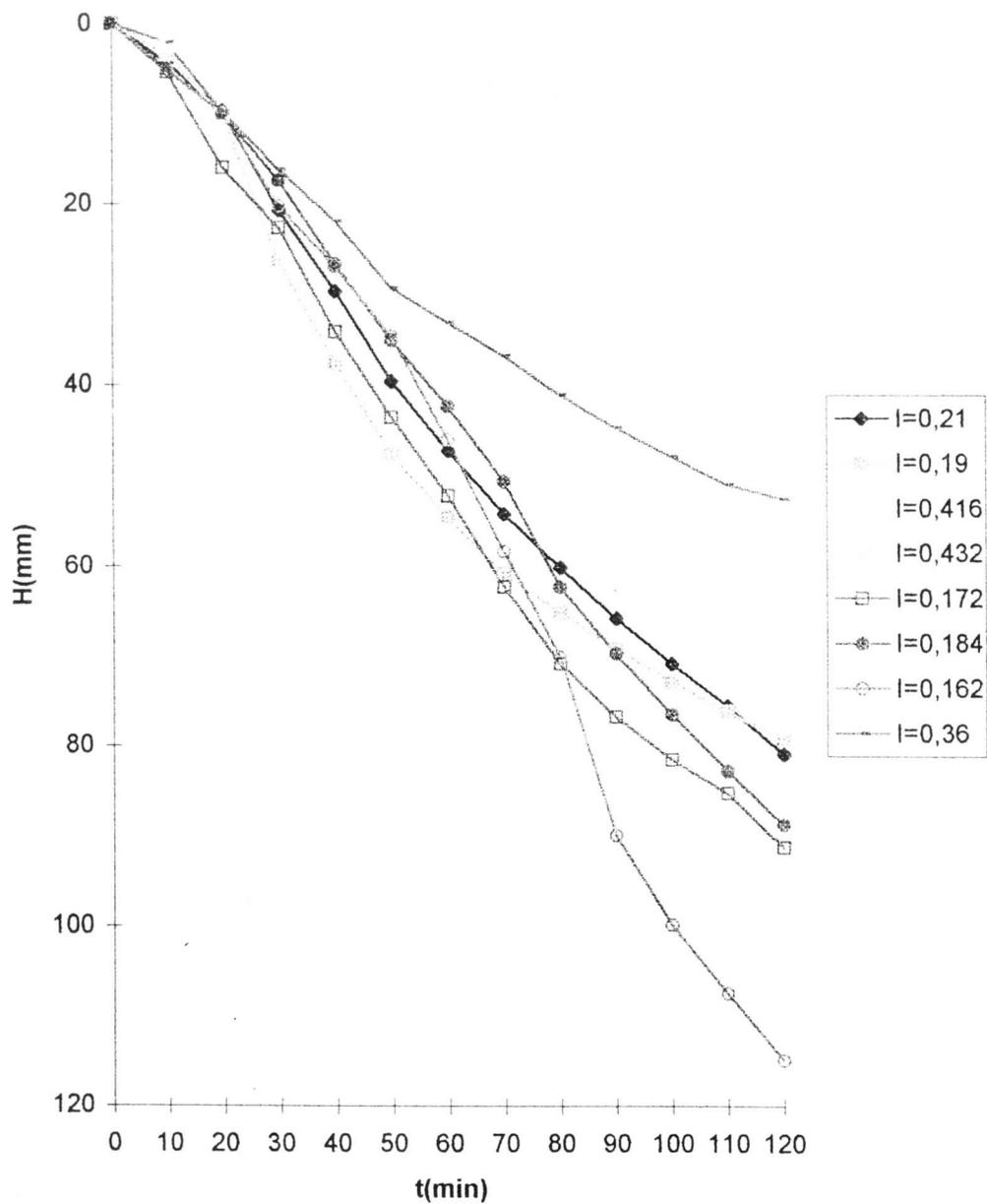


Fig. 22 Comportamiento de la sedimentación de las diferentes muestras con diferentes  $I_{sed}$ .  $S_i = 25 \pm 1\%$ .  $I=0.21$ - D43+D52+D38,  $I=0.19$ - D23+D38,  $I=0.41$ -D52,  $I=0.432$ - D43+D52,  $I=0.172$ - D38,  $I=0.184$ -D43+D52+D23+D38,  $I=0.162$ - D43,  $I=0.36$ -D43+D23

**Tabla 32: Ecuaciones que correlacionan cada uno de los factores que influyen en el proceso de sedimentación.**

Nº	Variabes	Relación	Ecuación	Coef. de corr.
1	S, I <sub>sed</sub>	S=f(I <sub>sed</sub> )	S= 60.59 - 49.89I <sub>sed</sub>	0.96
2	S, V <sub>sed</sub>	S= fV <sub>sed</sub> )	S=35. 91+ 21.56V <sub>sed</sub>	0.94
3	S, $\gamma^{-74}$	S=f( $\gamma^{-74}$ )	S=105.43 - 0.78 $\gamma^{-74}$	0.96
4	V <sub>sed</sub> , I <sub>sed</sub>	V <sub>sed</sub> =f(I <sub>sed</sub> )	V <sub>sed</sub> =1.13 - 2.28I <sub>sed</sub>	0.99
5	V <sub>sed</sub> , $\gamma^{-74}$	V <sub>sed</sub> =f( $\gamma^{-74}$ )	V <sub>sed</sub> =2.85 - 0.031 $\gamma^{-74}$	0.85
6	S, I <sub>sed</sub> , $\gamma^{-74}$	S=f(I <sub>sed</sub> , $\gamma^{-74}$ )	S=82.79-30.38I <sub>sed</sub> - 0.37 $\gamma^{-74}$	0.99
7	S, I <sub>sed</sub> , V <sub>sed</sub> , $\gamma^{-74}$	S=f(I <sub>sed</sub> , V <sub>sed</sub> , $\gamma^{-74}$ )	S=80.11-25.29I <sub>sed</sub> -0.37 $\gamma^{-74}$ +2.26V <sub>sed</sub>	0.99

El error total cometido en estas experiencias fue de 0.5 con una diferencia respecto a las realizadas en el laboratorio de 0.12.

Cuando se mezclan los minerales de naturaleza diferente se produce un balance de todos los factores analizados, permitiendo de esta forma favorecer sus condiciones durante la sedimentación.. El tratamiento estadístico de todos los datos referidos a la composición química, permiten establecer determinados límites y a su vez el conocimiento de cuando se pueden proporcionar una u otras condiciones de sedimentación.

Todas las muestras de mala sedimentación estudiadas se diferencian de manera notable de las de buenas, particularmente al analizar los factores fundamentales que inciden en dicho proceso. Desde el punto de vista granulométrico se caracterizan por tener más del 78% promedio de las fracciones finas -74 micrones(fases minerales de hierro; goethita, magnetita, etc que presentan mayor densidad), y alrededor del 22% promedio de las fracciones gruesas +74micrones, constituidas éstas últimas desde el punto de vista mineralógico, principalmente por silicatos de magnesio; clorita, olivino, sílice, (que constituyen fases minerales de metales ligeros y con baja densidad) con cantidades subordinadas de óxidos e hidróxidos de Fe; goethita, magnetita, gibbsita y piroxeno, lo que provoca en la pulpa un comportamiento anómalo.

Este comportamiento es similar a los obtenidos por (31, 94) con muestras de transverso del tanque espesador en malas condiciones de sedimentación, con respecto a los resultados obtenidos por (29, 111), al utilizar pulpas alimentadas al proceso en las mismas condiciones, en los que, los difractogramas obtenidos que se presentan, son similares.

La composición mineralógica de la clase granulométrica  $-74$  micrones ( $0.074\text{mm}$ ) es prácticamente la misma en el mineral laterítico de balance en todos los frentes. En esa clase se concentran las fases minerales de Fe con un predominio, particularmente, de la goethita. Se considera esta fracción como una de las fronteras granulométricas fundamentales a través de la cual se concibe la mineralogía y la composición química.

De acuerdo al conocimiento del mineral laterítico de balance de estos frentes se puede inferir que los frentes de mala sedimentación, pertenecen a perfiles de alteración pocos maduros, en los que están presentes silicatos de magnesio (cloritas, enstatita, olivino) además de cuarzo, concentrados en las fracciones más gruesas ( $-0.833+0.074$ )mm, los cuales conceden bajos valores de densidad (menor de  $3,4 \text{ g/cm}^3$ ) y los frentes de buena sedimentación, pertenecen a perfiles de alteración maduros ya que es característico el predominio de minerales de Fe (goethita, espinelas, hematitas) tanto en las fracciones gruesas como en las finas.

Las condiciones de sedimentación de cada uno de los frentes minerales analizados tienen una innegable relación con el grado de madurez de la corteza de intemperismo de los minerales lateríticos, de acuerdo a lo cual existe una estrecha dependencia entre ésta y la zona de explotación de los frentes que se caracterizan por sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas y por consiguiente un **índice de sedimentación(Ised)** el que permitirá de forma operativa llevar a cabo el control del proceso.

La utilización del índice de sedimentación durante la homogeneización de los minerales lateríticos de zonas de explotación diferentes, no sólo favorece las condiciones adecuadas durante el proceso de sedimentación, sino también permite obtener condiciones satisfactorias para que se cumpla la ley del mineral exigida por el proceso, que se puede lograr con la mezcla de frentes de buenas y malas condiciones de sedimentación, sin embargo cuando se mezclan dos

consigo la disminución de la capacidad de la planta de lixiviación y por consiguiente de la planta en su conjunto.

Los factores controlados durante el proceso pueden actuar de forma independiente, pero la efectividad de ellos está en su integración.

