



*Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico
Dr. Antonio Núñez Jiménez
Facultad Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Ingeniería Mecánica*

Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniacal.



Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas.

Autor: Ing. Alberto Turro Breff.

Tutores: Dr.C. Leonel Garcell Puyáns.

Dr.C. Rafael Pérez Barreto.

Dr.C. Raúl Izquierdo Pupo.

Dr.C. Aristides Legrá Lobaina.

Moa, 2002

INTRODUCCIÓN.

En el año 2000 la industria del Níquel constituyó la primera fuente de exportación del país y se encuentra enfrascada en el proceso de ampliación de las capacidades instaladas y modernización de su tecnología, lo que le permitirá ir incrementando su papel en la economía nacional.

En la resolución económica del **V Congreso del Partido Comunista de Cuba** (1997), se plantea que para la recuperación y desarrollo de la economía cubana es necesario intensificar el desarrollo de la industria minero - metalúrgica y como objetivo estratégico incrementar la producción de concentrado de Níquel con la mayor eficiencia en las inversiones.

Para cumplir estos lineamientos a mediano y largo plazo, se requiere que paralelamente al crecimiento progresivo se perfeccionen los parámetros y regímenes de trabajo de las instalaciones tecnológicas para explotar de una forma más racional y eficiente las grandes reservas de recursos minerales existentes en los yacimientos niquelíferos en la parte oriental de Cuba y se perfeccione el sistema de transportación de minerales lo que garantizará la existencia de un proceso productivo continuo.

Dentro del complejo tecnológico de la industria niquelífera cubana, las empresas Comandante René Ramos Latour de Nicaro y Ernesto Che Guevara de Moa, realizan la producción de Níquel más Cobalto por el proceso Carbonato Amoniacal (**CARON**).

En el costo de la extracción del Níquel y en la eficiencia de su proceso tecnológico incide significativamente el tratamiento de las colas, que contienen minerales útiles que se depositan en diques para su aprovechamiento futuro y cuyo volumen es relativamente grande, del orden de 104 T de colas por cada tonelada de níquel producido.

El costo de producción del Níquel por el proceso CARON esta incrementado en gran medida por el elevado consumo energético. En el tratamiento de las colas incide, además, una baja eficiencia del transporte hidráulico cuya causa se requiere precisar para disminuir los costos e incrementar su fiabilidad.

En este tipo de transporte el consumo energético depende en gran medida de las pérdidas de carga a lo largo de la tubería y ésta, a su vez, depende del diámetro de la conductora, su estado de explotación, el material y tecnología de que está hecho, el régimen de trabajo de la instalación y de las propiedades físico mecánicas del material y de sus suspensiones.

Estos factores tienen distintos grados de influencia y son muy variables e inciden con diferentes magnitudes, tanto en los indicadores económicos como en la eficiencia del proceso tecnológico. Cualquier estudio encaminado a perfeccionar el sistema de evacuación de pulpas implicaría el análisis de estos factores en el proceso. El orden de la realización de los estudios no está relacionado obligatoriamente con el grado de incidencia, sino con la obtención organizada de los datos que se requieren.

Los desechos lixiviados (colas) constituyen suspensiones minerales con particularidades no newtonianas poco conocidas que influyen en el proceso de transportación.

La variabilidad de estas propiedades y de las condiciones de hidrottransportación limitan el campo de aplicación de las fórmulas de cálculo conocidas, y no resulta posible determinar los parámetros de transportación con la precisión necesaria para los objetivos prácticos. Los métodos de cálculo propuestos para estos parámetros, basados en las características del flujo plástico – viscoso de BINGHAM necesitan en muchas ocasiones correcciones fundamentadas en los resultados experimentales. Por ello, los resultados publicados sobre trabajos realizados con múltiples hidromezclas aún resulta insuficiente para la obtención de correlaciones más generalizadas.

El análisis de las condiciones técnicas y de explotación del sistema de hidrottransporte de las colas en la planta de Recuperación de Amoniaco de la Empresa Ernesto Che Guevara muestra problemas respecto a:

- Dificultades de explotación de los equipos e instalaciones de bombeo que no trabajan en regímenes eficientes de trabajo y con frecuencia cavitan.
- Desconocimiento del comportamiento de las colas en función de las propiedades físico – químicas y reológicas de las mismas.

- Ausencia de un dosificador en la entrega de pulpa a las bombas y dificultades para su elección por desconocimiento de los parámetros de hidrotransporte.
- Diferencia de nivel en las descargas de las líneas que incide en la productividad del sistema.

Las metodologías de cálculo y evaluación disponible para el estimado de los parámetros indispensables para proyectar una instalación de transporte hidráulico, han sido elaboradas a partir de los datos experimentales obtenidos para sistemas particulares y no existe una metodología única para determinar los parámetros. Por ello se requiere de la generalización de los resultados experimentales que permitan la solución racional de diversos problemas en las condiciones de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

Para fundamentar y proyectar una instalación de transporte hidráulico, es necesario determinar la velocidad crítica, las pérdidas específicas de carga, la densidad o concentración de las mezclas, el diámetro del conducto que permita la determinación del régimen racional del trabajo y elegir los equipos adecuados para el caso concreto, lo que están influidos por las propiedades físico – mecánicas de las pulpas . Estos parámetros tienen incidencia en la magnitud de las inversiones, en los gastos de explotación y en la fiabilidad del trabajo de la instalación.

Situación Problémica: En la actualidad el sistema de hidrotransporte de las colas de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" presenta alta ineficiencia debido a problemas técnicos y operacionales que conducen a que la instalación de transportación de este material opere en un régimen cavitacional, con los correspondientes incrementos en el consumo energético, de agua y materiales para el mantenimiento. Hasta el presente esta situación no se resuelve dado por el desconocimiento de las propiedades de las colas y por no contar con un método de cálculo y evaluación apropiado.

