

Características principales de pastas minerales de relaves de manganeso preparadas en espesador de escala de laboratorio

MAIN CHARACTERISTICS OF MINERAL MANGANESE TAILINGS PASTES THICKENER PREPARED IN LABORATORY SCALE

R. H. Olcay Barreda*, G. E. Sales Valadão**, C. A. Hernández Osorio***

RECIBIDO: 03/07/2014 – APROBADO: 23/07/2014

RESUMEN

La disposición de relaves en forma de pasta mineral presenta una serie de ventajas, entre las cuales se pueden destacar las de índole ambiental, social, operacional y técnica. Esta alternativa de disposición de los relaves es una tecnología que se ha desarrollado rápidamente destacando el sector de fabricantes de equipos de espesamiento y transporte.

El principal objetivo de este trabajo fue evaluar la producción de suspensiones concentradas conocidas como pastas minerales de relaves provenientes de procesos de beneficio de manganeso obtenidas mediante un espesador de pasta en escala de laboratorio. El estudio incluye la caracterización de la muestra sólida, evaluación de floculantes (tipo y dosificación), uso de un equipo productor de pasta de escala de laboratorio con una capacidad útil de 7 litros para la formación de pasta mineral a través de alimentación continua de pulpa, evaluación de influencia sobre la concentración de sólidos con el uso del generador de floculos (RGF), características de las pastas minerales producidas como % de abatimiento o slump, ángulo de reposo o flume, perfil de concentración de sólidos en el espesador, viscosidad aparente y esfuerzo de fluencia.

En relación a la composición química se obtuvo que los elementos predominantes son: Mn, Fe, Si y Al con una distribución granulométrica muy fina, representada por un d50 equivalente a 4,63µm.

El floculante no iónico fue el que mostró mejor desempeño en sedimentación mientras que en los ensayos con recirculación de pulpa y adición de floculante, la mejor condición fue alcanzada para una recirculación de la zona más baja y máxima capa de compresión (4 para 1) obteniéndose un valor de 53,7% de sólidos en peso. En los ensayos continuos con duración total de 180 minutos, el mayor valor del % de sólidos alcanzado con una alimentación de pulpa en flujo lineal fue de 52,7% para una dosis de 50 gpt de floculante. En los ensayos con alimentación curvilínea utilizando el RGF se obtuvo un valor de 55,5% de sólidos en peso; se verificó por medio del perfil de concentración de la zona de compresión que existe una etapa de transición de pulpa de alta densidad a pasta mineral en el rango de 40 a 45% de sólidos en peso. El relave de manganeso forma pasta mineral entre 47 y 56% de sólidos en peso. Fueron alcanzados ángulos de reposo en las pastas minerales superiores a los 8°. El comportamiento reológico de la totalidad de las pastas ensayadas presentó un carácter mixto: tixotrópico y reotrópico. El esfuerzo de cedencia alcanzó valores próximos a los 100Pa para 56% de sólidos en peso en la pasta mineral producida utilizando las mejores condiciones de operación encontradas en este estudio.

Palabras clave: Pasta mineral, relaves de manganeso, espesador, reología.

* Departamento de Procesos Minerales, Vale Fertilizantes, Unidad Mineroquímica de Tapira, Rodovia MGC/146 Km 196,5, Minas Gerais, Brasil.
E-mail: ruben.barreda@velefert.com

** Escola de Engenharia-Bloco II - Sala 4134, Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Pampulha, 31270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
E-mail: gvaladao@demin.ufmg.br

*** Carrera de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Arturo Prat - UNAP, Av. Arturo Prat N°2120, Iquique - Chile.
E-mail: chernand@unap.cl

I. INTRODUCCIÓN

El concepto de pasta mineral corresponde a un sistema coloidal que se presenta como un fluido homogéneo en el que se tiene una muy baja segregación de partículas sólidas y que al ser dispuesto sobre una superficie estable no presenta un drenaje significativo de agua (Araujo et al., 2003; Jewell 2002).

La disposición de relaves en forma de pasta mineral presenta algunas ventajas en comparación al uso de tranques de relaves, por ejemplo: un requerimiento de área menor para la disposición, mayor recuperación de agua, una disposición más estable y segura, mayor facilidad en la recuperación final del área utilizada, entre otras. Las características de las pastas permiten obtener mayores ángulos de disposición lo que puede significar importantes ganancias en términos de volumen de relave dispuesto en comparación a los tranques de relaves convencionales. (Araujo et al., 2003)

Normalmente la producción de pasta es realizada empleando espesadores de características especiales, espesadores de pasta, que representan en la mayoría de las veces la mejor alternativa tecnológica. Las aplicaciones de pasta mineral en el mundo son muy diversas de acuerdo al trabajo de Houman et Jhonson (2003), sin embargo, la tecnología utilizada se encuentra aún restringida a los fabricantes de equipamientos. Los espesadores especialmente desarrollados para laboratorio pueden auxiliar a la mejor comprensión de los mecanismos involucrados en la obtención de pasta mineral. Barreda (2012) utilizando un espesador de pasta modular desarrollado para operación en escala de laboratorio, verificó la posibilidad de simular diferentes condiciones de espesamiento, en presencia de distintos tipos de floculantes para la obtención de pasta mineral.