Para favorecer los factores fundamentales en el proceso de sedimentación, ellos deben estar alrededor de los siguientes rangos:

- 1-  $I_{sed} < 0.22$
- 2-  $V_{sed} > 0.65 \text{ mm/s}$
- 3-  $\gamma^{-74} < 79.48 \%$

Con estas condiciones se pueden obtener porcentajes de sólidos superiores a 46.61 %.

Se producen malas condiciones de sedimentación cuando los límites de los parámetros fundamentales se encuentran entre:

1.  $I_{sed} > 0.23$
2.  $V_{sed} < 0.65 \text{ mm/s}$
3.  $-\gamma^{-74} > 79.48 \%$

Dadas estas condiciones los porcentajes de sólidos que se pueden obtener son inferiores a 46.61, lo cual no cumpliría con el valor de diseño. Vea Fig. 23. En ella los símbolos LC, LS y LI representan límite central, superior e inferior respectivamente.

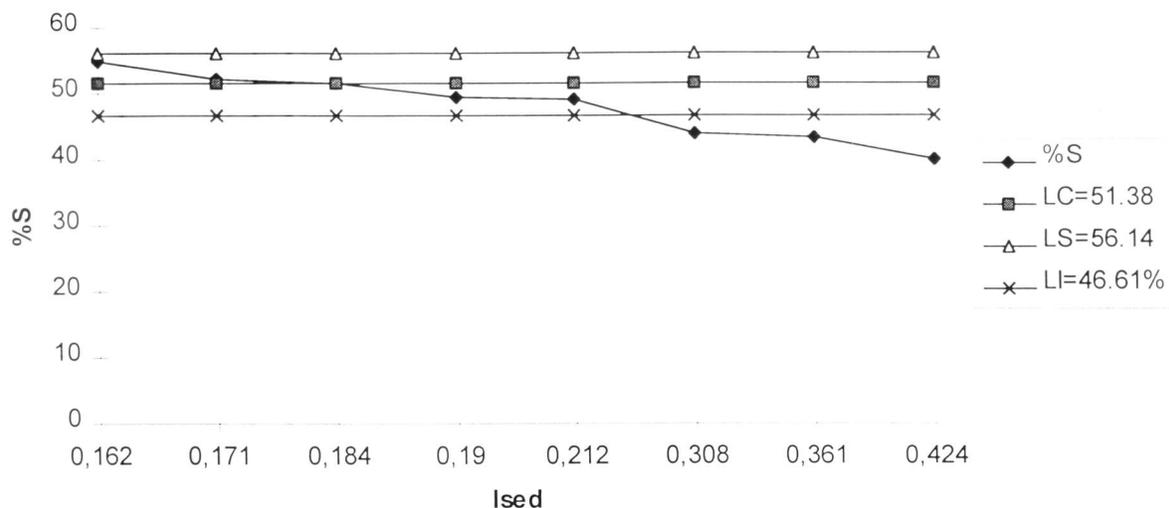


Fig. 23 Gráfico de control del %S obtenido en el producto espesado con respecto a la variación del índice de sedimentación.

La mezcla de los minerales que favorece el proceso de sedimentación debe tener un contenido de sus elementos metálicos dentro de ciertos límites, ver tabla 34:

**Tabla 34: Límites del contenido de metales que favorecen el proceso de sedimentación**

Límites	Ni	Co	Fe	Mg	Al	Mn	Cr	SiO <sub>2</sub>
LS	1.3	0.27	46.70	0.7	8.01	1.286	7.23	5.87
LC	1.13	0.16	44.36	0.30	5.94	0.79	3.77	3.61
LI	0.96	0.05	42.03	0.10	2.97	0.299	0.325	1.35

Leyenda:

**LS** - Límite superior      **LC**- Límite central      **LI** - Límite inferior

En la figura 24 se representan el comportamiento de la sedimentación de las pulpas con los distintos parámetros controlados;  $V_{sed}$ ,  $Q_u$ ,  $Re_{Ac} / Min.$   $V_s$   $Ised$ . Al aumentar el valor del índice de sedimentación disminuye, la concentración de sólido ( $C_u$ ), el flujo de sólidos y la velocidad de sedimentación, sin embargo la relación ácido/mineral tiende a aumentar.

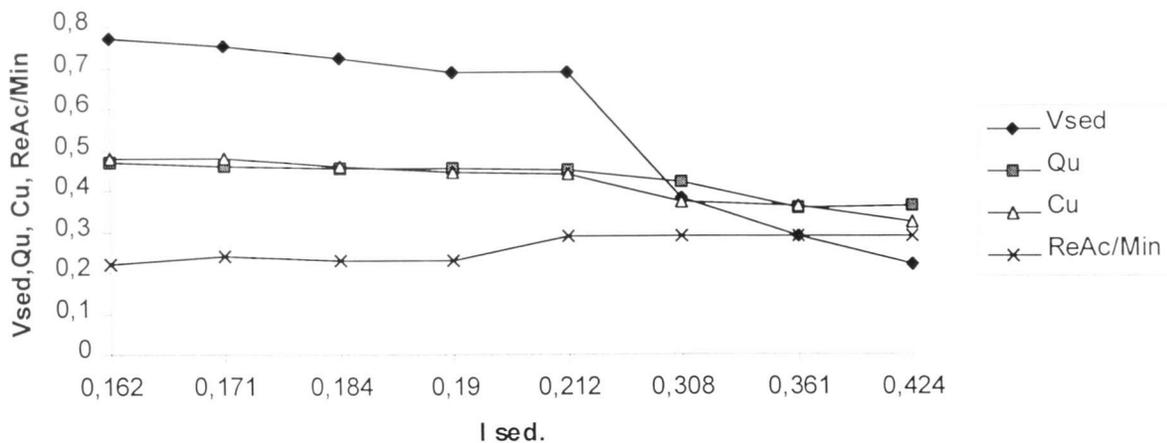


Fig. 24. Comportamiento de la sedimentación de los parámetros de espesamiento con respecto al índice de sedimentación.

También existe relación entre el índice de sedimentación (I sed), porcentaje de sólido (%S) y el contenido de la fracción-0.074 mm. Al aumentar el índice de sedimentación el porcentaje de sólido (%S) y el contenido de la fracción -0.074 mm presentan comportamientos diferentes, ver fig 25

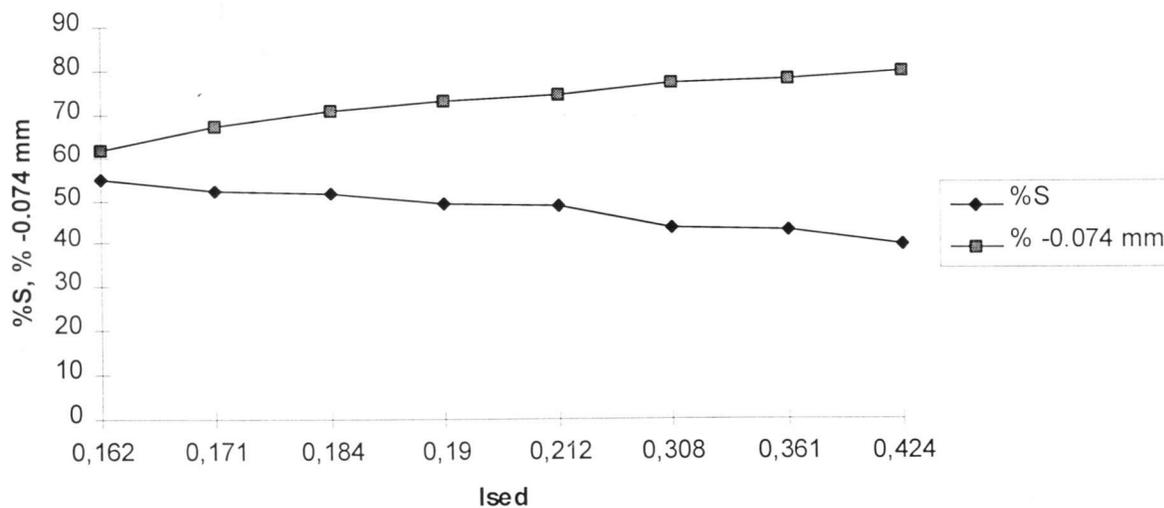


Fig. 25 Comportamiento del %S y del contenido de la fracción -0.074 mm con respecto al índice de sedimentación.

Dadas las características de sedimentación de las pulpas crudas de minerales lateríticos se han estudiado otras vías a través de las cuales se pueden mejorar las condiciones de sedimentación. En las pulpas constituidas por partículas, en su inmensa mayoría muy finas, es usual la utilización de sustancias químicas para acelerar su caída, en este caso se puso en práctica, la utilización del Silicato de Sodio como electrólito.

#### **4.2.- Utilización del silicato de sodio para incrementar la velocidad de sedimentación en la Moa Nickel S.A**

El silicato de sodio fue el seleccionado dentro de un grupo de electrólitos ensayados a nivel de laboratorio para incrementar la velocidad de sedimentación y el porcentaje de sólido y por consiguiente la eficiencia del proceso de sedimentación.

La utilización del mismo se llevó a cabo a escala de laboratorio, de banco e industrial, añadiéndose, en pequeñas concentraciones.

Es bueno conocer que para la realización de los ensayos a escala de laboratorio y de banco, los minerales procedentes de diferentes frentes de arranque, fueron caracterizados de acuerdo con sus condiciones de sedimentación

La adición de silicato de sodio se experimentó durante el proceso de preparación de pulpa y directamente en el proceso de sedimentación, obteniéndose mejores resultados a través de la primera forma, por lo que los resultados que se expondrán en este trabajo están referidos a ésta.

Al realizar las experiencias se llevó a cabo el control de algunos parámetros que no se controlan en el proceso y que se consideran importantes; el pH y la conductividad del agua antes y después de la sedimentación.