Problema Científico: Obtener las propiedades de las colas y un modelo de cálculo, que permita establecer los parámetros racionales de operación del sistema de flujo para la transportación de las colas.

Las dificultades de explotación y los posibles incrementos de la producción de la empresa, determinan la necesidad de un **estudio de las regularidades del movimiento del flujo y la elaboración de la metodología de cálculo para el hidrotransporte de las colas del proceso Carbonato Amoniacal**, que constituye el objetivo fundamental del presente trabajo. Por consiguiente la Hipótesis de la Tesis establece que **el empleo de las propiedades físico - mecánicas y reológicas de las colas en la obtención de un sistema de ecuaciones para el cálculo del hidrotransporte en tres fases, permitirá obtener parámetros más racionales de operación, diseño y mejorar la eficiencia de las instalaciones de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”**.

Por tanto, para cumplir el objetivo central, se desarrollaron los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar las colas desde el punto de vista químico, mineralógico, reológico, granulométrico y de su estabilidad y establecer la influencia de estos factores sobre su comportamiento.
- Realizar las investigaciones teóricas y experimentales de los principales parámetros del transporte hidráulico de las colas.
- Proponer un modelo físico – matemático del movimiento de las hidromezclas de las colas, teniendo en cuenta sus características de sistema trifásico.
- Elaborar una metodología para el cálculo y proyección del complejo de hidrotransporte.
- Contribuir a la disminución de los costos de producción sobre la base de la reducción del consumo energético, de los gastos de mantenimiento y de la magnitud de las inversiones requeridas con vista a mejorar la fiabilidad de las instalaciones industriales.

- Proporcionar información, acerca de los elementos nuevos que contribuyan a la disminución de la agresión ecológica debido al almacenamiento y manipulación actual de las colas.

Novedad Científica

I.- La caracterización de la fase sólida y de la hidromezcla de las colas, mediante:

- El establecimiento de los modelos reológicos que describen el comportamiento no newtoniano de las colas del proceso CARON, aspecto este desconocido hasta el presente.
- La evaluación de la estabilidad de las colas y del efecto de las propiedades de la fase sólida, la temperatura, la concentración y el pH sobre los parámetros reológicos y la viscosidad de sus hidromezclas a través de los modelos matemáticos obtenidos en relación con estos aspectos.
- El sistema de correlaciones, derivado del modelo físico propuesto, para el cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrotransporte que manipulan las pulpas de cola constituyen un sistema trifásico novedoso para las condiciones de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” .

II. – La propuesta de una metodología de cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrotransporte que manipulan las pulpas de cola, derivado de los resultados de la caracterización realizada y del sistema de ecuaciones producto del modelo físico – matemático propuesto para este sistema.

Aportes Metodológicos

- Se establece una metodología para el cálculo y evaluación de un sistema de hidrot transporte de una hidromezcla con características trifásicas pudiendo generalizarse la aplicación de dicho modelo a otras plantas de producción de níquel por el proceso CARON.
- Se ilustra la necesidad de utilizar los parámetros que caracterizan el comportamiento reológico de fluidos en el cálculo y evaluación de problemas del transporte de materiales no newtonianos por tuberías,
- Los resultados de la caracterización y el modelo propuesto para describir el sistema trifásico puede ser introducido en temas de asignaturas afines de las carreras de Metalurgia, Mecánica, Minería e Ingeniería Química.

Valor práctico

- La aplicación de los modelos reológicos obtenidos permiten determinar el comportamiento de las colas y los valores de sus parámetros.
- La aplicación de los modelos obtenidos permiten estimar la viscosidad y los parámetros reológicos en función de la concentración, temperatura y pH.
- Con el sistema de ecuaciones obtenidas es posible calcular las instalaciones de bombeo para ser empleadas en un sistema de flujo dado .
- La investigación de los parámetros permite estabilizar la producción y disminuir los costos mediante la reducción del consumo energético, la magnitud de las inversiones, su amortización, y el perfeccionamiento de la tecnología del hidrot transporte.

Tareas principales a desarrollar.

1. - Determinar las propiedades físico – mecánica de las colas.
- 2.- Elaborar y fundamentar el modelo físico – matemático para el flujo de pulpas de colas a altas temperaturas.
- 3.- Realizar las investigaciones teóricas y experimentales de los principales parámetros hidráulicos de las colas.
- 4.- Elaborar la metodología de cálculo y proyección del hidrotransporte de las colas a partir del modelo matemático que se obtenga.
- 5.- Elaborar las recomendaciones en particular definir el régimen de trabajo para la reducción del consumo energético y del gasto de las inversiones.

CAPITULO I. REVISION BIBLIOGRAFICA.

La necesidad de determinar con más precisión los parámetros para la transportación por tuberías de mezclas concentradas de diferentes productos líquidos y materiales áridos, es evidente durante la manipulación de los materiales en operaciones y procesos tecnológicos, en diferentes ramas de la economía nacional (metalurgia, petróleo, construcción, industria química y la agricultura).

La variedad de las propiedades físico – mecánicas de estas mezclas confiere propiedades específicas a los flujos en su movimiento por tuberías u otros dispositivos de transporte similares. Con frecuencia se requiere la transportación de suspensiones concentradas que exhiben propiedades no newtonianas, en las que las partículas tienden a formar estructuras que exhiben , un comportamiento pseudoplástico, o características plásticas con la aparición de esfuerzos cortantes iniciales. En dependencia de las condiciones de operación , dichos flujos pueden ser laminares o turbulentos con diferentes influencias de las características reológicas de las mezclas . Darby,R.(2000).

El conocimiento de las propiedades de flujo de las suspensiones que se transportan es de gran importancia para decidir las características de los sistemas de bombeo, redes de tuberías, accesorios y equipos que deben utilizarse según las necesidades tecnológicas, así como los requerimientos medio ambientales, no menos importante que deben tenerse en cuenta en todo proceso de carga, transportación, vertimiento y almacenamiento de cualquier tipo de material.