La agregación de partículas suspendidas en un medio líquido se debe principalmente a dos condiciones fenomenológicas físico-químicas e hidrodinámicas (Rubio et al., 2007). Las condiciones físico-químicas están relacionadas al tipo y dosis de reactivos agregantes (floculantes y/o coagulantes), temperatura, pH y partícula (carga superficial, densidad). Las hidrodinámicas dependen tanto de la geometría de la unidad de agregación así como de la intensidad de la mezcla (tasa o flujo de alimentación). Varios trabajos han evaluado las características de formación de flóculos empleando tuberías curvas utilizando materiales como: látex (Gregory, 1981; Gregory, 1987), bentonita (Elmaleh y Jabbouri, 1991), y $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Carissimi y Rubio, 2007). El flujo en tuberías curvas difiere considerablemente en relación al obtenido en tuberías lineales. Por ejemplo, en tuberías espirales, existe un movimiento o flujo secundario que es inducido por el desequilibrio entre el cruzamiento de las corrientes del gradiente de presión y de las fuerzas centrífugas generadas por la curvatura. Existen muchas aplicaciones industriales involucrando intensas tasas de mezclas y fuerzas centrífugas en el tratamiento de aguas residuales (Parekh y Miller, 1999; Rosa y Rubio, 2005).

Landriault (2002) muestra en la Figura 1 un gráfico esquemático del esfuerzo de cedencia en función de la concentración de sólidos de la mezcla sólido-líquido en la que se observan distintos estados de consistencia posibles: pulpa, pulpa de alta densidad, pasta y torta. También se indican algunos equipamientos utilizados en las tareas de desaguamiento, bombeo y filtración de esas mezclas de sólido-líquido, los regímenes y velocidades de flujo posibles y las características de segregación de las partículas sólidas.

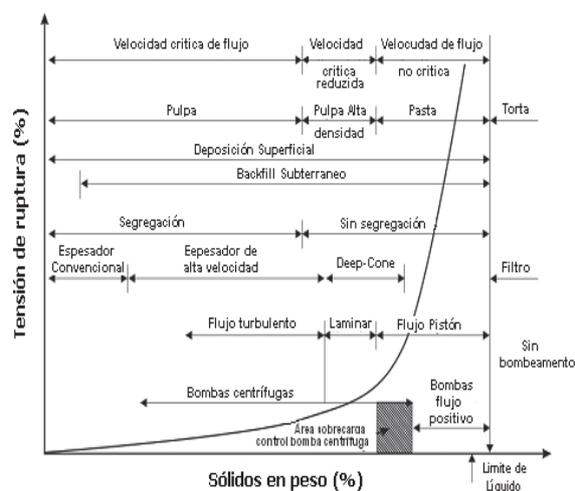


Figura N.º 1. Mezclas sólido/líquido: pulpa, pulpa de alta densidad, pasta y torta, con sus respectivos equipamientos de obtención y transporte. (Landriault, 2002).

En la actualidad la producción de pasta mineral está ganando cada vez más adeptos en diversos países del mundo tales como: Estados Unidos, Australia, Perú, Chile entre otros. Para el caso de regiones áridas el foco principal es el máximo reaprovechamiento de los recursos hídricos velando por el desarrollo sustentable que posicionan la producción de pasta mineral como una alternativa muy atractiva para la disposición de los relaves.

El presente trabajo tiene por objetivos utilizando una muestra de relave de manganeso, la obtención de pasta mineral a través de la operación de un espesador de pasta de laboratorio y caracterizar sus principales propiedades.

II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Muestras minerales

Las muestras minerales utilizadas representan relaves provenientes del procesamiento de menas-minerales de manganeso de la mina Urucum en Brasil. La Tabla I muestra las diferentes técnicas y equipamientos utilizados para la determinación de las características físicas y químicas del material sólido.

Tabla N.º 1. Técnicas y equipamientos utilizados en la determinación de las características físico/químicas de la muestra mineral.

Propiedad	Técnica utilizada	Equipamiento requerido
Densidad	Picnometría simple y gas (PS/PG).	Picnómetro simple y de gas.
Granulometría	Clasificación centrífuga. Difracción de láser.	Cyclosizer. Analizador de partículas Cilás.
Composición química	Fluorescencia de Rayos X (FRX). Microscopía electrónica (EDS).	Espectrómetro de Rayos X dispersivo. Microsonda electrónica.
Composición mineralógica	Difracción de Rayos X (DRX). Microscopía electrónica de barrido (SEM)	Espectrómetro de rayos X. Microscopio electrónico de barrido (SEM).
Área superficial específica	Adsorción de nitrógeno (BET). Permeabilidad al aire.	Sistema de adsorción BET. Aparato de Blaine.

Para la caracterización de las pastas minerales fueron empleadas las técnicas y equipamientos indicados en la Tabla N.º 2.

Tabla N.º 2. Técnicas y equipamientos para determinación de las propiedades de pasta mineral.

Propiedad	Técnica utilizada	Equipamiento requerido
Consistencia de pasta.	Test de abatimiento.	Cilindro de PVC.
Fluidez de la pasta.	Test de canaleta.	Canaleta de acrílico.
Viscosidad de la pasta	Viscosimetría.	Viscosímetro Brookfield DV-III.
Esfuerzo de cedencia	Vane.	Reómetro Brookfield YR-I.
Adensamiento da pasta.	Test de adensamiento.	Espesador de acrílico.

2.2. Ensayos de sedimentación en probeta

Para la evaluación del tiempo de residencia requerido para la formación de pulpas de mayor densidad fueron realizados ensayos de sedimentación en probetas de 2L con % de sólidos en peso de 10, 15 y 20%. La selección del polímero de mejor desempeño fue realizada en probetas de 0,25L con pulpas de 15% de sólidos en peso, valor correspondiente a la muestra original. Los floculantes comerciales del tipo catiónico, aniónico y no iónico fueron preparados en concentraciones de 0,1% P/V y diluidos a 10% V/V para obtener una mayor precisión en las dosis de 0 hasta 15gpt con incrementos de 2,5gpt. La floculación fue realizada en la probeta mezclando una pulpa con un polímero mediante movimientos ascendentes y des-

