

## RESEÑA

## TRATAMIENTO DE MINERALES DE NATURALEZA ARCILLOSA DEL YACIMIENTO NIQUELIFERO DE SAN FELIPE, MEDIANTE LA TECNOLOGÍA DE PREPARACIÓN DIRECTA DE PULPAS.

## REVIEW

## TREATMENT OF CLAY MINERALS FROM THE NICKELIFEROUS DEPOSIT OF SAN FELIPE, THROUGH THE TECHNOLOGY OF DIRECT PULP PREPARATION.

Emilio Montejo-Serrano <sup>(1)</sup>, José Castellanos-Suarez <sup>(1)</sup>, Rubén Alcalá-Fariñas <sup>(1)</sup>, Juan Estrada <sup>(1)</sup>

Los minerales oxidados de níquel del yacimiento de San Felipe, están conformados por una alta proporción de Esmectitas, las que le confieren una naturaleza arcillosa y provoca que sus pulpas presenten características reológicas muy desfavorables (viscosidad cinemática y esfuerzo cortante altos), para los procesos de trasiego (bombeo), muy bajas velocidades de sedimentación y muy baja densificación de las pulpas espesadas.

Estas propiedades negativas impedían la producción de pulpas de altos % de sólidos, lo que desfavorecía la eficiencia económica del proyecto al aplicar de la tecnología de Lixiviación Ácida a Presión (HPAL) al no lograrse obtener, por ninguna vía, pulpas cercanas al 30 % de sólido.

El CIPIMM desarrolló tres tecnologías para superar este problema y elevar sustancialmente el % de sólidos en las pulpas a lixiviación, que son:

- La preparación directa de pulpas mediante aditivos (Tecnología CIPIMM 2A). Este procedimiento aprovecha el efecto de algunos aditivos (sales inorgánicas) sobre el sistema agua-arcilla, mejorando el comportamiento de las pulpas. El empleo de este procedimiento permite elevar los % de sólidos en las pulpas productos hasta un 40 % y con buenas características reológicas.
- La preparación directa de pulpas mediante tratamiento térmico (Tecnología CIPIMM 2B). Se basa en la transformación térmica irreversible de las arcillas. Su empleo permite obtener directamente pulpas de 50 - 60 % de sólido, con excelentes características reológicas. Además como efecto colateral, se incrementa la ley de níquel entre un 10 – 15 %.
- La preparación directa de pulpas mediante tratamiento químico (Tecnología CIPIMM 2C). Este procedimiento se basa en la transformación química de las arcillas etc., para obtener directamente pulpas entre 43-45 % de sólidos equivalente, con excelentes características reológicas.

El empleo de una u otra tecnología depende de las características químicas y mineralógicas de los minerales a tratar, requiriendo de la ejecución de evaluaciones técnico económica actualizadas, para determinar cuál es la más conveniente aplicar, antes de pasar a pruebas de mayor escala.

**Palabras clave:** Preparación directa de pulpas, yacimiento niquelífero de San Felipe, porcentaje de sólido en las pulpas de lixiviación.

The oxidized nickel minerals from San Felipe deposit are formed by a high proportion of Smetites which give the clay nature of the pulp and give it very unfavorable rheological characteristics (cinematic viscosity and high shearing efforts) for the transportation processes (pumping), very low settling speeds and very low densifying thickness of pulps.

These negative properties avoided the production of pulps with high % solids, which was unfavorable for the economic efficiency of the Project when applying the Acid Pressure Leaching Technology (HPAL) because pulps close to 30% solids were unachievable by any way.

CIPIMM developed three technologies to overcome this problem and to substantially increase the % solids in pulp to be leached, which are:

- Direct preparation of pulps through additives (CIPIMM technology 2A). This proceeding takes advantage from the effect of some additives (inorganic salts) on the water-clay system) improving the pulps behavior. The use of this proceeding permits to increase the % solids in the final pulp to 40% with good rheological characteristics.
- The direct preparation of pulps through thermal treatment (Technology CIPIMM 2B). It is based on the irriversible thermal transformation of clays. Its use permits to obtain directly pulps with 50 – 60 % solids with excellent rheological characteristics. Besides, as a colateral effect, the nickel grade increases in 10 – 15%.

- The direct pulp preparation through chemical treatment (Technology CIPIMM 2C). This proceeding is based on the chemical transformation of clays, etc., to directly obtain an equivalent in pulps with 43- 45% solids, with excellent rheological characteristics.

The use of one technology or the other one depends on the chemical and mineralogical characteristics of the minerals to be treated, requiring the use of updated technical-economical evaluations to determine which one is the most convenient before higher scale tests.

**Keywords:** Direct preparation of pulps, nickeliferous deposit of San Felipe, % solids in pulp to be leached

---

**Recibido:** 14 de junio del 2012

**Aprobado en su forma original:** 2 de septiembre del 2013

(1) Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), Varona 12028 Km<sup>1/2</sup>  
Boyerros, La Habana, Cuba, CP-10800 Correo electrónico: [montejo@cipimm.minbas.cu](mailto:montejo@cipimm.minbas.cu)

## INTRODUCCIÓN

El yacimiento de minerales níquelíferos de “San Felipe” constituye una de nuestras grandes reservas de Ni y Co, con más de 300 millones de toneladas de mineral con leyes comerciales de níquel. Se encuentra ubicado en el municipio Sierra de Cubitas, en la región norte de la provincia de Camagüey.

Desde mediados de la década del 90 se viene estudiando geológica y tecnológicamente por compañías extranjeras que incluso formaron empresas mixtas con la parte cubana (San Felipe Mining S.A.) y donde el CIPIMM participó de forma destacada en las investigaciones tecnológicas, desarrollando procedimientos novedosos para su aprovechamiento, que la propia firma extranjera reconoció como decisivos para sacar el proyecto adelante (Liz y Zelenenko, 1999), (Liz y Zelenenko, 1999), (Herrera, 2001), (Montejo y otros, 2004), (Montejo y otros, 2001).