A continuación se realizará el análisis de los distintos aspectos relacionados con el tema, que se abordan en la bibliografía consultada, con la finalidad de disponer de los elementos básico invariantes y de las tendencias actuales que resulten esenciales para el correcto desarrollo del trabajo.

En la mayoría de los casos, en la práctica mundial, el análisis del hidrotransporte tiene un carácter bifásico, es decir partículas sólidas suspensas en líquidos, en casi todos los casos se encuentran gases disueltos en la fase líquida mediante la ebullición que tiene lugar al igualarse la presión con la tensión de vapor. Estos problemas tratados de una u otra forma en la

literatura reportada por Daniels, Alberty (1963) influyen considerablemente en los parámetros de los flujos y en la durabilidad del equipamiento.

La concentración de los gases disueltos en el líquido depende de la solubilidad del gas en cuestión según Daniels, Alberty (1963) y de la presión del líquido. Por razones tecnológicas en las colas de la Empresa Ernesto Che Guevara están constituidos por soluciones amoniacales, gas de alta solubilidad y fácil desprendimiento del líquido, lo que crea una nueva fase gaseosa que incide con fuerza en los parámetros de flujos y que en la literatura se reporta como modelo trifásico según Mijailov (1996) de donde se deduce la necesidad de investigar las propiedades reológicas de la pulpa y la influencia de la fase gaseosa en los parámetros del transporte hidráulico de las colas de la Empresa Ernesto Che Guevara.

1.1.1. Clasificación reológica general de los fluidos.

En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican desde el punto de vista reológico en newtoniano y no newtoniano, según Skelland (1970), Tejeda (1985), Perry (1988) y Díaz (1989). A su vez los fluidos no newtonianos se clasifican en tres grupos:

- De viscosidad invariable con el tiempo.
- De viscosidad dependiente del tiempo.
- Materiales (líquidos de Maxwell)

Fluidos de viscosidad invariable con el tiempo:

a) Seudoplásticos: La viscosidad disminuye con el incremento de $\dot{\gamma}$. El líquido comienza a fluir inmediatamente después que se le aplica un esfuerzo cortante ($\tau > 0$). b) Dilatantes: La viscosidad aumenta con el incremento de $\dot{\gamma}$. Estos líquidos fluyen también para valores de ($\tau > 0$).

c) Plásticos reales: La viscosidad puede disminuir o aumentar con un incremento de $\dot{\gamma}$. Fluyen para valores de $\tau > \tau_0$. La principal característica de los plásticos ideales y reales es que poseen una estructura tridimensional muy fuerte cuando están en reposo, la cual resiste la deformación o el movimiento. Para valores del esfuerzo cortante $\tau < \tau_0$, no se establece el flujo. Para $\tau \geq \tau_0$, la estructura se rompe, permitiendo que se establezca el

flujo del material. Al reducir el esfuerzo hasta valores de $\tau \leq \tau_0$ la estructura de dicho fluido se restablece (Figura 1.1).

Fluidos de viscosidad dependiente con el tiempo:

- Tixotrópicos.
- Reopécticos.

Materiales viscoelásticos (líquidos de Maxwell).

Estos materiales exhiben propiedades viscosas y elásticas. Las sustancias viscoelásticas fluyen bajo la acción del esfuerzo cortante, pero, aunque la deformación es continua no resulta totalmente irreversible, de manera que al cesar la acción del esfuerzo cortante, el material restablece en parte su forma, semejante al comportamiento de los cuerpos elásticos sólidos. Este comportamiento se ha observado en NAPALM, en soluciones de polímeros, en masas cocidas de la industria azucarera con altos contenidos de gomas (polisacáridos), en ciertas resinas y en emulsiones de crudo cubano, de acuerdo a lo reportado por Toose (1995) y Ferro (2000).

1.1.2 Curvas de flujo.

Las curvas de flujo se representan gráficamente al relacionar valores experimentales de τ contra $(- dv/dy)$. Así, se obtendrán curvas de flujo de diferentes formas en dependencia de la naturaleza reológica de los fluidos (Figura 1.1), según Turiño (1984) y Tejeda (1985).

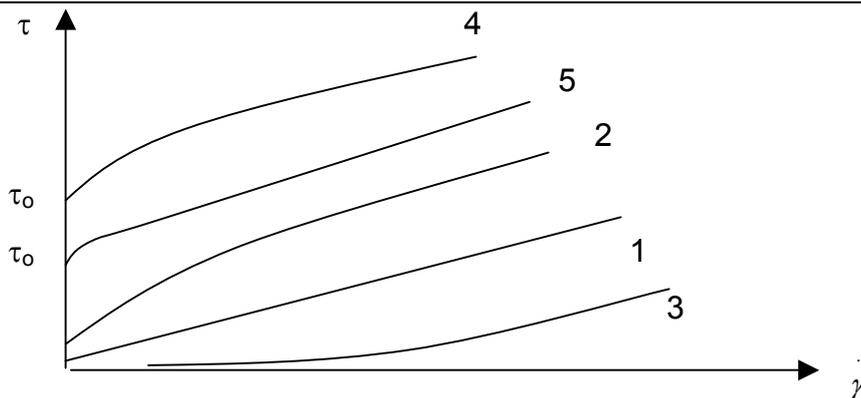


Figura 1.1 Curvas de flujo típicas de fluidos no newtonianos independientes del tiempo.

1- newtoniano; 2 - pseudoplástico; 3 - dilatante; 4 - plástico real y 5 – plástico ideal (Bingham).