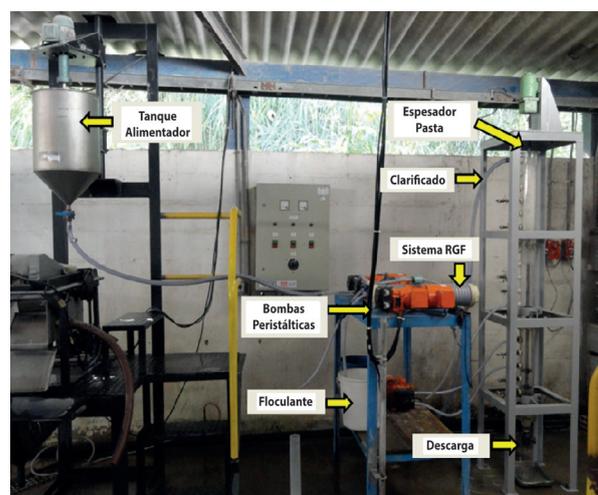
cententes por un tiempo de 5s mediante la utilización de un hasta especialmente diseñada para estos ensayos. Fue seleccionado el floculante de mejor desempeño para la realización de los ensayos de sedimentación con dosis entre 0 y 100gpt con incrementos de 10gpt. Los floculantes testeados son presentados en la Tabla N.º 3 con sus respectivos nombres comerciales.

Tabla N.º 3. Floculantes catiónicos, aniónicos y no iónicos utilizados.

Catiónicos	Floculantes Aniónicos	No Iónicos
SC-492	AS-130	SN-100
SC-496	AS-110	SN-300
SC-494	M-338	M-351
BC-630	M-10	-

2.3. Espesador de pasta de laboratorio

Un espesador de pasta fue desarrollado en escala de laboratorio para estudiar sus condiciones operacionales y caracterizar las diferentes pastas minerales obtenidas. Este equipamiento fue construido en acrílico considerando un largo/altura total de 1,8m y un diámetro de 0,1m, pudiendo operar con un volumen máximo de pulpa de 7L. Dispone de un sistema de recirculación de pulpa constituido por orificios laterales numerados desde abajo hacia arriba. La descarga de la pasta fue realizada mediante un cono de descarga localizado en su parte inferior. Fueron considerados en este trabajo operaciones con alimentación continua para las que fueron utilizadas bombas peristálticas, tanto para alimentación como recirculación. Fueron ensayados dos sistemas de alimentación: lineal y curvilíneo con reactor generador de flóculos (RGF) que cumple el rol de ente floculador. También fue verificada la influencia de la recirculación de pulpa en el equipo. La Figura N.º 2. presenta una visión general del equipamiento utilizado.

**Figura N.º 2.** Vista general del montaje de operación del espesador de pasta desarrollado. (Barreda, 2012).

2.4. Sistema de alimentación en espiral (RGF)

La Figura N.º 3 presenta el sistema de alimentación en espiral (RGF) utilizado en el espesador de pasta mineral.

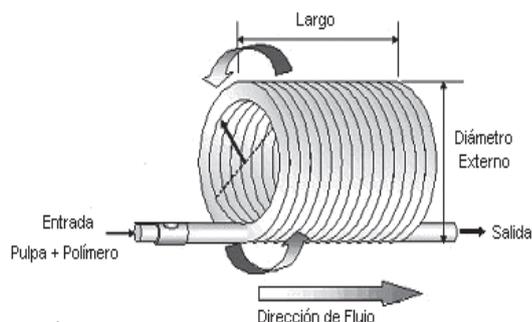


Figura N.º 3. Reactor Generador de Flocúlos (RGF) para alimentación de pulpa con polímero. (Rubio et al., 2007).

El reactor generador de flocúlos RGF utilizado consiste de un tubo de poliuretano transparente con diámetro interno de 0,0127m envuelto en la parte externa de una columna fija de cloruro de polivinil (PVC), con un radio interno de 0,1m y largo de 12m. La finalidad de este dispositivo es actuar como un reactor de interacción floculante-partícula buscando la mejor agregación de las partículas en suspensión.

2.5. Ensayos de sedimentación en el espesador de pasta

Los ensayos permitirán evaluar la producción de pasta mineral en el equipamiento, los que tuvieron una duración total de operación continua de 180 minutos en las siguientes condiciones operacionales: 15% de sólidos en peso de la pulpa alimentada, adición de floculante con el mejor desempeño en dosificación de 50gpt, volumen total de pulpa de 7L, utilización de dos tipos de alimentación: lineal (convencional) y curvilínea (RGF). El perfil de concentración de sólidos según la altura del equipo fue determinado empleando muestreadores laterales.

Para la determinación de la presión mínima necesaria para generar pasta mineral con el relave de manganeso fue utilizada la ecuación (1):

$$P = p_{atm} + \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Donde: P es la presión (Pa); p_{atm} es la presión atmosférica (Pa); ρ es la densidad del líquido (kg/m³); g es la aceleración de la gravedad (m/s²); h corresponde a la altura de la columna de líquido (m).

2.6. Ensayo de abatimiento (Slump)

Los ensayos de abatimiento practicados a las pastas minerales fueron realizados considerando la norma brasileña NBR NM 76, empleando un cilindro de PVC de 10cm

de diámetro y 10cm de altura. La determinación del porcentaje de abatimiento (%ABT) fue calculado mediante la ecuación (2):

$$\%ABT = S / H * 100 \quad (2)$$

Donde: S es la diferencia entre altura de cilindro y altura de la pasta ensayada; H es la altura inicial del cilindro. La Figura N.º 4 presenta la secuencia de pasos del procedimiento del ensayo de abatimiento.

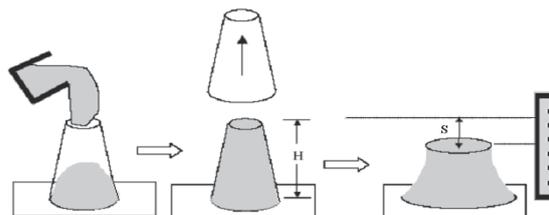


Figura N.º 4. Procedimiento del ensayo de abatimiento ("slump"). (Clayton et al, 2003).