**Tabla 35 Resultados de los ensayos al añadir silicato de sodio en las muestras del frente D-38-1 a escala de laboratorio**

Conc. electrolito g/L	0	0.001
% Si	25.8	24.96
% Sf	31.8	35.15
Hsed(mm)	38	122.6
pH <sub>antes</sub>	8.5	7.23
pH <sub>despues</sub>	7.27	5.81

Leyenda: % Si; Por ciento de sólido inicial

% Sf; Por ciento de sólido final

Como se observa, la altura de sedimentación se incrementa notablemente al comparar con y sin adición de electrolitos , también se manifiesta un aumento del porcentaje de sólido en alrededor de un 3%. Algo similar se logra en los otros frentes ensayados (D-29; D-2; D-24).

**Tabla 36: Resultados de la adición de electrolitos con diferentes concentraciones.**

Frente	D-2			
Conc. de elect.	0	0.002	0.003	0.008
% Si	27.2	26.0	27.3	24.7
% Sf	42.1	48.6	47.2	44.3
pH <sub>antes</sub>	8.7	8.47	8.2	8.38
pH <sub>despues</sub>	6.75	7.0	6.66	6.9

En las tablas se observa que la adición de silicato de sodio a la pulpa conformada por mineral del frente D-2 tiene un efecto significativo en el incremento de la eficiencia del proceso de sedimentación, alcanzándose un valor promedio de 46.7% de sólidos.

### Ensayos de sedimentación a escala de banco

Una vez comprobada las experiencias a nivel de laboratorio se decidió realizar las pruebas a escala de banco. Esta última se realizó en un sedimentador de 200 dm<sup>3</sup> de capacidad, alcanzándose los resultados que se muestra en la tabla 37.

**Tabla 37 Resultados de adición de silicato de sodio en el espesador de banco**

Parámetros	Frente D-38	Frente D-24
Concentración de Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g/l)	0 0.001 0.008	0 0.001 0.008
% Si	25 25 25	23 24 25
% Sf (después de 24 horas)	44 46 49	40 45 46

En ésta se corrobora que el electrólito incrementa el porcentaje de sólido. En todas las experiencias se obtuvieron resultados satisfactorios en un rango de adición de 0.002-0.008 g/l.

El conocimiento de los resultados a nivel de laboratorio, corroborados a escala de banco, permitió a la dirección de la Empresa, decidir la utilización del electrólito silicato de sodio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) para el mejoramiento de los indicadores del proceso de sedimentación en la industria. Esta prueba se extendió por un período de 3-4 meses, alcanzándose valores en la velocidad de sedimentación superiores a la obtenida cuando existían buenas condiciones de sedimentación (35mm/h), sin embargo los resultados del porcentaje de sólido no fueron los esperados, lo cual se considera que pudo estar dado por varias causas, entre ellas; la adición de agua al cono, el desbalance entre extracción y alimentación, la posible recirculación de silicato en el agua de reboso con la que se prepara la pulpa, la imposibilidad del torque existente para arrastrar el sólido sedimentado, y otros fenómenos operacionales.

### 4.3. Aplicabilidad de los resultados de la investigación

El presente trabajo obtiene resultados interesantes y se sugiere su aplicación para la obtención de una materia prima de calidad para la tecnología ácida.

La caracterización del material laterítico según sus propiedades granulométricas, mineralógicas y químicas permite una mejor dirección del proceso tecnológico.

La preparación de la pulpa con conocimiento de la incidencia que puede provocar cada uno de los factores mencionados tiene un alto significado.

A través de proceso de homogeneización utilizando la relación del contenido de los minerales de metales ligeros con respecto al de minerales con metales pesado en las proporciones adecuadas permite mejorar no sólo las condiciones de sedimentación sino también las de lixiviación.

El conocimiento de las diferentes propiedades de los minerales y el índice de sedimentación posibilita actuar sobre las condiciones actuales de operación de minería y preparación de la pulpa que desde la puesta en marcha de la fábrica no han logrado estabilizar las operaciones del proceso tecnológico, en específico la de sedimentación. La homogeneización del material laterítico en la ECPSA, siempre se ha efectuado para obtener una ley de mineral a la entrada del proceso en función de los contenidos de níquel, hierro cobalto y magnesio exigidos. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos por mejorar las condiciones de los procesos de sedimentación y lixiviación no se ha resuelto el problema del porcentaje de sólido en los espesadores donde no se alcanza la estabilidad adecuada (Vea fig.2 y 3).

Al efectuar la homogeneización utilizando el índice de sedimentación (metal ligero/metal pesado) existe un conocimiento previo de las características químicas, granulométricas y mineralógicas en cada uno de los frentes de explotación a los que también se les calcula el índice de sedimentación que permite realizar las mezclas de los minerales en las cantidades adecuadas.

Cada frente de explotación tiene características de sedimentación diferentes las que están relacionadas con su génesis. Es decir que el material laterítico de balance perteneciente a frentes de explotación de corteza de intemperismo diferente, en los que unos se caracterizan por presentar altos contenidos de hierro y magnesio con una densidad superior a  $3.40 \text{ g/cm}^3$ , con un contenido apreciable de goethita, espinelas tanto en la fracción fina ( $-0.074 \text{ mm}$ ) como la más gruesa ( $-0.833+0.074 \text{ mm}$ ) con poca cantidad de minerales de serpentina, clorita y sílice en tanto para otros frentes es característico un material con bajo contenido de hierro y contenido de magnesio más elevado ( $0.6-1.5\%$  de  $\text{MgO}$ ) con una densidad inferior a  $3.40 \text{ g/cm}^3$  y es significativo la presencia de los filosilicatos (serpentina y cloritas) en partículas en la fracción ( $-0.83+0.074 \text{ mm}$ ) de estos materiales.

Lo anteriormente expuesto, infiere que para obtener un material laterítico adecuado a procesar por la industria del níquel según la tecnología ácida a presión, deben cumplirse los parámetros siguientes:

El índice de sedimentación no debe ser mayor de 0.22.

El contenido de la fracción  $-0.074 \text{ mm}$  no debe ser superior a 78 % en peso.

Hasta hoy día la práctica industrial demuestra que la materia prima mineral adecuada para la industria del Ní regida por las características químicas de dicho material "para la tecnología ácida resulta insuficiente, cuando se necesita que la laterita de balance tenga un comportamiento adecuado durante el proceso de sedimentación de la pulpa cruda, ya que esta exige de una composición química, granulométrica y mineralógica que cumpla con lo expresado anteriormente.

Debe ser objeto de análisis la presencia de fases minerales de hierro o silicatos de magnesio y sílice en su composición. De modo que es recomendable valorar para las lateritas de balance: parámetros químicos, granulometría, mineralogía (predominio de silicatos de óxidos de hierro en la fracción granulométrica  $-0.833+0.074 \text{ mm}$ ).

Por esta razón juega un rol fundamental en la práctica industrial la etapa de selección y preparación de las muestras que deciden la calidad de la materia prima mineral donde desempeña un papel significativo la existencia de:

- Laboratorio para el estudio de las características de las muestras.
- Patio de acopio y homogeneización de la materia prima en función del índice de sedimentación.
- Zonación del yacimiento.

Pudiera ser empleado en la planta de preparación de pulpa un laboratorio con las técnicas analíticas exigidas. En éste también puede determinarse aspectos relacionados con la zonación del yacimiento.

La aplicación del índice de sedimentación no exige de gastos excesivos y evita las pérdidas de Ni y Co en el proceso de Lixiviación por concepto de sólido dejado de incrementar. El valor de la determinación de cualquier elemento químico es de \$2.00. Al incrementar el número de elementos a determinar en 4 no es significativo el costo que ello infiere. El aumentar el números de elementos y la cantidad de muestras a realizar disminuyen los costos de la determinación. Esta se realizaría en la misma medida que para las muestras tomadas según la ley de mineral.

## Conclusiones

1. Se establece una metodología para efectuar la homogeneización de los minerales lateríticos a través de la utilización del índice de sedimentación (Re metal ligero/metal pesado) que con valor promedio inferior a 0.22 permite mejorar las condiciones de sedimentación de las pulpas de minerales lateríticos alcanzando porcentajes de sólidos en el producto espesado superiores a 46.61 %.
2. La sedimentación de las pulpas crudas de minerales lateríticos depende de más de un factor, entre ellos, la velocidad de sedimentación ( $V_{sed}$ ), el contenido de la fracción  $-0.074 \text{ mm } (\gamma^{74})$

y el índice de sedimentación los cuales se ajustan por una ecuación multilínea con coeficiente de correlación de 0.99.

3. Al aumentar el valor del índice de sedimentación, aumenta el del contenido de la fracción - 0.074 mm ( $\gamma^{74}$ ) y disminuye el porcentaje de sólido en el producto espesado provocando un aumento del costo del proceso de lixiviación.
4. Los parámetros de espesamiento determinados por la metodología de Talmage y Fitch permiten explicar que en el punto crítico de la curva de sedimentación las muestras de menor **índice de sedimentación** presentan mayor, velocidad de sedimentación ( $V_{sed}$ ), flujo de sólido por unidad de área ( $Q_u$ ) y concentración de sólidos ( $C_u$ ), sin embargo la  $Re_{Acido / Mineral}$  ( $Re_{Ac / Min}$ ) disminuye.
5. La utilización del silicato de sodio como electrólito en pequeñas concentraciones (0.001-0.008) g/l mejora las condiciones de sedimentación de las pulpas lateríticas.
6. Basado en los factores mencionados en la conclusión 2 , las buenas condiciones de sedimentación se pueden lograr cuando ;  $I_{sed} < 0.22$  ;  $V_{sed} > 0.65$  mm/s;  $\gamma^{74} < 79.48$  % y son malas cuando ocurre lo inverso.
7. Se establece un esquema de trabajo y una metodología para realizar las investigaciones de las pulpas lateríticas.
8. Con las medidas propuestas, la utilización del Índice de sedimentación y del silicato de sodio se pueden evitar las crisis de sedimentación.