Las curvas de flujo son útiles, fundamentalmente, en el diseño de equipos o en la evaluación de instalaciones ya construidas, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que un material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro conocido; para determinar si un equipo ya construido (con el fin de transportar o elaborar un material determinado) puede ser usado con otro material diferente; para clasificar los materiales reológicamente y encontrar el modelo adecuado; para comparar características estructurales o de calidad de un mismo producto obtenido sin producciones “batch” y que hayan sido fabricadas sustituyendo algún componente por otro, de acuerdo a lo reportado por Toose (1995).

1.1.3 Modelos reológicos.

Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas (modelos reológicos) para expresar la relación que existe en estado estacionario entre τ y $\dot{\gamma}$. Todas estas ecuaciones contienen parámetros empíricos positivos, cuyo valor numérico puede determinarse a partir de los datos de la curva de flujo a temperatura y presión constante. Los modelos mas difundidos de acuerdo a lo reportado por Bind (1973), Skelland (1970), Tejeda (1985) y Garcell (1988), son los siguientes:

- a) Modelo de Ostwald de Waele:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \dots\dots\dots (1.2)$$

Esta ecuación de dos parámetros se conoce también como Ley de Potencia. Se utiliza mucho para describir el comportamiento reológico de fluidos seudoplásticos y dilatantes. El parámetro n es el índice de flujo, y es una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material. Para $n < 1$ el fluido es seudoplástico, mientras que para valores mayores que la unidad es dilatante. Para $n = 1$, (ecuación 1.2) se transforma en la ley de Newton, siendo $K = \mu$. El parámetro K es el índice de consistencia, el cual da una medida del grado de viscosidad del material.

Para los fluidos no newtonianos se utiliza el concepto de viscosidad aparente (μ_a). De acuerdo con la (ecuación 1.1) la viscosidad aparente viene dada por la relación:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \dots\dots\dots (1.3)$$

Si en esta expresión se sustituye la ecuación (1.2) se obtiene:

$$\mu_a = \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} \dots\dots\dots (1.4)$$

b) Modelo de Bingham:

$$\tau = \tau_o + \mu_p \left(\dot{\gamma} \right) \dots\dots\dots (1.5)$$

Donde τ_o es el esfuerzo cortante limite o inicial que es necesario vencer para que el fluido fluya, μ_p es la viscosidad plástica. Este modelo se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos ideales, los cuales también se conocen como plásticos de Bingham. Para $\tau_o = 0$ (la ecuación 1.5) se transforma en la ley de Newton, siendo $\mu_p = \mu$.

La viscosidad aparente para los plásticos de Bingham se obtiene sustituyendo la (ecuación 1.5) en la relación (1.4):

$$\mu_a = \mu_p + \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \dots\dots\dots (1.6)$$

c) Modelo de Bulkley – Herschel.

$$\tau = \tau_o + K(\dot{\gamma})^n \dots\dots\dots (1.7)$$

Los parámetros k, n, τ_o tienen el mismo significado que en los dos modelos anteriores. Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales. Para $n = 1$, (la ecuación 1.7) se transforma en el modelo de Bingham, para $\tau_o = 0$, en el modelo de Ostwald de Waele, y para $\tau_o = 0$ y $n = 1$ se transforma en la ley de Newton.

Los tres modelos analizados son los más difundidos en la literatura especializada y los que más se han utilizado en el diseño de sistemas de flujos. No obstante, existen otros modelos que también pueden describir el comportamiento reológico de los materiales no newtonianos con mayor o menor precisión en dependencia de las características de esos materiales, por ejemplo los modelos: 1) de Eyring; 2) de Ellis; 3) de Casson, etc.

Si se combinan (las ecuaciones 1.7 y 1.4), se obtiene la expresión de la viscosidad aparente:

$$\mu_a = \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} + k \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} \dots\dots\dots (1.8)$$

1.2 Tipos de Reómetros (Viscosímetros).

Existen numerosos tipos de reómetros que se han diseñado y comercializado. Solo cuatro de ellos, reúnen las condiciones necesarias para ser usados en la determinación de propiedades reológicas, estas son: a) el de tubo capilar, b) el rotacional de cilindros concéntricos, c) el rotacional en medio infinito, d) el rotacional de cono y plato según , Díaz (1989), Garcell (1988), Perry (1988), Rosabal (1988), Skelland (1970), Tejeda (1985).

Los viscosímetros rotacionales (reómetros) son los mas difundidos para realizar estudios reológicos. En la figura 1 del anexo 1 se muestra un esquema de los elementos básicos de medición de los mismos.

1.3 Estabilidad de las suspensiones. Propiedades superficiales. La doble capa eléctrica. Potencial Zeta. Densidad de carga de las partículas.

Muchas partículas coloidales en contacto con un líquido polar, como por ejemplo el agua, adquieren una carga eléctrica superficial Cerpa (1999), dando lugar a la aparición de las llamadas propiedades superficiales de las suspensiones coloidales, tales como: la densidad de carga de la superficie, el punto de carga cero, los potenciales electrocinéticos, el punto iso eléctrico, etc., que dependen en gran medida del pH de la suspensión.

La carga superficial influye en la distribución de los iones vecinos que se hayan en el líquido de manera que los iones de carga opuestas (contra-iones) son atraídos hacia la superficie y los iones con la misma carga (co-iones) son alejados de la superficie por repulsión.

La teoría de la doble capa eléctrica trata sobre la distribución de los iones, y , por consiguiente, sobre la magnitud de los potenciales eléctricos que existen en la proximidad de la superficie cargada.

Stern propuso un modelo para la doble capa eléctrica, donde plantea que esta está formada por dos partes, una que permanece fija a la superficie

sólida, con un espesor aproximado de un diámetro de molécula, mientras la otra es una capa difusa que penetra en la solución. Establece además, que la capa fija y la difusa están separadas por un plano, llamado plano de Stern. Los iones adsorbidos están localizados en este plano, es decir, entre la superficie y el plano de Stern. Los iones localizados más allá de este plano forman la parte difusa de la doble capa.