2.7. Ensayo de canaleta (Flume)

Una canaleta de laboratorio fue construida en acrílico para la realización de estos ensayos (Hernández et al., 2007), con dimensiones de 100cm de largo, 20cm de ancho y 20cm de altura. Fueron consideradas inclinaciones de canaleta de 0, 3 y 6% respecto de la horizontal. La Figura 5 muestra en forma esquemática las forma y dimensiones de la canaleta utilizada.

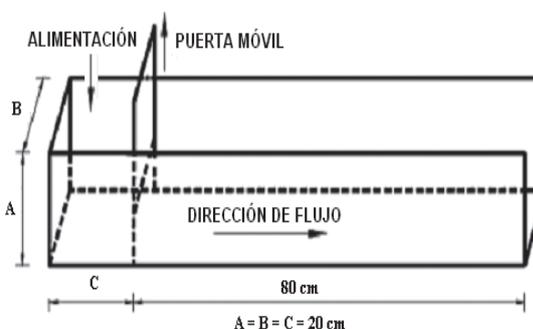


Figura N.º 5. Forma y dimensiones de la canaleta utilizada. (Hernández et al., 2007).

La siguiente ecuación (3) presenta la fórmula que permite estimar el valor del ángulo de reposo (θ_R) de la pasta mineral:

$$\theta_R = \arctg [(h_1 - h_2)/L] \quad (3)$$

Donde: h_1 es la altura en el punto inicial de la canaleta; h_2 es la altura en el punto final de la canaleta; L corresponde al largo recorrido por la pasta ensayada en la canaleta.

2.8. Viscosimetría

Los ensayos de viscosidad de pasta mineral fueron practicados en un viscosímetro Brookfield modelo DV-III que dispone de una interface on-line con el computador. La Figura N.º 6 muestra fotografías del viscosímetro y las hastas (“Spindles”) utilizadas.

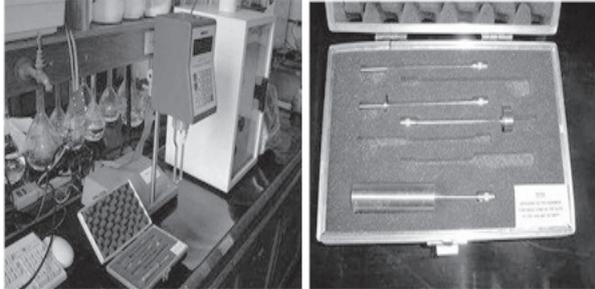


Figura N.º 6. Viscosímetro Brookfield modelo DV-III con sus “spindles” LV-1, LV-2, LV-3 y LV-4.

Este equipamiento permitió estudiar el comportamiento reológico de la pasta mineral producida realizando los ensayos con velocidades de rotación de la hasta crecientes hasta alcanzar un valor máximo y luego retornar al punto inicial (ciclo reológico). Fueron utilizadas las hastas o spindles LV-3 y LV-4, que permiten registrar mayores valores de viscosidad.

2.9. Método de Vane

Los ensayos de esfuerzo de cedencia de la pasta mineral fueron realizados en un reómetro digital Brookfield modelo YR-I similar al viscosímetro que, además, dispone de interface on-line para el computador. El principio del método de Vane consiste básicamente en utilizar un rotor de cuatro palas que es inmerso en las diferentes concentraciones de sólidos en peso.

En cada ensayo la rotación es iniciada lentamente hasta un valor constante procurando detectar el momento del rendimiento en que el esfuerzo de torsión ejercido por las palas alcanza un valor máximo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de densidad determinados por picnometría simple (PS) y a gas (PG) son presentados en la Tabla 4 e indican una diferencia entre los mismos en torno de 9%. El valor obtenido por picnometría a gas está en mayor concordancia con aquellos valores obtenidos normalmente para los relaves del procesamiento de minerales de manganeso.

Tabla N.º 4. Valores de densidad obtenidos por picnometría simple y a gas (Helio).

Técnica Utilizada	Densidad (g/cm ³)
Picnometría simple	2,87
Picnometría a gas	3,14

La distribución granulométrica de la muestra mineral es mostrada en la Figura 7. Se verifica que el 100% de las partículas minerales son menores que 25µm, y que el valor del parámetro d₅₀ es de aproximadamente 4,63µm.

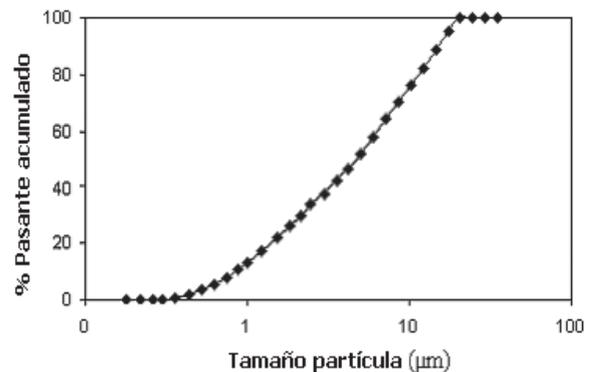


Figura N.º 7. Distribución granulométrica de la muestra mineral.

El análisis semicuantitativo de la muestra fue obtenido por microscopía electrónica (SEM y EDS). Los resultados presentados en la Tabla 5 evidencian la predominancia de los elementos Mn, Fe, Al y Si, además la presencia a nivel de trazas de K, Na y Ca.

Tabla N.º 5. Análisis químico semicuantitativo de la muestra mineral obtenida por SEM y EDS.

Elemento	(%)	Elemento	(%)
Mn	21,9	K	0,8
Si	30,2	Na	0,2
Al	28,0	Ca	0,1
Fe	18,8	Total	100,0

El análisis por DRX mostró la presencia de pirolusita (MnO₂) que es la especie mineralógica predominante. También fue identificada la presencia de la especie mineralógica caolinita Al₂Si₂O₅(OH)₄.