El primer gran problema a resolver fue que las pulpas crudas del yacimiento San Felipe, debido a la naturaleza arcillosa de sus minerales (alto contenido de nontronitas) (Cabrera, 2001) (García y otros) presentan características reológicas muy desfavorables, pues por los métodos tradicionales de preparación de pulpa cruda a 20 - 25 % de sólidos y posterior espesamiento, solo se lograban obtener pulpas de apenas 30 % de sólidos, lo cual desde el punto de vista económico incrementaba extraordinariamente la cantidad de autoclaves necesarias y por tanto los costos de inversión y operación, lo que hacían inviable el proyecto. Basado en lo anterior el CIPIMM desarrolló tratamientos propios para solucionar este problema, los cuales son novedosos a nivel mundial (Montejo y otros, 2000), (Montejo y otros, 2002), (Montejo y otros, 2006), (Montejo y otros, 2008). En este trabajo se describen los procedimientos desarrollados por el CIPIMM para mediante el tratamiento de los minerales arcillosos de este yacimiento, obtener por preparación directa,

pulpas de altos porcentos de sólidos, con características reológicas favorables (viscosidad cinemática y esfuerzo cortante bajos), que permitan su manipulación y trasiego para su lixiviación ácida a presión en autoclaves (HPAL). Los tratamientos desarrollados por el CIPIMM son los siguientes:

- La preparación directa de pulpas mediante aditivos (Tecnología CIPIMM 2A). Este procedimiento aprovecha el efecto de algunos aditivos (sales inorgánicas) sobre el sistema agua-arcilla, mejorando el comportamiento de las pulpas. El empleo de este procedimiento permite elevar los % de sólidos en las pulpas productos hasta un 40 % y con buenas características reológicas.
- La preparación directa de pulpas mediante tratamiento térmico (Tecnología CIPIMM 2B). Se basa en la transformación térmica irreversible de las arcillas. Su empleo permite obtener directamente pulpas de 50 - 60 % de sólido, con excelentes características reológicas. Además como efecto colateral, se incrementa la ley de níquel entre un 10 - 15 %.
- La preparación directa de pulpas mediante tratamiento químico (Tecnología CIPIMM 2C). Este procedimiento se basa en la transformación química de las arcillas etc., para obtener directamente pulpas entre 43-45 % de sólidos equivalente, con excelentes características reológicas.

## Fundamentación teórica de los procedimientos desarrollados.

La tecnología de lixiviación ácida a presión de los minerales oxidados de níquel se ha impuesto a nivel mundial desde su implementación industrial por primera vez en la planta níquelífera “Pedro Sotto Alba” ubicada en la zona de Moa en el norte oriental de Cuba, a principios de la década de los 60.

Los minerales a procesar por esta tecnología son lateritas, procedentes de las cortezas de intemperismo, caracterizadas por un alto grado

de alteración, donde el 85 % del material pasa por debajo de 0.045 mm (malla 325) y donde se concentra el níquel. No obstante presentar desde el punto de vista granulométrico, consistencia semejante a las arcillas, no lo son realmente, pues está constituida principalmente por Goethita, de ahí su característica limonítica. (García y otros), (Curso de Mineralogía, 1970), (Metalurgia extractiva de los minerales, 1974).

El proceso previo a la lixiviación ácida a presión consiste en preparar pulpas minerales con 20 – 25 % de sólidos y someterlas a beneficio, mediante clasificación a un punto de corte (0.84 – 1.00 mm), con vista a eliminar fracciones de bajo contenido de níquel y de alto contenido de Mg (concreciones de serpentinas). Posteriormente las pulpas clasificadas son enviadas a espesadores donde se densifican hasta 48 %, pasando al proceso de lixiviación a presión donde mediante bombas especiales se introducen en las autoclaves. Se requiere este alto contenido de sólidos, pues las pulpas son sometidas a calentamiento directo mediante vapor de agua, que les disminuye su densidad por condensación de dicho vapor. Un bajo % de sólido afecta significativamente la productividad de las autoclaves a presión, incrementando los gastos de inversión y de operación, afectando la economía del proceso.

Los minerales del yacimiento San Felipe a diferencia de los minerales de Moa, están constituidos por una gran cantidad de arcillas esmectíticas, principalmente Nontronitas, que es una Montmorillonita de hierro. Este tipo de arcilla además de presentar tamaños de partículas muy pequeñas como es característico de las arcillas, tienen la propiedad de absorber grandes cantidades de agua entre sus capas interlaminares (García y otros).

Cuando se comenzaron las investigaciones tecnológicas para el aprovechamiento de estos recursos por medio de la tecnología de lixiviación ácida a presión (HPAL), el primer gran problema a resolver era que no se

lograban, por los procesos anteriormente explicados para los minerales de Moa, pulpas de altos % de sólidos, en el mejor de los casos solo se lograban valores cercanos al 30 %, lo que hacía inviable el proyecto, al requerirse mayor volumen de autoclaves (equipos de altísimo costo de inversión) e incrementarse por tanto los gastos de operación al requerirse más gastos en calentamiento, bombeo, agitación, etc., debido a lo diluido de las pulpas que ingresaban a lixiviación. A esto se unen las características reológicas desfavorables que entorpecen las operaciones de trasiego y manipulación de las pulpas (Bingham Yield Stress > 100 Pa, que es la presión ó esfuerzo cortante que hay que ejercer sobre un fluido de Bingham, para que fluya).

Todo lo anterior es debido a las características de las arcillas esmectíticas de absorber agua en su estructura interlaminares, secuestrando agua del sistema líquido - sólido, por lo que en la práctica, hay menos agua real y por tanto el % de sólido del sistema es mucho más alto.

Por tanto era necesario actuar sobre la estructura de las arcillas esmectíticas presentes, de forma de disminuir o eliminar la capacidad de absorber agua interlaminares, de ahí los procesos novedosos desarrollados, como son:

#### **Preparación directa de pulpas mediante aditivos (conocida como: Tecnología CIPIMM 2A).**

Este proceso aprovecha el efecto de algunos aditivos sobre sistema agua-arcilla (García y otros), (Enciclopedia tecnológica, capítulo arcillas). En dependencia del catión interlaminares presente la capacidad de absorción varía. Cuando el catión interlaminares es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de absorción, si por el contrario, tienen Al, Ca o Mg como cationes de cambio, su capacidad de absorción será mucho más reducida, lo cual tiene como se explicó anteriormente un efecto positivo sobre la reología de las pulpas y su densificación.

Este catión interlaminar se puede sustituir aprovechando la capacidad de intercambio catiónico característico de las esmectitas.