La superficie de cizalla es la interfase de contacto entre las fases en el movimiento relativo, el potencial de esta superficie es conocido como el potencial zeta, ξ . (ver figura 2. anexo 1)

En los sistemas dispersos con características coloidales, la densidad de carga superficial de las partículas, σ_0 y el potencial zeta, ξ , son funciones del pH y de la concentración del electrolito indiferente (fuerza iónica) en el medio dispersante,

Tanto σ_0 como ξ constituyen una medida de la estabilidad de la suspensión. La magnitud del pH a la cual $\sigma_0 = 0$ y $\xi = 0$ se denominan: punto de carga cero (p.z.c), y punto izoeléctrico (i.e.p) respectivamente . El punto de carga cero y el punto izoeléctrico coinciden cuando no hay adsorción específica de aniones y/o cationes en la superficie de las partículas.

Mecanismos de carga superficial de las partículas.

Los mecanismos más importantes por lo que la superficie de las partículas pueden cargarse eléctricamente son los siguientes: Ionización, formación de iones complejos, adsorción específica de iones, según, Cerpa (1999).

Ionización: Tiene lugar por la disociación de grupos ionogénicos superficiales, en dependencia del pH de la solución. Por ejemplo, las proteínas poseen grupos carboxilo y amino que se ionizan para dar iones COO^- y NH_3^+ .

Formación de iones complejos: Un modelo simple generalizado propone que los centros activos MOH, presentes en óxidos y oxihidróxidos tales como: la Maghemita, la Goethita, la Gibbsite, la Sílice y otros, dan lugar a la formación de pares de iones MOH_2^+ MO^- que dan carga a la superficie y que interaccionan con los cationes y aniones que se encuentran en el medio dispersante Garcell (1998). En estos óxidos, los centros activos exhiben un comportamiento anfotérico, coexistiendo simultáneamente sitios neutros MOH

y sitios cargados de MOH_2^+ y MOH^- . El tipo predominante de estos sitios depende del pH. Así, a pH inferiores al p.z.c o al i.e.p. las cargas netas superficiales pueden ser positivas y a pH mayores a dichos puntos, negativas. La carga neta viene dada por la diferencia entre el número de sitios MOH_2^+ y el número de sitios MO^- por unidad de superficie. A $\text{pH} = \text{p.z.c}$, predominan los sitios MOH y la concentración de los grupos remanentes de MOH_2^+ y MO^- , son iguales, de manera que la carga superficial de la partícula se hace nula.

Adsorción iónica.

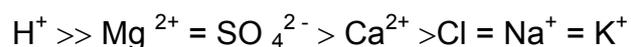
Es posible que la superficie adquiera una carga neta por la adsorción desigual de iones de signos opuestos. Se consideran iones adsorbidos específicamente a aquellos que están unidos a la superficie de la capa de Stern, por fuerzas electrostáticas o de Van der Waals, lo suficientemente fuerte para superar la agitación térmica.

Una de las leyes importantes de la Química de Superficie establece un cierto orden en relación con los iones que pueden ser adsorbidos en la superficie de los óxidos y de otros compuestos de acuerdo a lo expresado por Demai (1996), Torres (1989).

Según esta Ley se adsorberán preferiblemente los iones de mayor valencia, y para los de una misma valencia, los que tengan mayor radio iónico. Esto da lugar a las llamadas series liotrópicas de adsorción. Por ejemplo, la secuencia de afinidad normal (series liotrópicas o de Hofmeister) que presentan muchos óxidos es la siguiente:



Mediante estudios realizados sobre los fenómenos superficiales de la Goethita en agua de mar, por Balistreri y Murray (1979), se logró la serie liotrópica para este mineral.



Puede observarse que la Goethita muestra una serie líotrópica irregular, ya que la adsorción del $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ es contraria a la secuencia de afinidad

normal de Hofmeister presentada arriba. También puede verse que la Goethita tiene gran afinidad por los iones Mg^{2+} y SO_4^{2-} .

La adsorción iónica se puede producir por intercambio de iones contenidos en el sólido y en el líquido circundante. En los procesos de intercambio iónico, la carga neta de la superficie de las partículas no se altera, según Guardia (1994), Torres (1989) y Muñiz (2001), han realizado trabajos con pulpas de laterita de Moa que demuestran las características coloidales de éstas por su alto contenido de partículas finas, y en las que se observan y se miden propiedades superficiales. No se han encontrado trabajos similares acerca de las colas del proceso CARON.

1.4 Efecto de las propiedades superficiales en las características reológicas de las suspensiones concentradas.

En las dispersiones gruesas, donde las partículas son de tamaño relativamente grande, el área superficial total de la fase sólida resulta relativamente pequeña. En estos sistemas el efecto de las propiedades superficiales es prácticamente despreciable. En cambio, en las suspensiones coloidales cuya fase dispersa posee un área superficial grande, el efecto de las propiedades de superficie desempeñan un papel muy importante. Ello se debe, fundamentalmente, a que el comportamiento reológico es afectado grandemente por la densidad de carga superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, ya que estas variables influyen sobre la interacción neta entre las partículas.

La interacción neta es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo. El componente atractivo viene dado por las fuerzas de atracción del Van der Waals y no es sensible a los fenómenos superficiales. El componente repulsivo se debe a las fuerzas repulsivas eléctricas que rodean a las partículas (repulsión de Born).

Cuando la interacción neta es repulsiva se observa un comportamiento newtoniano de la suspensión, en cambio, cuando la interacción neta es atractiva la suspensión puede exhibir un comportamiento pseudoplástico o plástico, debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura espacial. En los trabajos de Cerpa y Col (1997), (1998), (1999) con pulpas lateríticas, así como de Leong y Boger (1990) y con suspensiones de líquido

se ilustra la relación entre los fenómenos de la Química de Superficie y la reología. No se han encontrado trabajos sobre las colas del proceso CARON que traten sobre estos aspectos.