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos del área superficial específica (ASE) determinada por la técnica BET y por la permeabilidad de Blaine. Existe una gran

diferencia entre los valores obtenidos. La isoterma de adsorción obtenida por la metodología BET presentó la de tipo III, esto es, aquella que favorece la formación de multicapas de nitrógeno sobre la superficie mineral y no de tipo I que es la correspondiente a formación de monocapa. Por lo tanto, este valor de ASE no es confiable.

Tabla N.º 6. Resultados del Área Superficial Específica mediante técnicas BET y Blaine.

Técnica	BET	Blaine
ASE (m ² /g)	28,96	0,893

La Figura N.º 8 muestra las curvas de sedimentación referente a los ensayos de sedimentación en probeta de 2L para 10, 15 y 20% de sólidos en peso sin floculante. El punto de compresión para una concentración de pulpa de 15% de sólidos en peso es alcanzado por sobre los 2.000s.

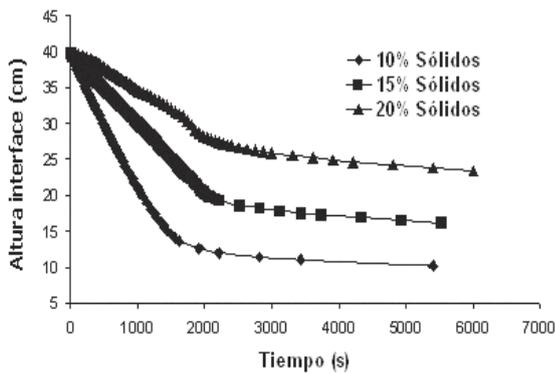


Figura N.º 8. Curvas de sedimentación para 10, 15 e 20% de sólidos en peso usando probeta de 2L.

La Tabla N.º 7: muestra las velocidades de sedimentación que fueron alcanzadas.

Tabla N.º 7. Velocidades de sedimentación para 10, 15 y 20% de sólidos en peso sin floculante.

Sólidos (%)	Velocidad de sedimentación (cm/s)	Coefficiente de Determinación (r ²)
10	2,112 x 10 ⁻²	0,999
15	1,067 x 10 ⁻²	0,991
20	2,833 x 10 ⁻³	0,990

Los resultados de los ensayos en presencia de floculantes catiónicos, aniónicos y no iónicos con 15% de sólidos en peso en probetas de 0,25L con dosis de 5gpt son mostrados en la Tabla N.º 8:

Tabla N.º 8. Velocidad de sedimentación para floculantes catiónicos, aniónicos y no iónicos.

Floculantes Catiónicos / Velocidad (cm/s)	Floculantes Aniónicos / Velocidad (cm/s)	Floculantes No Iónicos / Velocidad (cm/s)
SC492 / 0,033	SA130 / 0,078	SN100 / 0,059
SC496 / 0,034	SA110 / 0,041	SN300 / 0,062
SC494 / 0,024	M338 / 0,032	M351 / 0,029
BC630 / 0,047	M10 / 0,042	-

Los floculantes BC630, SA130 y SN300 fueron los de mejor desempeño en cada familia. El floculante escogido para adensamiento del relave fue el floculante no iónico SN300, atendiendo a su naturaleza. La dosis de 50gpt fue considerada como ideal para los ensayos subsecuentes en el espesador de pasta lo que es mostrado en la Figura N.º 9.

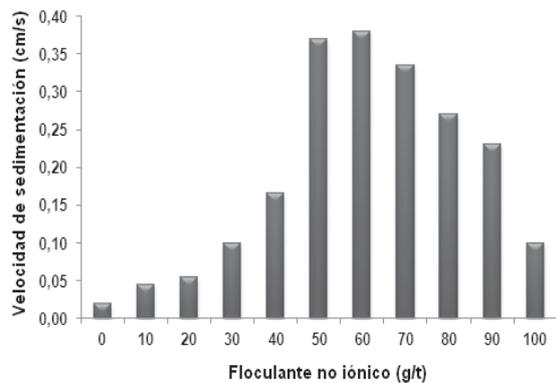


Figura N.º 9. Velocidad de sedimentación de pulpa versus dosis del floculante no iónico.

En el espesador fueron realizados los ensayos con alimentación siendo incorporada a través del agujero 6 que corresponde a una zona intermedia del equipamiento, tiempo de operación continua de hasta 180 minutos, y variaciones de dosis de floculante con 25, 50 y 75gpt.

La Figura N.º 10 presenta los % de sólidos en peso obtenidos en función del tiempo de operación para diferentes dosis de floculante con uso del RGF en la formación de floculos.

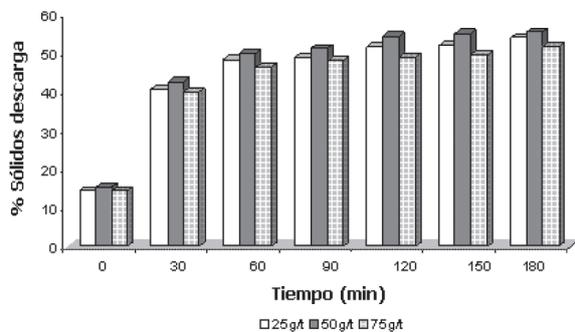


Figura N.º 10. Variación del porcentaje de sólidos en peso de la descarga en función del tiempo de operación para diferentes dosis de floculante no iónico con alimentación curvilínea (RGF).

La Figura N.º 10 muestra que el mayor % de sólidos en peso alcanzado fue de 55,5% con dosis de 50gpt de floculante no iónico para 180min de operación evidenciando un incremento en la concentración de sólidos en relación a la alimentación de 3,7 veces. En el caso de la alimentación lineal, el valor máximo alcanzado fue de 52,7% de sólidos en peso.