6. El índice de sedimentación (Ised) constituye una innovación tecnológica y su introducción en la industria puede evitar que se pierda un estimado de aproximadamente más de 4 millones USD por cada porcentaje de sólido que se deja de incrementar

## Recomendaciones

1. Experimentar a nivel industrial la utilización del índice de sedimentación como vía para mejorar las condiciones de sedimentación y disminuir los costos en lixiviación.
2. Continuar experimentando a nivel industrial la utilización del electrólito silicato de sodio desde la planta de preparación de pulpa, con las nuevas características del mecanismo de los espesadores.
3. Realizar el análisis del proceso de sedimentación no solo como una acción independiente de cada factor, sino conjunta, como un sistema en el que participan la granulometría, la mineralogía y la composición química. Además, incluir otros factores.
4. Estudiar el comportamiento de la sedimentación de las fracciones menores de 0.020 mm.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Adamovich A.F, V.D. Chejovich. Sobre las condiciones geológicas de formación de las lateritas en Cuba. Revista Tecnológica. C.Habana 1964.
2. Almaguer, A., V. Zamarsky. Estudio de la distribución del Fe, Ni y Co en los tamaños de granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas hasta su desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía. Revista Minería y Geología ( Moa ) 2:17-23, 1993.
3. Almaguer, F. , A. Composición de las pulpas limoníticas de la planta Cmdte Pedro Soto Alba ( I parte ). Revista Minería y Geología. ( Moa ) 12 ( 8 ) : 19-22, 1995.
4. Almaguer, F. , A. Composición de las pulpas limoníticas de la planta Cmdte Pedro Soto Alba ( II parte ). Revista Minería y Geología. ( Moa )XIII(1), 27-31, 1996.
5. Alvarado, B. A. Caracterización cualitativa de la influencia de diferentes tipos de agua en la composición mineralógica de la pulpa cruda de los espesadores de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba. Trabajo de Diploma. I.S.M.M.( Moa). Facultad de Metalurgia, 1992. 42 p.
6. Alvarez, H. Estudio de la sedimentación a escala semi-industrial. Trabajo de Diploma. ISMM ( Moa). Facultad de Metalurgia, 1984. 48p.
7. Anandarajah, A. Discrete element method for simulating behavior of cohesive soil. ASCE ( USA ) : 24 p. , 1994. (en edición)
8. Arencibia R.I. Influencia de la preparación de la pulpa en la sedimentación Trabajo de Diploma .ISMM, Moa. Facultad de Metalurgia. 1992. 45p.
9. Arrastía, A. Estudio de la influencia de la composición fraccional en la sedimentación. Trabajo de Diploma. I.S.M.M.( Moa). Facultad de Metalurgia.1986. 43 p.
10. Artamanov, I. S , R. Novoa. Protocolo. Períodos experimentales mayo-junio. Informe Técnico. Moa. Pedro Sotto Alba, 1974. 8p.
11. Barrios G.J., Zamarsky. Plan de extracción de las minas de Moa para abastecer la fábrica Comandante Pedro Sotto Alba . Informe Técnico.ECPSA.Moa, 1964. 16p.
12. Bates R., J.A.Jackson. Glosary of Geology. American Geological Institute Alexandria, Virginia(USA).1987, 788p.

13. Beitra, M. , E. Colás. Influencia del tamaño de la partícula en la velocidad de sedimentación de pulpa cruda. Informe Técnico. Pedro Sotto Alba, 1981.3p.
14. Bernal H. S, S. Estenóz M. Influencia de la homogeneización de la mena en el extractable durante el proceso de lixiviación ácida. Resumen de Evento Seminario Internacional de Lixiviación Ácida. Moa. 1991.
15. Bernal H.S. y otros. Elección de la efectividad de la utilización de la materia prima mineral durante la explotación del yacimiento laterítico de Moa. Resumen de Evento Seminario Internacional de Lixiviación Ácida. Moa. 1991.
16. Bernal H.S. y otros. Modelación matemática de la dirección del transporte en el régimen de homogeneización para el yacimiento de Moa. Resumen de Evento Seminario Internacional de Lixiviación Ácida. Moa. 1991.
17. Betejtin, A. Curso de mineralogía. Moscú. Editorial Mir. 1977. 739p.
18. Beyris Mazar, P.E, J. Falcón H. Estudio de la preparación del mineral y su influencia en la velocidad de sedimentación. Revista Minería y Geología (Moa)1: 81-87, 1985.
19. Beyris M..P.E. , L. Mora C. Efecto de la homogeneización de los minerales lateríticos en los procesos hidrometalúrgicos. Informe GEOMIN. Moa, 1993.
20. Beyris M..P.E. Efecto de la homogeneización de los minerales lateríticos en los procesos de sedimentación. Informe GEOMIN. Moa, 1993.
21. Beyris M.P.E, E. Ferrer, A. Alvarado. Comportamiento de distintos tipos de iones durante el proceso de sedimentación de las pulpas lateríticas. Revista Minería y Geología (Moa) 2: 75-77, 1996.
22. Beyris M.P.E. Utilización del índice de sedimentación para mejorar las condiciones de sedimentación en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, Moa Níckel S.A. Informe Geomin. Moa. 1996.
23. Beyris M.P.E, D.West D. Estudio de la homogeneización de los minerales lateríticos. Trabajo de investigación presentado en el seminario Internacional de lixiviación ácida a presión. Moa. 1991.
24. Beyris M.P.E, Savón L.D. Estudio de la representatividad de las pulpas preparadas a escala de laboratorio e industrial. Trabajo de investigación. ISMM, Moa. 1993.
25. Beyris M.P.E, G. .Zaldívar. Influencia de la homogeneización de los minerales lateríticos en el proceso de sedimentación. Informe Técnico. ISMM. Moa. 1993.

26. Beyris M.P.E, Delahanty P. L. L. Comprobación de factores que afectan la sedimentación. Trabajo de investigación. ISMM (Moa). 1985.
27. Beyris M.P.E, González M. A. Estudio de la influencia del contenido del Mg en la sedimentación. Informe de investigación. I.S.M.M. Moa. 1986.
28. Beyris M.P.E, Macles D, G. Caracterización mineralógica de la pulpa limonítica de los espesados de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba”(II). Informe de investigación. ISMM(Moa.1990).
29. Beyris M.P.E, Marrero R.. Caracterización mineralógica de pulpas crudas en la ECPSA. Informe de investigación. ISMM. Moa. 1991.
30. Beyris M.P.E, Meriño G. Estudio de la sedimentación de la pulpa lateríticas en planos inclinados. Informe de investigación. I.S.M.M., Moa. 1988.
31. Beyris M.P.E, Ronda Oro, A.: Caracterización mineralógica de la pulpa limonítica de los espesados de la ECPSA”. Informe de investigación ISMM, Moa, 1989.
32. Beyris M.P.E. Estudio de la homogeneización de los minerales laterítico y su influencia en el proceso sedimentación. II Congreso internacional de Geología y Minería. Santiago de Cuba. 1994
33. Beyris M.P.E. Pérez Q.E.P. Sánchez P. Influencia de homogeneización en la sedimentación. Informe de investigación. ISMM. Moa. 1992.
34. Beyris M.P.E., Pérez C. D. Embebale T. Influencia de la homogeneización de los minerales lateríticos en el proceso de sedimentación. Informe. IX. Moa. 1989.
35. Brown, G.G. Operaciones Básicas de Ingeniería Química. Edición Revolucionaria .1965.629p.
36. Bueno, J.L, A. Gutiérrez. Teoría y Práctica de sedimentación. Parte I . Fundamentos de sedimentación-espesamiento. Revista Ingeniería Química. (Madrid) 207: 159-174, 1986
37. Bueno, J.L, A.Gutiérrez. Teoría y Práctica de sedimentación. Parte II. Operaciones de sedimentación individualizada. Revista Ingeniería Química. (Madrid) 210: 131-138, 1986.
38. Bueno, J.L, A.Gutiérrez. Teoría y Práctica de sedimentación. Parte III. Operaciones de sedimentación espesamiento. Revista Ingeniería Química. (Madrid) 213: 65-77, 1986.
39. Bugelsky y C.F. Formell Cortina e Hidrogeoquímica de la corteza de intemperismo ferroniquelífera de Cuba. Serie Geológica No 3. 1967.

40. Cabrera, M. , L. Aradas. Estudio de la velocidad de sedimentación en la línea conductora de planta de pulpa a planta de espesadores. Trabajo de Diploma. I.S.M.M. (Moa) . Facultad de Metalurgia, 1981. 42p.
41. Carlson, E.T., C. S. Simons. Metalurgia Extactiva de los Minerales Oxidados de Níquel. La Habana:(s.n), 1972, 123p.
42. Catasús E.- Caracterización mineralógica de las pulpas limoníticas de Moa. Trabajo de Diploma. ISPJAM, ( Stgo de Cuba ). Facultad de Tecnología Química, 1992.43p.
43. Cerpa N. A .Propiedades de Flujo de Suspensiones lateríticas concentradas. Influencia de la mineralogía y de las características coloidales. Tesis Doctoral. Madrid, 1997. 149 p.
44. Chojin, V.N., A.G.Lopatin. Métodos Gravitacionales de Beneficio. Editorial Niedra. Moscú.1980.398p.(en Ruso)
45. Coagulation and Flocculation. Chemistry and Mechanisms. Conferencias. Australia, 1983
46. Coe H.S. , G.H.Clevenger. Methods for determining the capacities of slime settling tanks. Trans. AIME,(USA)55, 356, 1916.
47. Colás E. Influencia de la composición de Mg y Al en la sedimentación de minerales. Informe Técnico.ECPSA. Moa. 1977
48. Congreso Internacional de Beneficio de Minerales IX. Praga. Checoslovaquia, 1970. Modification des bornites en fonctions du continuer sala des coux utilisses et de la temperature.
49. Dixon,W.J., F.J.Massey. Introducción al análisis estadístico. Edición Revolucionaria. La Habana. 1972. 489p.
50. Falcón H. J, P. E.Beyris, E.Ferrer, M. Montero. Sedimentación de las pulpas crudas de minerales lateríticos de la ECPSA. Revista Minería y Geología (Moa), XIV (1): 31-36. 1997
51. Falcón, H. J., A. Hernández. Influencia de la composición iónica de la pulpa limonítica en el proceso de sedimentación. Revista Minería y Geología (Moa) 5(3): 67-80, 1987.
52. Falcón, H. J. Sedimentación de minerales limoníticos. Revista Minería y geología. Moa, 2: 92-104.1985.
53. Falcón, H. J. Consideraciones sobre la sedimentación de la pulpa limonítica en la empresa de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba. Revista Minería y Geología (Moa)2: 172-188,1983.