- ✓ Preparación directa de pulpas mediante tratamiento térmico (conocida como: Tecnología CIPIMM 2B).
- ✓ Este proceso aprovecha las propiedades que tienen las arcillas de deshidratarse de forma irreversible a temperaturas moderadas (300 – 400 °C, para los minerales de San Felipe), destruyendo su estructura térmicamente, dejando por tanto de absorber agua (Enciclopedia de Tecnología Química. Kirk – Otmer (Capítulo Arcillas).
- ✓ Si el proceso de deshidratación se realiza y de forma inmediata se ejecuta el proceso de preparación de la pulpa y la lixiviación, gran parte del calor invertido en el tratamiento térmico se recupera en el calentamiento de la pulpa antes de la lixiviación, ahorrando vapor de calentamiento directo y por tanto la introducción de agua en esta etapa. La eliminación del agua de hidratación trae un efecto positivo colateral, el incremento de la ley de níquel y cobalto del mineral (Upgrade).
- ✓ Preparación directa de pulpas mediante tratamiento químico (Conocida como: Tecnología CIPIMM 2C).

El tratamiento mediante ácido sulfúrico concentrado a las esmectitas, produce la destrucción de la estructura del mineral (García y otros), eliminando por tanto la capacidad de absorción de agua. Adicionalmente la adición del ácido trae como

aspectos positivos colaterales la disolución de una parte del níquel y del cobalto durante la preparación de la pulpa. Como aspecto negativo están la protección anticorrosiva que requieren los equipos de esta etapa.

La aplicación de estos procedimientos tiene variantes y subvariantes, así como combinaciones entre ellas, que le proporcionan un amplio espectro para el tratamiento de minerales de características muy diversas.

## **MATERIALES Y MÉTODOS.**

### **Muestras empleadas.**

Todas las muestras empleadas en este trabajo son representativas de las menas presentes en el yacimiento “San Felipe”, extraídas a partir de proyectos de toma de muestras y recibidas en el CIPIMM con sus pasaportes correspondientes.

### **Preparación para la caracterización.**

Las muestras fueron preparadas siguiendo los procedimientos de homogenización y cuarteo en base a los tamaños de partículas máximas, empleándose los equipos siguientes:

- Triturador de quijada para tamaño máximo de partícula 25 – 30 mm.
- Idem para tamaño máximo de partícula 12 – 15 mm.
- Triturador DENVER de rodillos para tamaño máximo de partícula 6 mm.
- Molino de quijada (bajo 1 mm) - TM - ENG.
- Pulverizador de anillos - TM – ENG.

En la Figura 1. aparece el esquema de preparación para la caracterización química empleado.

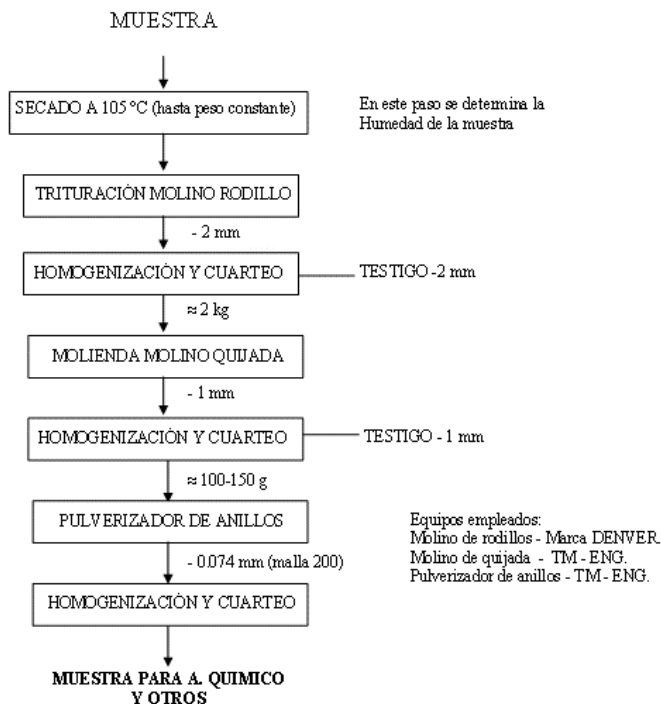


Figura 1. Esquema de preparación de muestras para el análisis químico.

**Caracterización de las muestras.**

**QUIMICA:** Los análisis se ejecutaron según los procedimientos establecidos del Departamento de Caracterización de Materiales del CIPIMM en base a las normas de empresa, cubanas e internacionales, empleándose los siguientes equipos:

- ✓ Para los análisis absorción atómica con llama (EAA), Equipo Modelo Avanta, de la firma GBC Australiana.

- ✓ Para los análisis multielementales por espectrometría de emisión por plasma inductivamente acoplado (ICP-AES), Equipo Spectroflame de la firma Spectro Analytical Instruments de Alemania.

En la Tabla 1 aparecen reflejados los resultados de la caracterización química.

Tabla1. Resultados promedios de la caracterización química de las muestras tecnológicas del yacimiento “San Felipe”.

CONTENIDO (%)									
Ni	Co	Fe	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CR	Mn	PPI	Hum.
1,45	0,057	21,51	43,66	5,44	3,04	1,01	0,40	13,26	37,32

**MINERALOGICA:** Para la determinación de la composición mineralógica de la muestras se empleó los resultados de la caracterización química y química por fracciones granulométricas de las muestras, el conteo mineralógico de las fracciones granulométricas

al microscopio binocular Hund Wetzlar. Mientras las fracciones finas se caracterizaron por difracción de Rayos X por medio de un equipo de difracción de rayos X para polvos marca Philips modelo PW 1710. Los resultados obtenidos aparecen en la tabla II.

**Tabla 2. Resultados promedios de la caracterización mineralógica de las muestras tecnológicas del yacimiento “San Felipe”.**

MINERAL	Contenido (%)	MINERAL	Contenido (%)
Biotita	0,23	Magnetita	7,01
Cromita	1,96	Moscovita	0,25
Concreciones de Fe.	0,87	Esmectitas	<b>47,14</b>
Clorita	2,72	Oxidos de Manganeso	1,15
SiO2 libre*	14,30	Serpentina***	10,94
Limonita**	13,33		
<b>Total</b>			<b>99,89</b>

\* Ópalo y otros minerales amorfos.