Teniendo en cuenta todo lo hasta aquí explicado, resulta evidente que los efectos de las propiedades superficiales sobre la reología de las suspensiones minerales coloidales es un fenómeno de carácter universal, de manera que los principios que rigen estos procesos pueden ser aplicados independientemente del tipo de mineral que forme la dispersión.

1.5 Interacciones y factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas de las dispersiones minerales.

Cuando un sólido es dispersado en un líquido, la viscosidad de la suspensión que se forma se incrementa. La dispersión puede exhibir comportamiento newtoniano o no newtoniano, en dependencia de las interacciones físicas y químicas que tiene lugar entre las partículas y el líquido, así como de la naturaleza y características de las fases mineralógicas que constituyen el sólido [69].

En la literatura especializada se han analizado diferentes tipos de interacciones, los cuales han sido resumidos por Cheng (1980) dentro de tres categorías diferentes:

- Interacciones hidrodinámicas entre el líquido y las partículas sólidas dispersas, las cuales incrementan la disipación viscosa en la suspensión.
- La atracción entre partículas que da lugar a la formación de flóculos, agregados y estructuras.
- El contacto partícula – partícula, el cual es la causa de las interacciones de fricción.

Además de estas interacciones existe un número de factores que ejercen gran influencia sobre el comportamiento de las dispersiones, tales como: tamaño y distribución de tamaño de las partículas; composición química y mineralógica del sólido; composición iónica del medio dispersante; concentración de la fase sólida; temperatura y pH.

A continuación se analizan brevemente los efectos de los factores más importantes:

Efecto de la granulometría.

En general, las suspensiones de partículas finas exhiben mayores viscosidades que las de partículas gruesas, con excepción de aquellas partículas que poseen propiedades magnéticas con las que ocurre lo contrario, como es el caso de las pulpas de maghemita, según lo expresado por Garcell (1994).

En un trabajo realizado por Garcell (1992), se confirmó que las pulpas acuosas de laterita (limonita) preparadas con partículas mayores de 90 μm no logran formar una estructura y muestran un comportamiento newtoniano; en cambio, las preparadas con mezclas de partículas inferiores a 50 μm forman estructuras que comunican a la suspensión propiedades plásticas, pudiendo ajustarse su curva al modelo de los plásticos Bingham.

Las pulpas de lateritas industriales muestran una distribución granulométrica en la que predominan las partículas con tamaños inferiores a 43 μm , de ahí el comportamiento típico de los plásticos Bingham de estas suspensiones.

Efectos de la temperatura.

En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. Se ha comprobado que la disminución de la viscosidad puede deberse a dos efectos, según Garcell (1993), a) disminución de la viscosidad del medio dispersante; b) debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

Efecto de la composición mineralógica.

Se ha comprobado que las pulpas de mineral laterítico pueden presentar un amplio rango de los valores del punto iso eléctrico (i.e.p.) o de su punto de carga cero (p.z.c) en la dependencia de su composición mineralógica, según lo expresado por Garcell (1993).

Este hecho hace que la viscosidad y estructuración de las pulpas de laterita sean, a su vez, una función del pH.

Los cambios de la composición mineralógica, también influyen sobre las características de sedimentación de las suspensiones de laterita y sobre la estabilidad de las pulpas.

Efecto de la concentración de sólidos.

Por lo general, en las suspensiones diluidas (con valores de concentración volumétrica ϕ , inferior a 10 % en peso de sólidos) el comportamiento de las suspensiones es newtoniano . A medida que aumenta la concentración de sólidos, se incrementan las interacciones de las partículas, con la tendencia a formar flóculos, agregados y estructuras. Como consecuencia de esto, a concentraciones moderadas, la suspensión puede alcanzar el comportamiento Seudoplástico. A concentraciones más altas, los efectos hidrodinámicos son menos importantes, y , dado que las partículas se hayan más cerca una de otras, se forman estructuras tridimensionales que le comunican a la dispersión propiedades plásticas.

En trabajos realizados por Garcell (1993) y por Cerpa y Garcell (1997) con pulpas de lateritas pudo determinarse que, para concentraciones menores de 18 % en peso de sólidos, estas pulpas exhiben un comportamiento Seudoplástico que es prácticamente independiente de su composición mineralógica. Y para contenidos de sólidos en el orden de 22 % en peso se manifiestan propiedades plásticas, y a medida que se incrementa la concentración hasta 45 %, las viscosidades aumentan, dependiendo cada vez más de la mineralogía del sólido. En estas condiciones, las curvas de flujo, pueden ser ajustadas, en algunos casos, al modelo de Bingham, o al de Bulkley – Herschel, en otros.

Efecto del pH.

En las suspensiones con características coloidales, se manifiestan grandemente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales. En las suspensiones minerales, en la que la distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas se manifiestan también estos fenómenos, los cuales son altamente dependientes del pH de la suspensión. Para pH cercanos al punto isoeléctrico, el equilibrio atracción – repulsión entre partículas se desplaza hacia la atracción debido al predominio de las fuerzas de Van der Waals. En estas condiciones la suspensión incrementa su inestabilidad y muestra los máximos valores de viscosidad, debido a la formación de estructuras más fuertes. A pH alejado del i.e.p., son

más importantes las fuerzas de repulsión de carácter electrostático entre las partículas.

Es por ello que las partículas se dispersan más fácilmente, y la suspensión adquiere más estabilidad y exhibe menores valores de viscosidad.