54. Falcón, H. J. Estudio de la preparación de la pulpa y la sedimentación de los minerales de Moa a escala de laboratorio. Informe de trabajo de investigación. Moa, 1984.
55. Fitch Bryant. Batch test predic thickeners performance. Chemical Eng. (Inglaterra)23, 83, 1971.
56. Fitch Bryant. Current theory and thickener desing. Chemical Engenering. (Inglaterra) 58:18.1966.
57. Fitch Bryant . Current theory and thikener desing filtration and separation. Chemical Engenering. (Inglaterra) 22: 480,1985.
58. Figueroa, M. Influencia del cloruro de magnesio en la velocidad de sedimentación. Trabajo de Diploma. ISMM.(Moa). Facultad de Metalurgia. 1985. 48p.
59. Fomenko T.G. Procesos de Enriquecimiento de Minerales por Gravitación. Editorial MIR. Moscú. 1980.421p.
60. Gaudin, A. M. , M. C. Fuerstenau, R. Mitchel. Effect of pulp depth and inicial pulp density in batch thickening. 6: 613-616.1959.
61. Garcell, L., A. Cerpa N. Factores que influyen sobre las características reológicas de las suspensiones de limonitas cubano.Trabajo de investigación. ISPJAM. 1993. 10p.
62. Garcell, L., A. Cerpa N. Caracterización reológica de las pulpas de limonita de Moa. Revista de tecnología Química.(Santiago de Cuba).XIII.(2)1992.
63. Glaston S. Tratado de Química Física. Edición Revolucionaria. C. Habana. 1968. 1180p.
64. Grave de Peralta, M. Sedimentación de la pulpa cruda. La Minería en Cuba. La Habana. 2: 36-50, 1975.
65. Grave de Peralta, M., J.Mendez C. Prueba industrial de floculante. Informe Técnico de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba(E.C.P.S.A), Moa.1971. 3p
66. Grave de Peralta, M., J. Mendez C. Prueba Industrial de Floculante. E.C.P.S.A. Enero, 1971. 4p.
67. González, C. J. Factores que influyen en la floculación por electrólitos. Revista Ingeniería Química ( Madrid)185: 79-84. 1984.
68. Hausser J. Coagulation and Flocculation. Chemistry and Mechanisms. Course of sedimentation, Monasch University. Australia, 1982.
- 69. Hernández F.A: Influencia de la composición iónica de la pulpa en la velocidad de sedimentación. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa. Facultad de Metalurgia. 1982.

70. Hernández F. Optimización de los accionamientos soviéticos para sedimentadores de 115 m . Primera Parte, cambio de velocidad 1 / 45 a 1 / 52.5. Informe técnico. ECPSA. Moa, 1983. 3 p.
71. Hoel, P. G. Estadística elemental. Edición Revolucionaria. La Habana.399p.
72. Horst Sinneker: Acerca de la influencia del componente Mn-Ni-Co de la laterita sobre las propiedades de sedimentación de ésta. Serie Lateritas.(CIPIMM)1968.
73. Hunter R.J.Stabilization of Colloids by electric charge or applied Colloid and surface chemistry. School of Chemistry. Univ. of Melbourne, 1971.
74. Illiuvieva G.V y otros. Química Física y Coloidal. Moscú 1982.
75. Inclined surface Review of desing and practice sedimentation. Monash University Chem.Eng. Julio,1982.
76. Intensificación del espesamiento del hidróxido de aluminio. Doulov, S. P...(et al). Revista Metalurgia No Ferrosa. (Moscú)7: 35-36. 1976.(en Ruso)
77. Internacional Simposium.- New York, 1979. Reología y Manipulación de pulpas lateríticas.p.610-635.
78. Kasatkin A. G. Operaciones Básicas y aparatos en la tecnología Química(T II). Editorial Pueblo y Educación. C. Habana. 1985. 485p.
79. Kean, J. M. Sedimentation: Theory, equipment, and methods, Part I, World Mining, November.1979
80. Kean, J. M. Sedimentation: Theory, equipment, and methods, Part II. World Mining, December, 1979
81. Kondukov, V. P. Investigación del espesamiento de las pulpas lateríticas. Revista Beneficio de Minerales.(Rusia)6: 19-24. 1974. (en Ruso)
82. Kondukov, V.P. Ensayo semindustrial del espesamiento de las pulpas limoníticas. Revista Beneficio de Minerales.(Rusia)1: 12-16. 1975. (en Ruso)
83. Kondukov, V.P., Ensayo industrial del espesamiento de las pulpas limoníticas. Revista Beneficio de Minerales.(Rusia)3: 24-27. 1976. (en Ruso)
84. Kos Peter:- Continuos Gravity Thickening of sludges. Prog.Water Tech 9,291,1977.
85. kudelasek V.,Marxova I.,Zamarsky V. La mineralogía de la corteza de intemperismo de las rocas ultrabásicas de la costa norte de la provincia de Oriente, Moa, 21-61.

86. Kynch, G. J. "A Theory of sedimentation", *Transation Faraday Society*.(USA)48(2)166-176. 1952.
87. Lavaut C. Control Litológico Mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral yacimientos Punta Gorda, Camariocas, y Piloto. Archivo E.G.S. Moscú. 1987.
88. Legrá L. A.A. Programa AMIGO. Software. ISMM. Moa. 1995
89. Mace G.R ; R. Laks. Desarrollo de la sedimentación de la por gravedad .*Chemical Engineering progress*(Inglaterra),julio,1978.
90. Martell C.E. Informe sobre prueba de sedimentación con pulpa de mineral crudo y con adición de floculante BURTONITE. Informe técnico ECPSA. Moa. 1969.
91. Mendez, J. Prueba a escala industrial con adición de floculante ( Magnafloc R-292).Informe técnico (ECPSA)1971.10p.
92. Michaels A.S and J.C.Bolger: Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolin suspensions. *I.J.E.L.Fundam*,1, 24, 1962.
93. Milián M. E. Efectividad de la homogeneización en el yacimiento Moa. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. Facultad de Minería. 1994. 38p .
94. Montero M. M. Algunas consideraciones acerca del espesamiento de la pulpa en el proceso metalúrgico de la fábrica "Pedro Sotto Alba". Trabajo de Diploma . ISMM. Moa. Facultad de metalurgia. 1989.
95. Mular A, Rósham Bhappu:- *Mineral processing plant desing*. Edición.AIME. New York.1980.
96. Nebot, Miguel. Pruebas experimentales sobre el efecto de los pickets en la pulpa cruda con adición. Informe Técnico, ECPSA,1969.
97. Nebot, Miguel. Espesadores de pulpa. Teoría para explicar su desviación con diseño. Informe técnico. ECPSA. Moa 1969.
98. Nebot, Miguel. Pruebas de sedimentación con mineral preparado a diferentes granulometrías. Informe técnico. ECPSA. 1969.
99. Nebot, Miguel. Pruebas de sedimentación de pulpa cruda con adición de mineral lixiviado. Trabajo de investigación, ECPSA,1969.
100. Nebot, Miguel. Prueba de sedimentación con los diferentes tipos de floculantes Magnafloc. Trabajo de investigación.ECPSA1969.

- 101.Nebot, Miguel. Nuevas pruebas de sedimentación y uso del floculante BURTONITE, para acelerar dicho proceso. Trabajo de investigación.ECPSA1969.
- 102.Nebot, Miguel. Prueba de sedimentación efectuadas con diferentes dosificaciones de Magnafloc R-292. Trabajo de investigación.ECPSA1969.
- 103.Nebot, Miguel. Prueba de sedimentación con pulpas sometidas a un campo magnético. Trabajo de investigación.ECPSA1969.
- 104.Nebot, Miguel. 1ra y 2da prueba de sedimentación de pulpa cruda con mineral de Yamanigüey, zona B y compósito de ambos. Trabajo de investigación.ECPSA1969.
- 105.Nebot, Miguel. Prueba de sedimentación con pulpas lixiviadas con y sin agitación. Trabajo de investigación.ECPSA1969.
- 106.Novoa R,Ortega. Influencia del pH y otros factores de la sedimentación de pulpa de mineral . Revista Cenic,7,Feb.1976.
- 107.Ostroumov M., Rojas P. A. Blanco J. Caracterización mineralógica de las lateritas del sector Atlántico, mina Moa. Revista Minería y Geología. 1/87.1987.
- 108.Parra Ch.G., Pérez T.R: Sedimentación de la pulpa cruda con silicato de sodio. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa. Facultad de metalurgia 1984.43p.
- 109.Peña S.E.: Estudio de la sedimentación fraccional. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa. Facultad de metalurgia 1982. 48p.
- 110.Plummer B. Influencia de la fracción -325 Mesh en los espesadores. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. Facultad de metalurgia1978.45p.
- 111.Ponce N.,et. al. Posible influencia de la composición mineralógica en la sedimentación de la pulpa cruda de Moa. Revista Minería y Geología.1/3.1983.
- 112.Portuondo , D.R. Procesamiento de datos experimentales. La Habana.1988.292p.
- 113.Proc.11th. Inst. Miner. Process. Congres, Cagliari, 1975. A theory of sediment compression. p.297-318.
- 114.Proc. 7mo Internacional conference water pollution research. Pergamon, 1974. Effect of permeability and compressibility of flocculant suspension of Thickening.
- 115.Quintana P.R. Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento Moa Análisis físico mineralógico. Minería y Geología . No1,95-104p,1985.
- 116.Quintana P.R. y otros: Estudio de la pulpa cruda del mineral laterítico del yacimiento de Moa.(I): Análisis granulométrico. Minería y Geología. No3, 135-146p. 1984.