\*\* Agregados blandos de óxidos amorfos, hematita y goethita.

\*\*\* La serpentina aparece alterada, con la formación de finas vetillas y nidos de nontronita y clorita

### Pruebas de Sedimentación.

Las pruebas se ejecutaron según la norma ramal NRIB- 579 [15], que se basa en los métodos experimentales internacionalmente empleados desarrollados por Coe and Clevenger, donde a partir de datos experimentales obtenidos en laboratorio con probetas de 1 L, se calculan y diseñan sedimentadores industriales.

### Preparación de pulpas.

Para la preparación de pulpas se empleó un esquema estándar, el cual se somete a variaciones de parámetros en dependencia de las características del mineral y teniendo en cuenta el beneficio por clasificación con vista a eliminar impurezas perjudiciales al proceso (fundamentalmente serpentinas con alto contenido de magnesio).

Para la determinación de las propiedades reológicas de las pulpas se empleó fundamentalmente un viscosímetro de plato, cuya curva de calibración se obtuvo a partir de

determinaciones del Bingham Yield Stress por medio de un viscosímetro de cilindros Rheotest, modelo BRV-1 de procedencia RDA, a pulpas del yacimiento “San Felipe” de diferentes viscosidades.

Los equipos empleados en la preparación de pulpas fueron los siguientes:

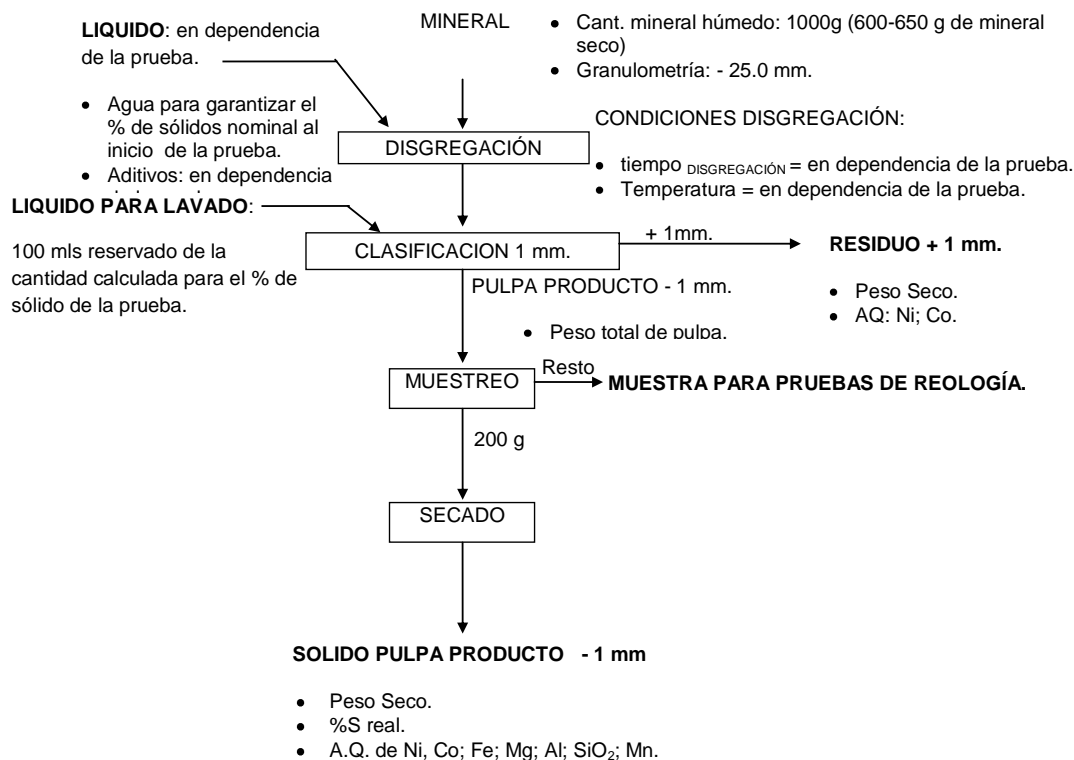
- **Sistema motriz de rodillos de velocidad variable y con sistema de calentamiento**
- **Molino de bolas de laboratorio.** Características: Largo - 230 mm; Diámetro - 210 mm. **Carga de bolas:** -(10 bolas acero de diámetro-38 mm Peso-2400 g) + (9 bolas de acero de diámetro-30 mm Peso-1287 g ) Peso Total - 3687 g. Relación peso de bola / peso seco mineral  $\square$  6.044
- **Molino de barras.** Características: Largo - 230 mm; Diámetro - 210 mm. **Barras:** Largo - 205 mm; Diámetro – 29 mm. Carga de barras variable.
- **Equipo ROT TAP para la clasificación mediante tamices.**

El conjunto de estos equipos aparece en la figura 2.



**Figura 2. Sistema de laboratorio para preparación de pulpas de alto % de sólidos.**

El esquema estándar empleado para la preparación de pulpas de alto % de sólidos se describe en la figura 3.



**Nota:** En caso de no existir rechazo (molienda al 100 % bajo 1 mm), el esquema se simplifica, pues se elimina la clasificación del punto de corte y la remolienda.

La disgregación se puede hacer en tres variantes:

- Sin elementos de molienda, se le adapta un sistema de elevadores de paletas (simula un tambor de disgregación).
- Con bolas de acero.
- Con barras de acero.

**Figura 3. Procedimiento estándar de preparación de pulpas.**

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### Sedimentación de pulpas crudas.

Se realizaron pruebas de sedimentación de pulpas crudas, simulando la forma en que se trabaja en la tecnología convencional en la empresa niquelífera Pedro Sotto Alba, donde se preparan con un % de sólido entre 20 – 25 % para después ser clasificadas a 1 mm, con vista a eliminar impurezas perjudiciales a la

lixiviación y posterior espesamiento en sedimentadores. Se emplearon dos tipos de muestras tecnológicas del yacimiento San Felipe (una de bajo y otra de medio magnesio), ejecutándose pruebas de sedimentación en base a la norma ramal NRIB-579

En la tabla 3 aparecen las condiciones de trabajo y los resultados de las pruebas de preparación de las pulpas para realizar el estudio de sedimentación.