La Figura N.º 11.A y 11.B muestra los perfiles de concentración de sólidos según la altura de la camada sedimentada, considerando una adición de floculante no iónico con dosis de 25, 50 y 75gpt, para alimentación curvilínea de la pulpa en el equipo con uso del sistema RGF y alimentación lineal (convencional).

En la Figura N.º 3.5 se puede observar que la mejor condición de operación es con la utilización de alimentación en espiral RGF para una dosis de 50gpt que presenta el mayor valor de % de sólidos en peso para todas las alturas de camada en comparación con las demás dosificaciones. Se observa, además, que existe una posible etapa de transición de pulpa a pasta en el rango entre 40 y 45% de sólidos en peso, o sea, que para % de sólidos mayores que 45% ocurre la formación de pasta mineral para este tipo de relave, hecho que fue constatado en los ensayos de reología realizados posteriormente.

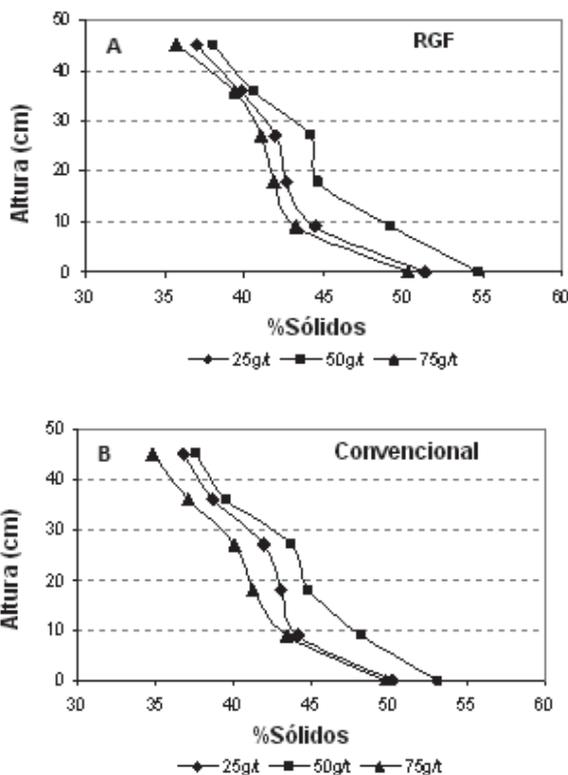


Figura N.º 11 A y 11 B. Perfiles de concentración de sólidos en peso según la altura del espesador para dosificaciones de 25, 50 y 75gpt de floculante no iónico utilizando sistema RGF y alimentación lineal (convencional), respectivamente.

El relave de manganeso se presentó como pasta entre 47 y 56% de sólidos en peso, donde se alcanzaron ángulos de reposo superiores a 8°.

La Figura N.º 13 muestra los % de sólidos en la descarga obtenidas en los ensayos de sedimentación continua con 7L de pulpa y adición de floculante no iónico, en función de las combinaciones de los agujeros de salida y entrada de pulpa mineral.

En dicha figura se puede observar que la mejor condición de operación con adición de floculante fue a partir de la recirculación de la pulpa desde el agujero 4 para el agujero 1 con 53,7% sólidos en peso en la descarga.

La Figura N.º 14 muestra los % de sólidos obtenidos en función del tiempo de operación para las mejores condiciones obtenidas: dosis de 50gpt de floculante no iónico, alimentación de la pulpa con sistema RGF y recirculación continua de pulpa desde agujero 4 para agujero 1.

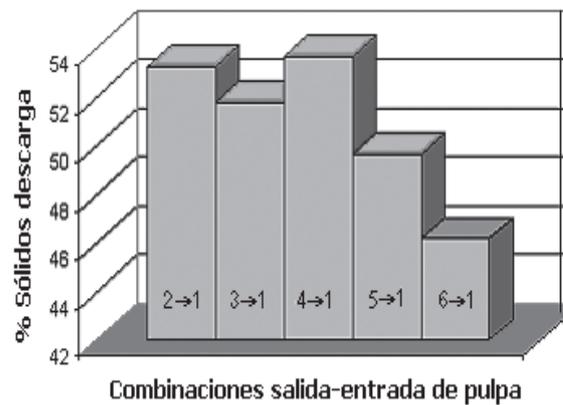


Figura N.º 13. Variación de los porcentajes de sólidos en peso en función de las combinaciones de los agujeros con el tiempo de residencia de 10min, adición de 50gpt de floculante y volumen de pulpa de 7L.

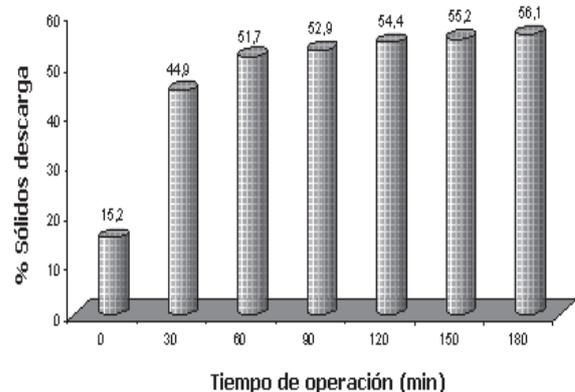


Figura N.º 14. Variación de % de sólidos de la descarga en función del tiempo de operación para las mejores condiciones operacionales continuas.

La Figura N.º 15 indica que el mayor valor de adensamiento obtenido fue de 56,1% de sólidos en peso para un tiempo de 180 minutos de operación continua que representa un aumento en la concentración de sólidos en relación a la alimentación de 3,74 veces, valor que garantiza la formación de pasta mineral para el tipo de relave evaluado.

La presión de columna mínima requerida para la formación de pasta mineral considerando alcanzar un mínimo de 47% de sólidos en peso en la descarga, fue de $1,13 \times 10^{-5}$ Pa.