Otro aspecto importante está relacionado con la adsorción de iones en la superficie del sólido, lo cual provoca variación de la carga superficial de las partículas y desplazamiento del i.e.p. y de p.z.c, según Garcell (1994). En general, cuando no hay adsorción específica de iones, los valores del i.e.p y de p.z.c coinciden, sin embargo, cuando se adsorben cationes y aniones los valores del i.e.p y p.z.c experimentan desplazamiento hacia pH más ácidos o más básicos, trayendo consigo cambios en el comportamiento de la suspensión.

El pH juega un papel importante en el proceso de sedimentación de las pulpas crudas. La experiencia indica que en el agua de reboso el pH disminuye su valor con el tiempo de contacto con el mineral laterítico. Novoa (1976) propone controlar el pH de la pulpa para lograr 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 (1983), quien estudió los fenómenos químicos coloidales de la pulpa laterítica, determinando el rango óptimo de pH entre 6,6 – 7,6, cercano al punto izoeléctrico, lo que ha sido comprobado por otro trabajo, entre los que se pueden mencionar el de Ferro (1984); sin embargo Cerpa (1997) demuestra que el punto izoeléctrico 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. Novos (1976) se limitó al estudio de las condiciones de sedimentación variando el pH en un rango muy estrecho (4-62). Por otra parte Valdés (1983) realizó un estudio más profundo a través de mediciones del potencial electrocinética de la partícula por los métodos de macro y microelectroforesis en un intervalo de pH entre 0,3 y 12,4, estableciendo dos puntos izoeléctricos a pH entre 2 y 7 respectivamente; entre estos dos valores, la superficie de la partícula tiene

carga positiva . Para un valor de de pH inferior a 2 o superior a 7, las partículas se cargan negativamente . Cerca del punto izoeléctrico a pH de 6,6 – 7 , no existen fuerzas electrostáticas capaces de separar las partículas entre sí y estas tienden a regularse 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.

Beyris (1997) definió un nuevo indicador denominado Índice de Sedimentación (Ised) como la relación metal ligero/ metal pesado para efectuar la homogenización de los minerales lateríticos, no alterando la ley del mineral para las tecnologías ácidas 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 a 46,61 %.

Se verifica experimentalmente en el caso del índice de sedimentación (Ised) con valores menores que 0,22 para la homogenización de los materiales lateríticos y del Silicato de Sodio como un electrolito en concentraciones (0,001 – 0,0085) g/l, que constituyen vías para el mejoramiento de las condiciones de sedimentación en la planta de espesadores de pulpa de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba” de Moa.

1.6 Consideraciones generales sobre las colas de la “ Empresa Comandante Ernesto Che Guevara”.

La información bibliográfica consultada sobre las características de las colas puede ser resumida de la forma siguiente: Herrera y colaboradores del Centro de Estudios Aplicados al Desarrollo Nuclear (1994), efectuaron una investigación sobre la caracterización de productos parciales y finales de la Empresa René Ramos Latourt “Nicaro”. En este estudio se determinó que la composición química de las colas de Nicaro es bastante similar a la que se obtiene actualmente en la Empresa Ernesto Che Guevara de Moa; sin embargo, se observan grandes diferencias en su composición mineralógica , por ejemplo, en todas las muestras analizadas, la fase principal es la

magnetita con un contenido de 64 – 90% en peso. En cambio en el proceso CARON de Moa la fase principal es la maghemita con un contenido en el orden de 63 – 83 % en peso, esta diferencia se atribuye a las modificaciones tecnológicas producidas en la fábrica Ernesto Che Guevara de Moa, que puede haber ocasionado la oxidación de la magnetita transformándose esta en maghemita, teniendo en cuenta que una vía tanto natural como sintética de obtención de maghemita es precisamente mediante la oxidación de la magnetita. (Ver anexo 1 - tablas 1 y 2).

1. 7 Propiedades magnéticas de los materiales.

Muchos óxidos de hierro exhiben en mayor o menor grado propiedades magnéticas según lo expresado por Costa (1996). Estos materiales pueden adquirir las propiedades magnéticas por la acción del campo magnético natural de la Tierra ó del campo aplicado de un equipo. Dependiendo de la naturaleza del óxido de hierro (las características de su estructura atómica), de la temperatura, de la intensidad del campo magnético aplicado (el campo magnético natural de la Tierra es aproximadamente de 0.2 Gauss) y del tamaño y forma de las partículas, las características magnéticas adquiridas pueden variar de uno a otro material. Así, por ejemplo, la hematita a 260°k es antiferrimagnética y a 956° k es débilmente ferrimagnética. Así mismo, la maghemita a tamaños menores de 10 nm es súperparamagnética(no exhibe propiedades magnéticas) en cambio, para dimensiones mayores, a temperatura ambiente, es ferrimagnética.

Entre los óxidos de hierro a temperatura ambiente, y para dimensiones mayores a 10 nm, la maghemita y la magnetita son las que exhiben propiedades magnéticas apreciables (ferromagnéticas), siendo mas notables estas características en la magnemita. Las partículas de estos minerales poseen formas elipsoidales en rotación y constituyen pequeños imanes naturales.

En el trabajo de Garcell y col. 1998 se determinaron las características reológicas y magnéticas de suspensiones de nanopartículas de maghemita de diferentes formas, tamaño y distribución de tamaño. Se observa que sus fuerzas coercitivas y los magnetismos máximos y remanentes adquiridos se incrementan con el aumento del tamaño de las partículas. Ello provoca un

incremento en la viscosidad y en la magnitud del τ_0 , contrariamente a lo que ocurre con los materiales no magnéticos en los que sus propiedades reológicas disminuyen con el aumento del tamaño de sus partículas.

No se han encontrado trabajos relativos a los aspectos tratados para las suspensiones de las cola del proceso CARON. Sin embargo, dado el hecho de que en este estudio se ha podido determinar que la fase mineralógica principal de estas pulpas es la maghemita – magnetita, es de esperar que exhiba propiedades magnéticas y comportamientos similares que las suspensiones de esos minerales puros.