**Tabla 3. Condiciones de trabajo y resultados de las pruebas de preparación de pulpas.**

Condiciones trabajo:

- Cantidad muestra: 1000 g
- Humedad:
  - Muestra Bajo Mg: 33.00 %.
  - Muestra Medio Mg: 37.20 %
- % Sólido nominal: 25 %.
- Temp. desagregación: ambiente.
- Rpm molino: 35
- Tiempo clasif.: 5 min.
- Punto de corte: 1 mm.
- Tiempo molienda: 5 min.
- Cantidad Barras: 9 (15.7g/g mineral)

Muestras	Pulpa Producto			
	% Sólido real	Rend. en peso de sólido. (%)	Recuperación (%)	
			Ni.	Mg
Bajo Mg	23.7	93.9	95.0	93.4
Medio Mg	24.1	93.5	94.3	92.1

Las muestras aunque responden bien al proceso de preparación de pulpa al 20 – 25 %, con buenos resultados en la recuperación de níquel en la pulpa producto, no responden al proceso de sedimentación y los resultados del estudio indican que las pulpas después de 72 horas de sometidas al proceso de espesamiento, solo alcanzan un 28.69 % de sólidos para la muestra de bajo Mg y de 30.46 % para la de Medio Mg. Este comportamiento se debe a las características arcillosas de las menas de San Felipe, con casi un 50 % de esmectitas, donde una parte significativa del agua esta “secuestrada” en las capas interlaminares de la arcilla, lo que trae como consecuencia menos agua real disponible en el sistema líquido sólido que impiden un mayor espesamiento, además de un empeoramiento de las características reológicas de las pulpas resultantes.

Estos resultados confirman la imposibilidad de emplear la tecnología convencional de preparación de pulpas de 20 – 25 % y posterior sedimentación, pues se está muy alejado de alcanzar los % de sólidos requeridos (40 – 48 % S), para hacer eficiente el proceso de lixiviación a presión (HPAL). Por tanto es necesario el empleo de una tecnología diferente a la empleada en la actualidad, al no

ser posible espesar las pulpas por los métodos tradicionales.

### Preparación directa de pulpas crudas.

Estas pruebas tenían como objetivo preparar pulpas al máximo % de sólidos que permitiera efectuar el beneficio por clasificación. Las pruebas se ejecutaron por el esquema de la figura 3, empleando el molino como tambor desagregador,

Las condiciones de trabajo y resultados aparecen en la Tabla 4.

**Tabla 4. Condiciones de trabajo y resultados de la preparación de la pulpa al máximo % de sólidos.**

- ✓ Cantidad muestra: 1000 g
- ✓ Humedad: 36 %
- ✓ % Sólido nominal: máximo.
- ✓ Temp. desagregación: ambiente.
- ✓ Rpm molino: 35
- ✓ Tiempo desagregación: 1.0 hora.
- ✓ Punto de corte: 1 mm.

Muestras	Pulpa Producto			
	% Sólido real	Rend. en peso de sólido.	Recuperación (%)	
		(%)	Ni.	Co
Composito	28,5	94,8	97.1	97,8

Como se observa, los % de sólidos final de pulpa producto difieren sustancialmente de los requeridos para el proceso de HPAL y son similares a los alcanzados en el proceso anterior. Las causas que provocan el mal comportamiento de estas pulpas son los mismos a los explicados en el inciso 4.1.

actúa sobre el catión de la capa interlamina de las esmectitas, disminuyendo su capacidad de absorción de agua y por tanto existe más agua real en el sistema líquido – sólido, mejorando la reología de las pulpas y permitiendo alcanzar por tanto % de sólidos más altos en las operaciones de desagregación y beneficio de las pulpas que se envíen a HPAL.

**Preparación directa de pulpas de altos % de sólidos mediante el empleo de aditivos.**

Esta tecnología novedosa desarrollada por el CIPIMM [17], conocida como CIPIMM 2A,

En la tabla V aparecen las condiciones de trabajo y los resultados promedios de las pruebas por esta tecnología ejecutadas durante los años 2003 y 2008.

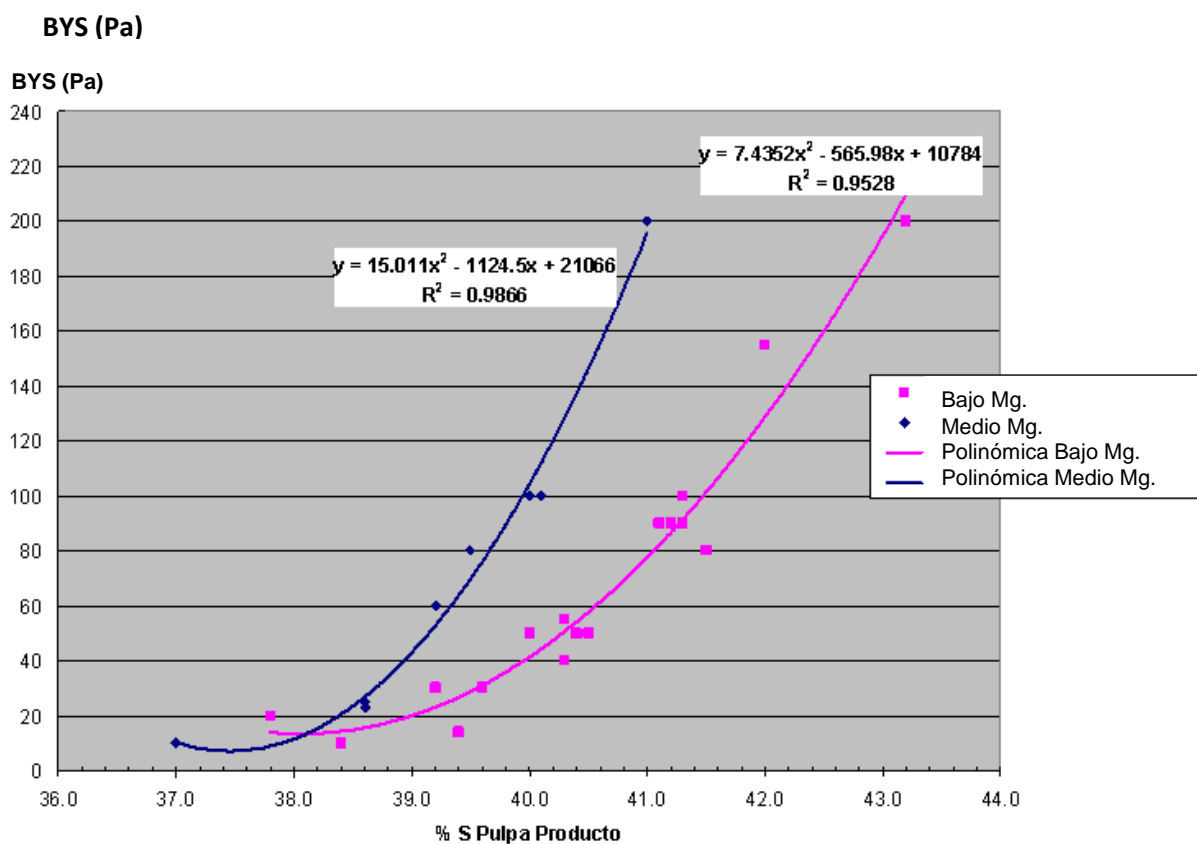
**Tabla 5. Condiciones de trabajo y resultados de la preparación directa de pulpas mediante aditivos.**