117. Quintana P.R. Algunas consideraciones sobre la distribución granulométrica de la pulpa limonítica cruda de los espesadores de la Empresa Cdte Pedro Sotto Alba, Moa. II Encuentro Científico Técnico del Ni, ISMM, Moa, 1983.
118. Rodríguez A. N. Carralero. Condiciones Geomorfológicas y Neotectónicas de las zonas de desarrollo de yacimientos lateríticos de Moa. Revista Minería y Geología. 1:37-48, 1984.
119. Rodríguez C.A: Prospección y exploración de las cortezas de intemperismo sobre ultramafitas en Nicaro y Pinares de Mayarí. Tesis de Doctorado. ISMM. Moa, 120p. 1990.
120. Rojas P.L.A., P.E. Beyris M. Influencia de la composición mineralógica en la sedimentación del material limonítico de frentes de explotación de la industria "Pedro Sotto Alba". Revista Minería y Geología. (Moa). 11(1):13-17, 1994.
121. Rojas P.L.A. Principales fases portadoras de Níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento Moa. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológicas. Moa, 1995. 112p
122. Rosabal V.J.M, L. Garcell P. M. Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas. Editorial Pueblo y Educación (C.Habana) 1988., 317 p.
123. Rosabal V.J.M, M. Valle M. Hidrodinámica y separaciones mecánicas. Ediciones ENPES (C.Habana) 1988., 317 p.
124. Schubert, H. On theory and design of sedimentation. (Aufbereitungs, Alemania). 8:427-441. 1981
125. Scott K.J, J.L. Alderton. Capacidad máxima de manipulación de salida de los espesadores continuos. Transactions the Institution of Mining and Metallurgy. (Inglaterra) Vol. 75, 201-210, 1966.
126. Scott K.J, J.L. Alderton. Theory of thickening factors affecting settling of solids in flocculated pulps. Trans. Inst. of Mining and Metallurgy. (Inglaterra) section C. Mineral Process. Extr. Metallurgy). 1968, V. 11, p. 85-97.
127. Scott K.J, J.L. Alderton . Experimental study of continuous Thickening of flocculated silica slurry, Ind. Eng. Chem. Fundam, 7, 582-595. Nov, 1968.
128. Scott K.J, J.L. Alderton . Theory of thickening. Trans. IMM(c) (Inglaterra), 77, 685 (june, 1968)

129. Shinichi, Yuu. Particle sedimentation. En su : Transport Phenomena and Related Topics, 1994. p. 313-326. artículo del current contents) ISMM Moa. No 52.45.17(1449)
130. Silva J. , L. Chaviano. Análisis de las posibles causas que originaron las crisis de sedimentación en espesadores y lavaderos. Informe de investigación. ECPSA. Moa 1980.
131. Smirnov. V.I.. Geología de los Yacimientos minerales. Editorial Mir, Moscú, 654p. 1982.
132. Sobol, S.I. Composición mineralógica de lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de lixiviación de mineral por ácido sulfúrico en autoclaves. Revista tecnológica . La Habana, 1968. : No 5-6, p3-24.
133. Sobol, S.I. . Propiedades reológicas de las pulpas del mineral laterítico. La Minería en Cuba. Vol.4, No2, 34-44p. 1978.
134. Szekely, C.I .M. Popa, D: Modification of Vitesse of sedimentation des borbotines en fonction du contenueur sala des coux utilises et de la temperature. IX Congreso Internacional de Beneficio de minerales. Praga. Checoslovaquia; 1970.
135. Talmage W. P. , E. B. Fitch. Detrmining Thickener Unit Areas. Industrial and engineering Chemistry. 47(1): 38-41, 1955.
- ~ 136. Taquechel V. , M. Castillo. Diferencia de la velocidad de sedimentación en la línea conductora desde la planta de pulpa a espesadores. Trabajo de Diploma. I.S.M.M. (Moa). Facultad de Metalurgia, 1980.
137. Thorndahl U. Improvement of sludge sedimentation by installation of upward flow clarifiers. Filtration and Separation. 747 .September 1995.
- ~ 138. Torres C.E.:- Efectos de la interacción entre las partículas sobre el comportamiento reológico de las pulpas de la laterita de Moa. Trabajo de Diploma. Facultad de tecnología Química. I.S.P.J.A.M. Stgo de Cuba. 1989.
139. Valdés G., F. Estudio sobre la sedimentación de la pulpa de carbonato básico de Ni de Nicaro. La minería en Cuba. Vol.5 , No3, 11-16p. 1979.
140. Valdés, G. F y otros: Influencia de las propiedades electrosuperficiales del mineral laterítico de Moa en sus características de sedimentación y espesamiento. 1er symposium Científico técnico de la rama minero metalurgica. Diciembre, 1982.
141. Valdés, G. F. Principios químico coloidales de la sedimentación de las pulpas altamente dispersas de mineral o laterítico de la fábrica de Moa. Tesis Doctoral. Moscú, 1983, 153p. (en Ruso)

142. Valdés, G. F y otros. Conceptos teóricos y tecnológicos sobre el espesamiento de las pulpas del mineral laterítico de Moa. 2do Encuentro Científico Técnico del Ni., 1983
143. Valdés, G. F. Fundamentos químicos coloidales de la sedimentación de las pulpas acuosas de mineral lateríticos( I ). Revista Tecnológica. Vol.14, 44-50p. 1984.
144. Variatski S.S. Química coloidal, Editorial Moscú, 219p. 1964.
145. Vera Y.A: Introducción a los yacimientos de Níquel cubanos. Editorial Orbe. La Habana, 211p, 1979.
146. Vleter de, D.R. Cómo se forma el mineral de Níquel cubano. Una lección sobre génesis de las lateritas. Metalurgia Extractiva de los minerales oxidados de Ni. La Habana, 9-19p., 1974.

## **SIMBOLOGÍA UTILIZADA**

Ised- Índice de sedimentación

LS- Límite superior.

LI- Límite inferior

LC- Límite central

$\zeta$  - Potencial zeta

$A^0$  - Anstron

Si- Porcentaje de sólido inicial

Sf- porcentaje de sólido final

$\lambda_i$ - Conductividad eléctrica inicial

$\lambda_f$ - Conductividad eléctrica final

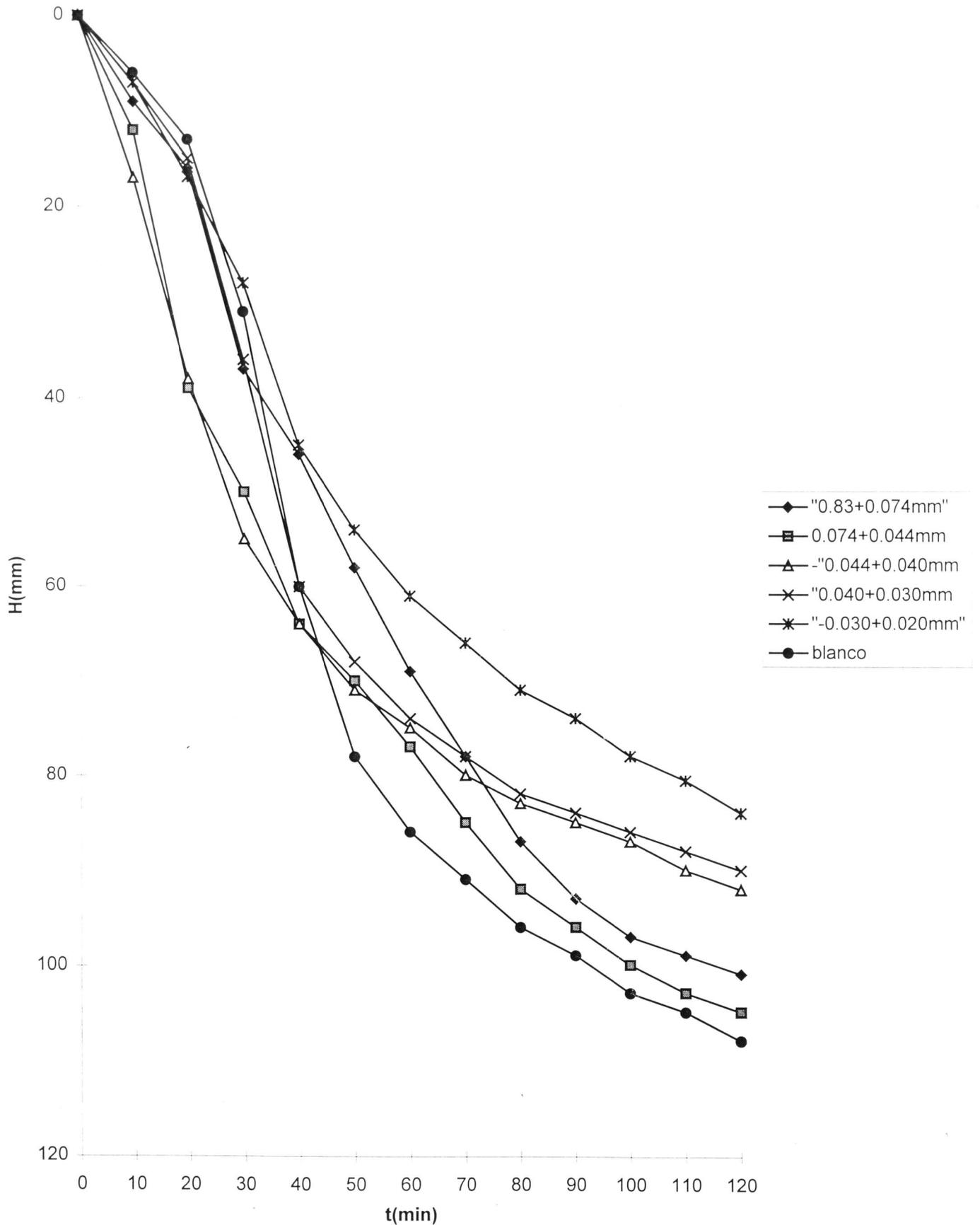
$\beta^{-74}$ -Contenido de las fracciones menores que 0.074 mm