La Figura N.º 15 muestra los valores obtenidos en los ensayos de abatimiento en función de las pastas minerales de los relaves de manganeso con el espesador de laboratorio.

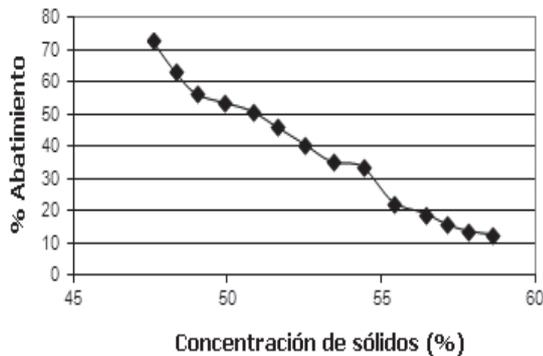


Figura N.º 15. Abatimiento en función de la concentración de sólidos de pasta mineral de relave de manganeso.

La Figura N.º 16 indica que el relave de manganeso se presenta como pasta en el rango de concentración de sólidos comprendido entre 48 y 56% de sólidos en peso, siendo ello observado en los % de abatimiento con valores menores a 80% en función del % de sólidos, valores menores al 10% de abatimiento corresponden a la consistencia de una torta de filtración obtenida con la misma muestra. Por lo tanto, los consumos de agua en estas mezclas varían de 44 hasta 52% en peso, valores que pueden ser considerados como elevados.

La Figura N.º 16 presenta los ángulos de reposo considerando inclinaciones de canaleta de 0, 3 y 6% en relación a la horizontal versus la concentración de sólidos de las pastas minerales obtenidas mediante el espesador de laboratorio.

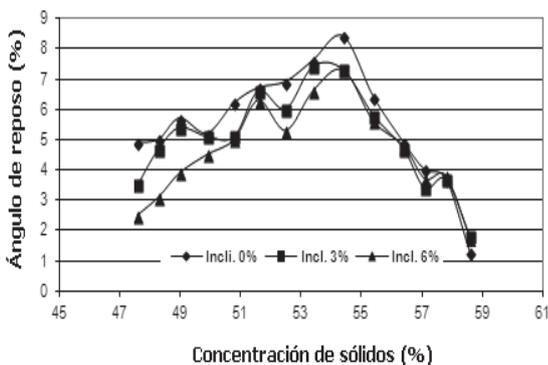


Figura N.º 16. Ángulo de reposo versus concentración de sólidos de las pastas minerales de relaves de manganeso.

La Figura N.º 17 presenta los resultados de los ensayos de viscosidad aparente de las pastas minerales para el ciclo reológico de rotación de la hasta o spindle 1-100-1rpm.

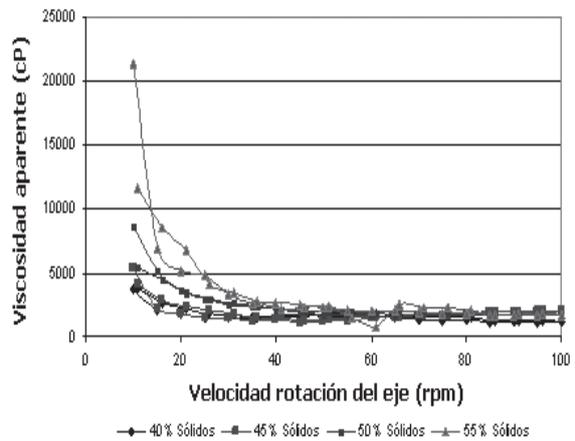


Figura N.º 17. Comportamiento reológico de las pastas de relave de manganeso en el ciclo: 1-100-1rpm.

En la Figura N.º 17 se verifica que el comportamiento reológico de todas las pastas minerales estudiadas fue mixto (tixotrópico y reotrópico). Se observa además, elevados valores de la viscosidad aparente exhibidos para las pastas más densas que 55% de sólidos en peso. La viscosidad aparente de las pastas con 50 a 55% de sólidos en peso fue del orden de 2.500cP (como valor promedio).

La Figura N.º 18 presenta los valores obtenidos en los ensayos del test de esfuerzo de cedencia de las pastas minerales producidas.

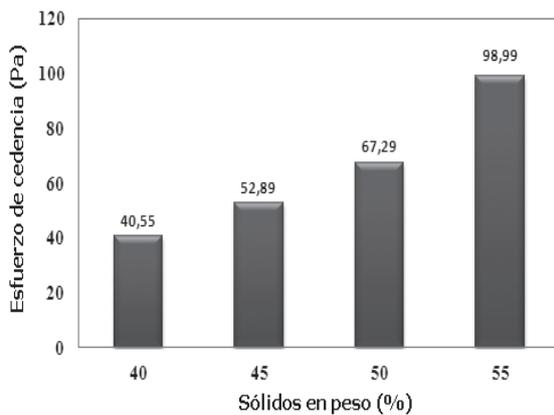


Figura N.º 18. Esfuerzo de cedencia en función del porcentaje de sólidos en peso.

El aumento exponencial del esfuerzo de fluencia con el % de sólidos en peso es típico de las características de las pastas minerales.

El comportamiento del esfuerzo de cedencia de las pastas generadas se puede correlacionar de acuerdo a la siguiente ecuación exponencial (4):

$$y = 3,858 \exp^{0,0583x} \dots\dots\dots (4)$$

En los ensayos de adensamiento fueron colectadas muestras del espesador de laboratorio en diferentes tiempos operacionales para obtener concentraciones entre 40 y 60% de sólidos en peso en forma de pulpa de alta densidad y pasta mineral.