- ✓ Cantidad muestra: 1000 g
- ✓ Humedad: 36 %
- ✓ % Sólido nominal: máximo.
- ✓ Aditivos:
  - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O: 3,0 Kg/t min. seco.
  - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 4,2 Kg/t min. seco
- ✓ Temp. desagregación: 80 – 90 °C.
- ✓ Rpm molino: 35
- ✓ Tiempo Clasificación: 5 min.
- ✓ Punto de corte: 1 mm.
- ✓ Tiempo molienda: 3,5 min.
- ✓ Cantidad Barras: 11 (18,0 g/g mineral)

Muestras	Pulpa Producto					
	% Sólido real	Rend. en peso de sólido.	Recuperación (%)		Reología	
		(%)	Ni.	Mg	Temp. (°C)	BYS (Pa)
Bajo Mg	40,9	97,0	97,8	97,3	57	80
Medio Mg	40,0	96,7	96,9	96,2	57	90

**BYS:** Bingham Yield Stress. Presión (esfuerzo cortante) que hay que ejercer sobre un fluido de Bingham para que fluya.

En la figura 4 se plotea la correlación existente entre el % de sólido de la pulpa preparada por este procedimiento y el BYS.



**Figura 4. Correlación entre el Bingham Yield Stress y el % de Sólido de la Pulpa Producto.**

Los resultados alcanzados demuestran el efecto que tienen los aditivos sobre la absorción de agua de las esmectitas, incrementando el % de sólidos en las pulpas de estos minerales en más de un 10 %

respecto a las pulpas preparadas por la tecnología convencional.

Como se puede observar de la figura 3 por debajo de 100 Pa de Bingham Yield Stress se pueden preparar pulpas de 41,5 % de sólido

para las muestras de Bajo Mg, mientras que para las de Medio Mg, se encuentran cercana a los 40.0 % de sólido.

**Preparación directa de pulpas de altos % de sólidos mediante el tratamiento térmico.**

Esta tecnología novedosa desarrollada por el CIPIMM, conocida como CIPIMM 2B, provoca la deshidratación irreversible de la arcilla, destruyendo su estructura y eliminando la absorción de agua de la capa interlaminar.

Los estudios de deshidratación de los minerales de San Felipe se realizaron en

condiciones batch en botellas y demostraron que el proceso es irreversible a partir de temperaturas de 350 °C y que los tiempos de tratamiento óptimos disminuyen a medida que se incrementa la temperatura. Las condiciones para el proceso de deshidratación son:

- Temperatura de deshidratación: 350 – 450 °C
- Tiempo de tratamiento: 0,2 – 1,5 h.

La preparación de la pulpa se realizó por el procedimiento estándar y en la tabla VI aparecen las condiciones de trabajo y los resultados promedios de las pruebas por esta tecnología.

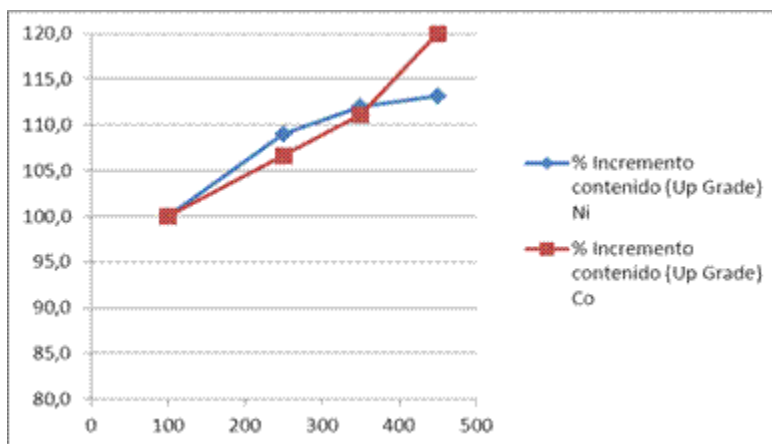
**Tabla 6. Condiciones de trabajo y resultados de la preparación directa de pulpas mediante aditivos.**

- Cantidad muestra: 1000 g
- % Sólido nominal: 50 - 60.
- Líquido: Agua.
- Temp. desagregación: ambiente
- Rpm molino: 35.
- Tiempo Clasificación: 5 min.
- Punto de corte: 1 mm.
- Tiempo molienda: 10 - 40 min.
- Cantidad Barras: 11 (18,0 g/g mineral)

Muestras	Pulpa Producto					
	% Sólido real	Rend. en peso de sólido.	Recuperación (%)		Reología	
		(%)	Ni.	Mg	Temp. (°C)	BYS (Pa)
Bajo y Medio Magnesio	50 - 60	99,0	99,1	99,0	Ambiente	Max. 40

Adicional al magnífico comportamiento de las pulpas tratadas térmicamente, se obtienen por el efecto de la deshidratación irreversible (perdida del agua de constitución), un incremento de la ley de cabeza. Este incremento de la ley de cabeza incluye al Mg

presente en el mineral, por lo que debe tenerse en cuenta por los efectos nocivos que puede provocar en el proceso de Lixiviación a Presión. En la figura 5 se aprecia este efecto en dependencia de la temperatura de deshidratación.