Cu- Concentración de sólidos en el tiempo unitario

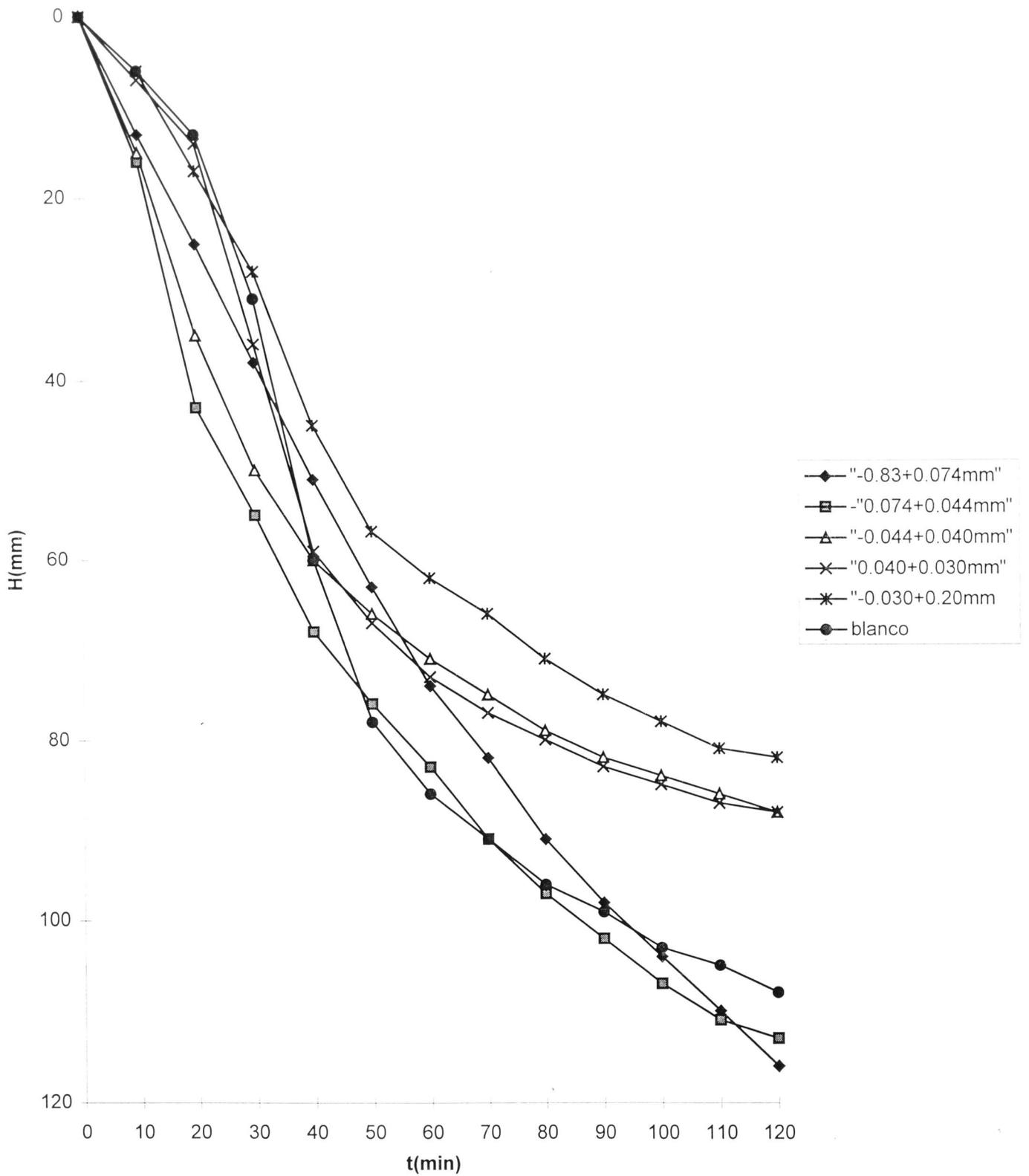
Qu- Flujo de sólido por unidad de área

Vsed- Velocidad de sedimentación.

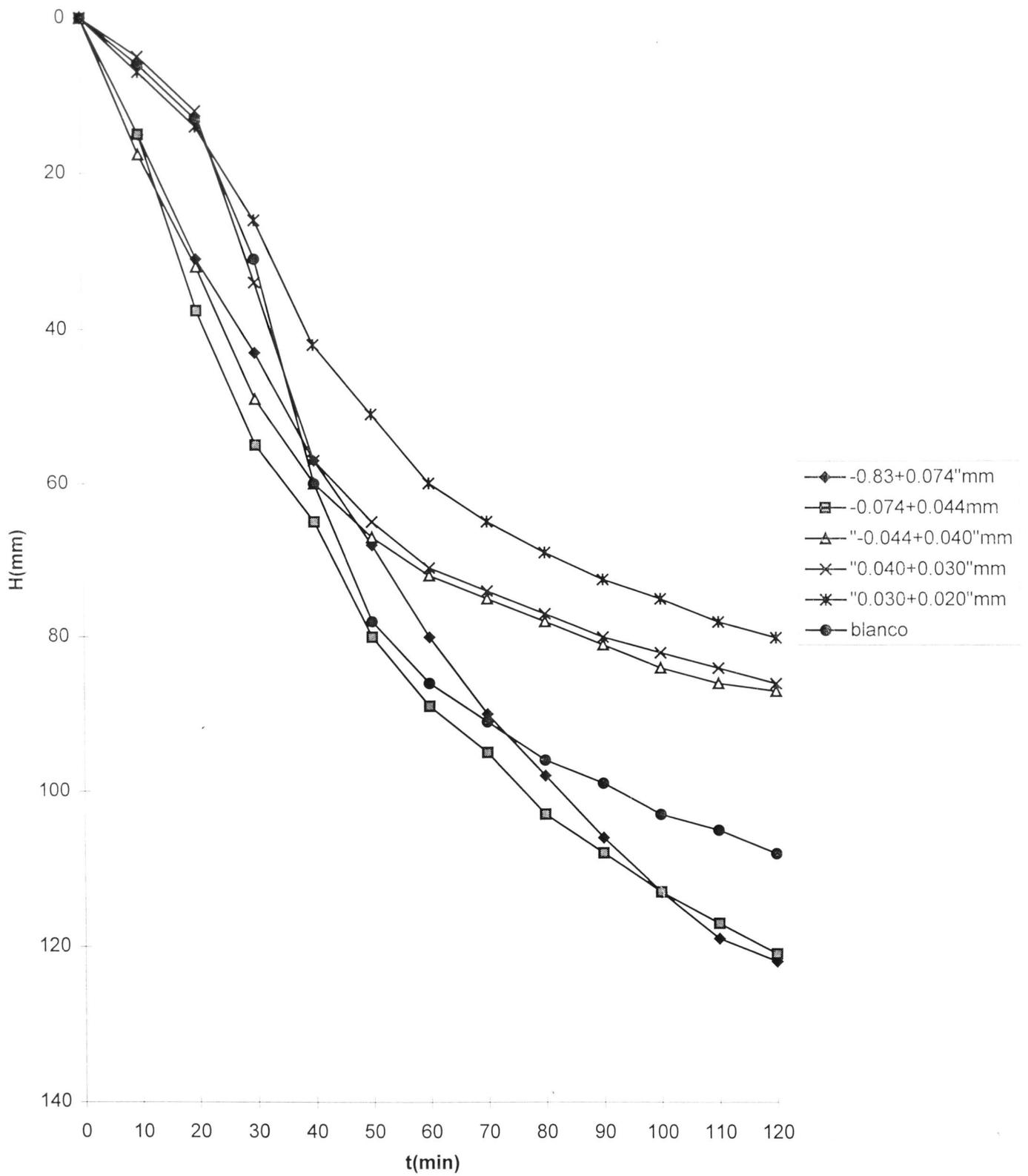
Tu- Tiempo unitario.