IV. CONCLUSIONES

1. La muestra de relave de manganeso en la caracterización de sólido se presentó como de granulometría muy fina con tamaño d_{50} equivalente a $4,63\mu\text{m}$ y un elevado valor de ASE de $8,930\text{cm}^2/\text{g}$. Las especies mineralógicas predominantes en la muestra fueron pirolusita y caolinita. En los estudios de sedimentación discontinua en probetas de 2L el tiempo mínimo requerido para alcanzar el punto de compresión fue superior a los 2.000s y el mejor resultado se obtuvo para un floculante no iónico. El perfil de concentración con mayor % de sólidos en toda la capa mineral fue obtenido con una dosis de floculante de 50gpt. En este perfil existe una zona de transición de pulpa para pasta en el rango comprendido entre 40 y 45% de sólidos en peso, es decir, que para % mayores que 45% de sólidos en peso se alcanza la consistencia de pasta mineral. En los ensayos continuos con adición de floculante y recirculación de la pulpa, la mejor condición de operación para el mayor % de sólidos en la descarga fue a partir de la recirculación de la pulpa desde el agujero 4 para el agujero 1 con un valor de 53,7% de sólidos en peso para un tiempo total de residencia de 10 minutos. En los estudios con el RGF se obtuvo la mejor condición de operación para una dosis de 50gpt alcanzándose los 55,5% de sólidos en peso en la descarga, mientras que con alimentación lineal se presentó un valor de 52,7% de sólidos en peso para la misma dosis de floculante. En las mejores condiciones operacionales incluyendo recirculación de la pulpa se obtuvo un % de sólidos en peso de 56,1% para un tiempo de operación continuo de 180 minutos, la presión mínima necesaria para la obtención de pasta mineral con 47% de sólidos en peso es de $1,13 \times 10^{-5}\text{Pa}$.
2. **En la caracterización** de las pastas minerales los ensayos de abatimiento, el relave de manganeso se presentó como pasta en el rango comprendido entre 48 y 56% de sólidos en peso. Por lo tanto, los consumos de agua en estas mezclas van de 44 hasta 52% en peso. Los ángulos de reposo obtenidos en ensayos de canaleta fueron cercanos a los 8° para 55% de sólidos en peso, factor que indica una ven-

taja en lo que concierne a estabilidad del material depositado. En los ensayos reológicos las pastas se presentaron con un carácter mixto en los ciclos reológicos ensayados. La relación entre el esfuerzo de cedencia y el % de sólidos de las pastas minerales estudiadas mostró ser del tipo exponencial alcanzando valores próximos a los 100Pa, que es un valor típico de estos sistemas sólido-líquido. El espesador de laboratorio utilizado para la producción de pasta mineral mostró tener una operación satisfactoria.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAUJO, A. C., SOUZA, C. C., AMARANTE, S. C., 2003. Rejeitos Adensados para Disposição em Superfície - Nova Tecnologia em Minério de Ferro. In: IV Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, IV, 2003, Ouro Preto, Anais... Ouro Preto, Associação.
2. BARREDA, R.H.O., 2012. Desenvolvimento de Equipamento Produtor de Pasta Mineral Para Aproveitamento de Rejeitos das Lamas Calcárias e Diminuição do Impacto Ambiental. Belo Horizonte. Tese de Doutorado, CPGEM-UFMG.
3. CARISSIMI, E. L. Rubio, 2007. Desenvolvimento do Reator Gerador de flocos (RGF): Aspectos Teóricos e Aplicações no Tratamento e Reúso de Águas e Efluentes. Dissertação de Doutorado PPGEM-UFRGS.
4. CLAYTON, S., GRICE, T. G., BOGER, D.V. 2003. Analysis of the Slump Test for on-site Yield Stress Measurement of Mineral Suspensions. International Journal of Mineral Processing, Melbourne – Australia, No. 70, p. 3-21.
5. ELMALEH, S.; JABBOURI, A. 1991. Flocculation energy requirement. Water Research, v. 25, n. 8, p. 939-943.
6. GREGORY, J., 1981. Flocculation in laminar tube flow. Chemical Engineering Science 36 (11), 1789 – 1794.
7. GREGORY, J., 1987. Laminar dispersion and the monitoring of flocculation processes. Journal of Colloid and Interface Science 118 (2), 397 – 409.
8. HERNANDEZ, C. A. 2007. “Efeito da Adição de Reagentes Agregantes e de Ligantes Sobre a Consistência em Pastas Mineraias”. Belo Horizonte. Tese de Doutorado, CPGEM-UFMG.
9. HERNANDEZ, C. A. 2008. “Estudo de características de algumas pastas mineraias”. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo v4.n3.p.50-55.

10. HOUMAN, J., JHONSON, G., 2003. "Commissioning and Operation of the Paste Thickening Farm at Kimberley Combined Treatment Plant", International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Melbourne.
11. JEWELL, R., 2002. "Paste & Thickened Tailing in the Australian Mining Industry." High Density & Paste, Seminario 2002, Santiago Chile.
12. LANDRIAULT, D. 2002. The Surface Disposal of Industrial Waste: Slurry Placement v/s High Density Slurry Placement v/s Placement as a Paste. In: High Density & Paste Seminar, Santiago Chile, Apresentações digitais.
13. PAREKH, B. K. e MILLER, J. D. 1999 (Eds.) - Advances in Flotation Technology, New York, SME, 1999.
14. ROSA, J.J., RUBIO, J., 2005. The FF (Flocculation – Flotation) process. Minerals Engineering 18 (7), 701 – 707.
15. RUBIO, J., CARISSIMI, E., MILLER, J.D., 2007. Characterization of the high kinetic energy dissipation of the Flocc Generator Reactor (RGF). International Journal of Mineral Processing, 85, 41-49.
16. SLOTTEE, S., JHONSON, J., CROZIER, M., 2005. Paste Thickening Iron Ore Tailings. In: XXXV Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas, VI Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, 30 Agosto a 02 Setembro de Florianópolis - Santa Catarina-Brasil, p. 904-911.