**Figura 5. Incremento en la ley de cabeza de los minerales del yacimiento San Felipe por efecto de la temperatura de deshidratación.**

Otro aspecto positivo de alcanzar tan altos % de sólidos las pulpas tratadas por esta tecnología y con magnificas características reológicas, es que permite la mezcla con pulpas de minerales naturales (sin tratar) o tratados por otros procedimientos, obteniéndose pulpas de más de 46 % de sólidos cuando se mezclan en proporciones de 40 – 50 %, disminuyendo en igual proporción la cantidad de mineral a someter a tratamiento

térmico, con el consiguiente ahorro en gastos de inversión y de operación. En la tabla VII se puede apreciar este comportamiento. En caso de existir limitaciones por el contenido de magnesio de los minerales durante el proceso de lixiviación a presión, se ajusta el % de sólidos a dichos requerimientos, disminuyendo ó aumentando el % de mineral a tratar térmicamente.

**Tabla 7. Comportamiento de las mezclas de pulpas.**

Prueba	Tipo de tratamiento	% Solido Real en la Pulpa Producto.	Proporción de mineral tratado con Aditivo/Termica. (%)	YIELD STRESS (Pa)	
				Temp. amb.	Temp. 70°C
A	Con aditivos (TECN. CIPIMM 2A)	36.8	42,1	130	60
	Con Térmico (TECN. CIPIMM 2B)	60.8	57,9	50	----
	Mezcla	47.9	100,0	70	60
B	Con aditivos (TECN. CIPIMM 2A)	36.8	49,0	130	60
	Con Térmico (TECN. CIPIMM 2B)	60.8	51,0	50	----
	Mezcla	47.9	100,0	110	80

También es importante resaltar que si la operación de lixiviación ácida a presión (HPAL) se realiza inmediatamente al proceso de deshidratación y preparación de la pulpa, gran parte de la energía empleada en la deshidratación, se aprovecha, pues es necesaria menos energía para el calentamiento de las pulpas en el proceso de HPAL.

Finalmente se puede comentar que el empleo de esta tecnología garantiza un incremento del % de sólido respecto a la tecnología convencional, superior al 20 %, con magníficas propiedades reológicas de las pulpas.

### **Preparación directa de pulpas de altos % de sólidos mediante el tratamiento químico.**

En esta tecnología innovadora, también se logra la destrucción de la estructura de las esmectitas presentes en los minerales del yacimiento "San Felipe" y que son la causa de las malas propiedades reológicas de sus

pulpas, mediante el ataque químico con ácido sulfúrico concentrado

En el proceso de adición de ácido sulfúrico concentrado al mineral húmedo se desprende una gran cantidad de calor, asociado al calor de disolución de dicho ácido, lo que eleva la temperatura hasta 70 °C. Se supone que el mineral curado al almacenarse en pilas hasta su procesamiento mantiene ese nivel de temperatura ó disminuye muy lentamente, pues se comporta como un sistema casi adiabático (con pérdidas mínimas de calor).

Con vista a simular lo anterior el mineral después de añadido el ácido se pone en una estufa a 60 °C, durante 4 horas, sometiéndose posteriormente al proceso de preparación de pulpas. La cantidad de ácido se fijó en 250 Kg/t de mineral seco alimentado, basado en la experiencia en el trabajo con esta tecnología. El mineral mezclado con ácido se somete a la preparación de pulpas por el esquema estándar de la figura 3. En la tabla VIII aparecen reflejadas los parámetros fundamentales de trabajo y los resultados de la preparación de pulpas.

**Tabla 8. Condiciones de trabajo y resultados de la preparación directa de pulpas mediante tratamiento químico.**

- Cantidad muestra inicial: 1000 g
- Humedad:
  - Bajo Mg: 39 %
  - Compósito: 37 %
- % Sólido nominal: 50 %.
- Líquido: Agua.
- Temp. desagregación: ambiente.
- Rpm molino: 35
- Tiempo Clasificación: 5 min.
- Punto de corte: 1 mm.
- Tiempo molienda: 15 min.
- Carga de Bolas: ( 10 bolas acero de diametro-38 mm Peso-2400 g) + ( 9 bolas de acero de diametro-30 mm Peso-1287 g ) Peso Total - 3687 g (5,8 – 6,0 g bolas/g mineral seco)

Muestras	Pulpa Producto						
	% Sólido		Rend. en peso de sólido [3] (%)	Recuperación (%)		Reología	
	Equivalente [1]	Real [2]		Ni.	Co	Temp. (°C)	BYS (Pa)
Bajo Magnesio	45,0	31,7	92,1	93,0	82,1	Ambiente	47,5
Medio Mg	44.0	32,5	99,3			Ambiente	60,0
Compósito	45.0	31,9	97,9	97,4	94,7	Ambiente	80,0

[1] El % de sólido nominal de las pulpas es el correspondiente al sólido inicial y al agua añadida, sin tener en cuenta el ácido añadido, ni los procesos de disolución y reacciones químicas. Es equivalente a los % de sólidos de las metodologías anteriores y se emplea para poder compararlos.

[2] El % de sólido de la pulpa final es el real, y tiene en cuenta los procesos de disolución y reacciones químicas que se producen y se obtiene por filtración y lavado de la pulpa resultante.

[3] El Rendimiento en peso está calculado respecto al sólido inicial y al peso real de residuo + 1 mm obtenido.

Como puede observarse la reología de las pulpas mejora considerablemente al emplear la tecnología CIPIMM 2C, obteniéndose pulpas de 43-45 % de sólido equivalente, referido a como se calcula este parámetro en las pulpas de preparaciones anteriores (sin ácido). Esto se debe a que el ácido concentrado, además de deshidratar la arcilla, disuelve una parte importante del sólido inicial, entre un 18 -22 %. Esto se ve reflejado en el % de sólido real de las pulpas que oscilan entre 30.5 - 31.5 %, debido al sólido que pasó a la fase líquida.

En la fase de preparación de pulpas, las pérdidas de níquel y cobalto son mínimas, tal como se aprecia en la tabla 8, estando asociadas al rendimiento en peso del residuo + 1 mm.

Otro aspecto interesante es que en la preparación de las pulpas del 50 – 60 % del

níquel y más del 65 % del cobalto pasa a solución en esta etapa, neutralizando una parte importante del Mg presente.