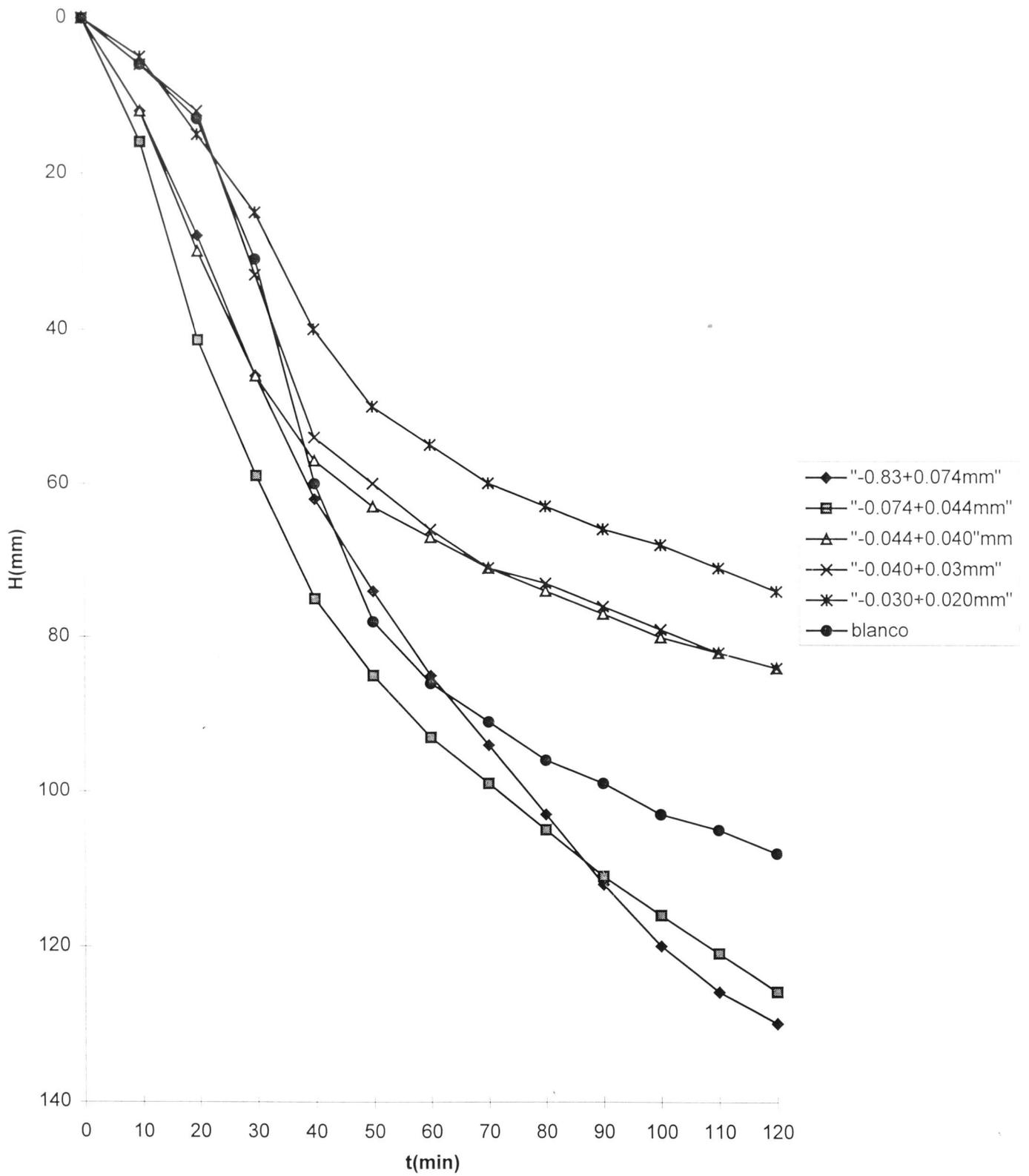
Anexo.1 Comportamiento de la sedimentación al añadir un 26 % de las diferentes clases de tamaño.  $S_i = 25$   
 $\pm 1\%$



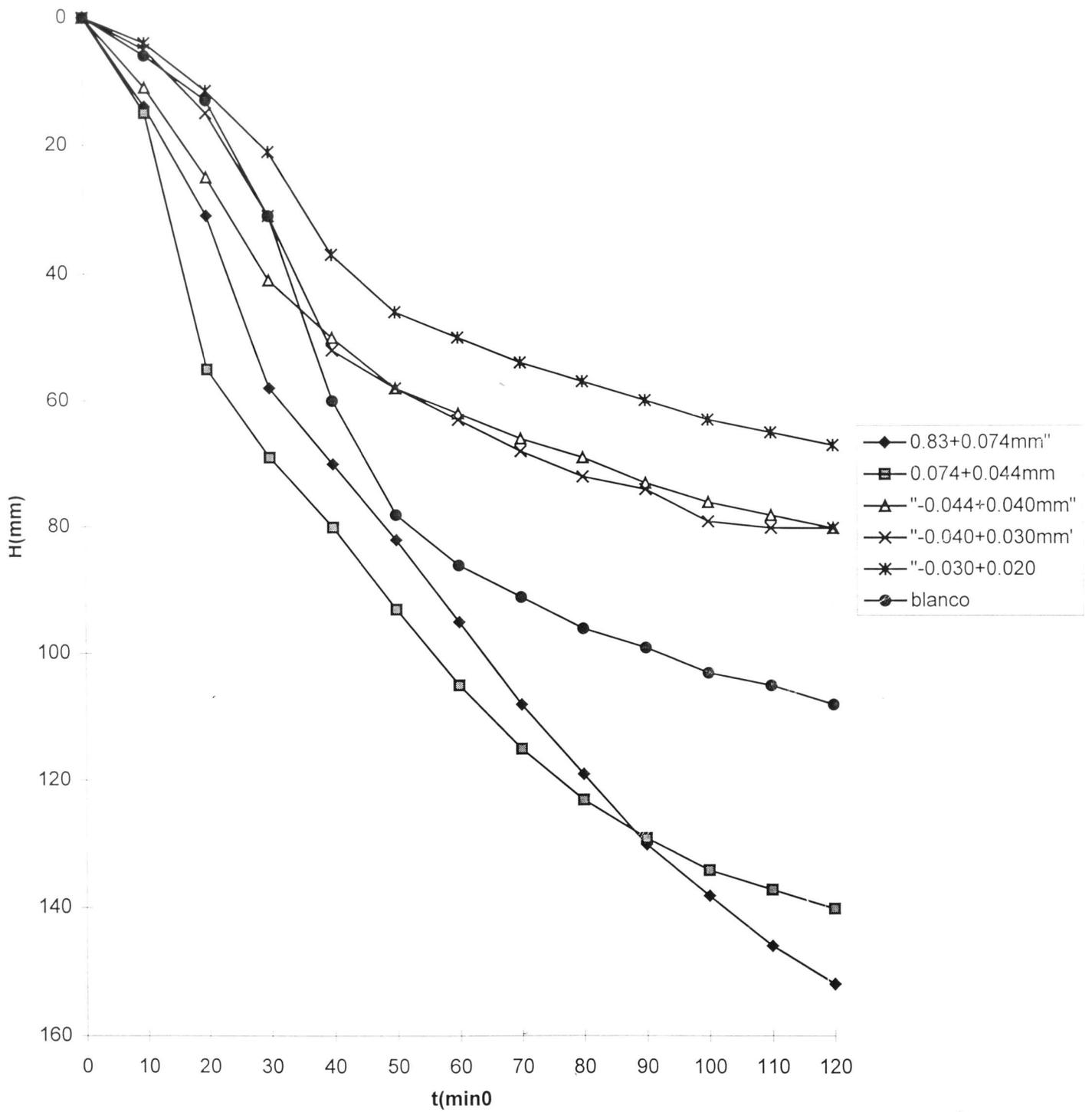
Anexo. 2 Comportamiento de la sedimentación de las pulpas lateríticas al añadir 32% de las diferentes clases de tamaño.  $S_i = 25 \pm 1\%$



Anexo.3 Comportamiento de la sedimentación de las pulpas lateríticas al añadir 38% de las diferentes clases de tamaño. Si =25 + / - 1%



Anexo. 4 Comportamiento de la sedimentación de las pulpas lateríticas al añadir 44% de las diferentes clases de tamaño.  $S_i = 25 \pm 1\%$



Anexo. 5 Comportamiento de la sedimentación de las pulpas lateríticas al añadir 51% de las diferentes clases de tamaño.  $S_i = 25 \pm 1\%$

OPONENCIA A LA TESIS PARA LA OBTENCION DEL GRADO CIENTIFICO TECNICO.

La tesis titulada " MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE SEDIMENTACION DE LA PULPA CRUDA DE MINERAL LATERITICO DE LA EMP. CMDTE. PEDRO SOTTO ALBA " , del Ing. Pedro Beyris Mazar cumple su objetivo principal, en el cual se obtienen resultados interesantes y sugieren la aplicación a escala industrial de una metodología para la obtención de una materia prima de calidad.

En ella se resalta la actualidad del tema en los momentos en que se hace necesario el conocimiento del comportamiento de la materia prima, con el objetivo de aumentar la eficiencia en el proceso metalúrgico.

Dentro de la novedad del tema se señala que este se basa en una gran cantidad de trabajos técnicos que se han realizado hasta la fecha y que nunca antes se habían agrupado en uno solo, y sobre todo se hace una amplia caracterización mineralógica de las lateritas nuestras. Además se relacionan muy acertadamente los análisis químicos, físicos, mineralógicos, etc. Correlaciona parámetros que predicen el comportamiento de la materia prima para una eficiente toma de decisión en el proceso metalúrgico. Esto requiere de una gran cantidad de análisis químicos que actualmente no se realizan y que se proponen para la introducción del método.

En las conclusiones y recomendaciones de la tesis se argumenta muy claramente la hipótesis del mismo, así como, se puede apreciar un alto criterio científico.

Para la realización de este trabajo el pretendiente se apoyó en una buena cantidad de material bibliográfico, los cuales utilizó acertadamente.

Este tema por ser de actualidad se ha tocado en muchos trabajos técnicos, pero los resultados fundamentales de éste no han sido publicados ni presentados en eventos científicos.

Los resultados fundamentales contenidos en la tesis de grado corresponden con el resumen del mismo, por lo que valoramos la tesis de muy buena.

A mi criterio el trabajo es meritorio, así como la forma en que se ha tratado el tema, y el mismo cumple con los requisitos formales normados para la elaboración.

A modo de conclusión puedo decir que el aspirante es acreedor al grado científico que se valora.

Saludos,



**Ing. Daniel Sánchez Jacas**  
Especialista de Proceso  
ECPSA " Moa Nickel S.A."