El empleo de esta tecnología garantiza un incremento del % de sólido respecto a la tecnología convencional, superior al 20 %, con magnificas propiedades reológicas de las pulpas.

Un aspecto desfavorable de esta tecnología es la alta corrosividad de las pulpas resultantes y la necesidad de medidas especiales de seguridad industrial, lo que requiere de materiales especiales que encarecen los gastos de inversión y de mantenimiento.

**CONCLUSIONES.**

1. Las menas del yacimiento de minerales oxidados de níquel de “San Felipe” presentan cantidades considerables de arcillas tipo esmectitas las cuales les confieren propiedades muy desfavorables a sus pulpas desde el punto de vista reológico, entorpeciendo los procesos de preparación, clasificación, sedimentación y trasiego.
2. Por los métodos convencionales de preparación y beneficio de las pulpas solo se obtienen % de sólidos menores de 30 % de las pulpas a lixiviación, lo que disminuye de forma substancial la productividad de las autoclaves del proceso de lixiviación ácida a presión (HPAL), lo cual hace inviable el proyecto, por los incrementos de los costos de inversión y de operación.

3. El empleo de la tecnología CIPIMM 2A de preparación directa de pulpas de alto % de sólidos mediante el empleo de aditivos, disminuye la absorción de agua de las arcillas esmectíticas y mejoran por tanto el comportamiento de sus pulpas alcanzándose más de 40 % de sólidos con buenas propiedades reológicas, que permiten las operaciones de preparación, clasificación y trasiego.
4. El empleo de la tecnología CIPIMM 2B de preparación directa de pulpas de alto % de sólidos mediante el tratamiento térmico, destruye las estructuras de las esmectitas, eliminando la absorción de agua en sus capas interlaminares, mejorando considerablemente el comportamiento de sus pulpas, alcanzándose más de 50 % de sólidos, con excelentes propiedades reológicas que permiten las operaciones de preparación, clasificación y trasiego, las mezclas con pulpas de peores características reológicas y se logra mediante el efecto de la deshidratación un incremento notable de la ley de cabeza del mineral que entra a proceso, de hasta un 15 % para el níquel y de hasta un 20 % para el cobalto.
5. El empleo de la tecnología CIPIMM 2C de preparación directa de pulpas de alto % de sólidos mediante el tratamiento químico con ácido sulfúrico, también actúa sobre la estructura esmectitas presentes en las menas del yacimiento destruyéndola y mejorando el comportamiento de sus pulpas alcanzándose % de sólidos entre 43 y 45 %, con buenas propiedades reológicas que permiten las operaciones de preparación, clasificación y trasiego. Una parte importante de los valores de níquel y cobalto presentes se disuelven en la etapa de preparación de pulpas.

## RECOMENDACIONES.

1. Ejecutar estudios económicos que permitan determinar las tecnologías más convenientes a aplicar a este yacimiento.

2. En base a los resultados anteriores, continuar los estudios en escala ampliada de las tecnologías de más perspectivas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Castellanos, José; Montejo, Emilio y Otros. Procedimiento para aumentar el % de sólidos de minerales limoníticos y arcillosos en pulpas de alimentación a las autoclaves en el proceso de lixiviación ácida. Certificado de autor de invención No. 23430. Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). La Habana, Agosto 2009.
- Curso de Mineralogía. Betejtin, A. Editorial Mir. Moscú, 1970. Segunda Edición.
- Enciclopedia de Tecnología Química. Kirk – Otmer (Capítulo Arcillas).
- García E; Suárez M. Las Arcillas: Propiedades y Usos. Página Web - [www.uclm.es](http://www.uclm.es)
- Herrera V. Agosto 2001. Resumen de los resultados de la prueba Piloto en Lakefield Orestest, Australia. CIPIMM
- Ileana Cabrera y Otros. 2001. Caracterización Mineralógica de una muestra de San Felipe IV. CIPIMM.
- Liz, M.; Zelenenko, V. y otros. 1999. Informe Final de Caracterización y Preparación de Pulpas, Muestra Tecnológicas SF-I. CIPIMM.
- Liz, M.; Zelenenko, V. y otros. 1999. Item 1 Beneficio. Caracterización y Preparación de Pulpas de 3 Muestras Litológicas: B4/B5; B6; M5/M6 y Compósito (SF-II). CIPIMM. Septiembre 2000.
- Metalurgia extractiva de los minerales oxidados de níquel. Colectivo de autores del Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM). Instituto cubanos del libro, La Habana, 1974. Artículo: Carlson, E.T. y Simons, C.S. Lixiviación a presión de lateritas niquelíferas con ácido sulfúrico. Página 117 - 122.
- Montejo E.; J. Castellanos y Otros. Enero 2004. Estudio del comportamiento de una muestra compósito (SF-6) de los minerales del yacimiento San Felipe a la tecnología CIPIMM 1A. CIPIMM.
- Montejo E y Otros. 2001. Muestra Tecnológica San Felipe IV. Caracterización y Preparación de Pulpas. CIPIMM.
- Montejo E. y Otros. Mayo 2000. Estudio de preparación de pulpas de alta densidad por Tecnologías CIPIMM.

Montejo E; Dr. José Castellanos y Otros. Junio 2002. Estudio del Comportamiento de los Minerales del Yacimiento San Felipe a La Tecnología CIPIMM 3. CIPIMM.

Montejo E; Dr. José Castellanos y Otros. Diciembre 2006. Tecnologías para el Aprovechamiento de Minerales de Naturaleza Arcillosa. Proceedings Evento PROCEMIN 2006. Santiago de Chile, Chile.

Montejo E. y otros. Agosto 2008. Resultados preliminares de las pruebas de preparación de pulpas con muestras del yacimiento "San Felipe" CIPIMM.

Montejo, Emilio; Herrera, Ventura; Alfonso, Esteban; y Otros. Reporte Técnico Parcial. Etapa 1. Investigación Tecnológica Aprovechamiento Minerales "San Felipe". CIPIMM. Diciembre 2008.

Montejo, Emilio; Alcalá, Rubén y Romero, Juan. Procedimiento para la preparación de pulpas de minerales oxidados de níquel con alto contenido de arcillas. Certificado de autor de invención No 23676. Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). La Habana, Abril 2011.

Norma Ramal. Enero 1984. Prueba de Sedimentación. NRIB 579.