1.8 Parámetros de hidrotransporte en el flujo de hidromezclas por tuberías.

El análisis de las investigaciones realizadas por diferentes autores Dyurano (1952), Ibenskii (1957), Kalinin (1965) , Mijailova (1966), Skelland (1970), Karasik (1972), Gusarov (1972), Karasik (1972), Pérez (1970,1983,1984), Parnoskaya (1976,1987), Smoldriev (1980, 1986, 1989), Nuruk (1979,1985), Shekadeshvarsheischili (1981), Alexandro (1986), Izquierdo (1995), Darby (2000), G y R (1995), Suárez (1998), Díaz (1999) muestran que las mismas están dedicadas fundamentalmente a:

- 1.- Estudio de la estructura dinámica de diferentes flujos de suspensiones y de las peculiaridades de los regímenes de movimiento del flujo portador de partículas sólidas. Sobre esta base se construye el modelo físico y se deduce la ecuación de equilibrio dinámico y la obtención de la dependencia de cálculo a partir de la utilización de datos experimentales.
- 2.- Estudio de las regularidades del movimiento de los flujos con partículas en suspensión, la influencia de partículas sólidas sobre su estructura cinemática y establecer el enlace de las características locales e integrales.
- 3.- Determinar la magnitud de la energía que el líquido le trasmite a las partículas sólidas de diferentes categorías. Este método se fundamenta sobre el principio de considerar las fuerzas de interacción del líquido y las partículas sólidas suspendidas en él.

De lo explicado anteriormente se observa, que la solución teórica de los principales problemas del hidrotransporte es posible obtenerla solo de las ecuaciones de la hidrodinámica. De igual forma, en relación con la

complejidad de obtención de hidromezclas, se puede utilizar la teoría semiempírica, la que se fundamenta sobre diferentes representaciones del movimiento del flujo de las hidromezclas y de la variación de la influencia de las partículas en el perfil de distribución de velocidades. Por ello, el segundo aspecto encuentra su aplicación práctica y ha obtenido desarrollo en trabajos realizados por la mayoría de los investigadores.

Como es conocido, durante el movimiento de un líquido homogéneo a pequeñas velocidades por la sección de la tubería se subordina a la ley parabólica.

$$V = V_{\text{máx}} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (1.9)$$

Donde:

R – radio de la tubería

r - distancia del eje.

$V_{\text{máx}}$ – velocidad máxima para $r = 0$.

En el régimen turbulento, la distribución de velocidades para líquidos homogéneos se describe por la ley logarítmica propuesta sobre la base de la teoría semi empírica de Prandtl – Karman.

$$\frac{V_{\text{máx}} - V}{V_*} = \frac{1}{\chi} \cdot \ln \frac{r}{r - y} \dots\dots\dots (1.10)$$

Donde:

χ - constante de Karman;

y – distancia desde la pared del tubo hasta el punto analizado;

$$V_* = \left(\frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2} \text{ - velocidad dinámica, donde:}$$

τ

τ - tensión de rozamiento en la pared del tubo.

En varios trabajos según, Smoldriev (1966, 1980) , Karasik (1976), Agustín (1983), Vennard (1986), muestran que la misma se muestra que debido a la presencia mediante la existencia de gran cantidad de partículas pequeñas puede variar el régimen de flujo de la suspensión. Desplazándose a lo largo de la línea del flujo con velocidades prácticamente igual a la velocidad del

líquido, disminuyendo la resistencia. Las partículas de tamaños medios, bajo la acción de diferentes fuerzas se separan de ellas y las partículas más grandes se separan de la frontera sólida, lo que provoca la destrucción de la estructura del flujo, varían las características de las pulsaciones y la intensidad de las turbulencias. Como resultado de esto surge el desplazamiento transversal de las partículas sólidas, variándose la interacción mecánica en el flujo y modificándose el perfil de distribución de velocidades en comparación con un líquido homogéneo.

Smoldriev y Col.(1980), sobre la base del análisis de los resultados obtenidos en diversos trabajos realizados por ellos y por otros autores con hidromezclas de diferentes materiales de granulometrías y densidades variadas (arcilla, carbón, caolín, desechos de la industria metalúrgica, materiales de la construcción y otros), a distintos regímenes de flujo, rangos de temperatura y diámetros de las tuberías lograron establecer y resumir algunas regularidades en las características del flujo de los productos, Así, se pudo comprobar que, no obstante las diferencias observadas en las propiedades físico – mecánicas de los materiales y en las características del medio dispersante, existen peculiaridades comunes que describen el flujo de las hidromezclas estudiadas, en relación con sus comportamientos reológicos con las pérdidas hidráulicas, con los perfiles de velocidad en diferentes regímenes de flujo (estructural, transitorio y turbulento).

Los resultados obtenidos por pulpas formadas por materiales de diferentes formas, tamaño y granulometría, no responden a una expresión única, lo que a obligado a dividir las hidromezclas en diferentes grupos, la más utilizada es la (159), que clasifican estas pulpas según el tamaño de las partículas de la siguiente forma:

Hidromezclas	Tamaño, mm
Muy gruesas	10 – 300 mm
Gruesas	2/3 – 10 mm
Dispersas gruesas	0,15 – 2/3
Dispersas finas	0,05 – 0,15 /0,2/
Estructurales	0,05 – 0,005
Coloidales	0,005

Esta clasificación en nuestra opinión más cerca que cualquier otra responde a las tareas de hidrotransporte y refleja muy bien múltiples resultados experimentales y será la utilizada en este trabajo.

A partir de esta clasificación las pulpas de hidrotransporte por el proceso CARON, se encuentran en el grupo de las finamente dispersas hasta las coloidales y se hace necesario investigar los factores que inciden en la variación de las propiedades físico – mecánicas de las hidromezclas por las posibles influencias que pueden tener las características reológicas en los parámetros de hidrotransporte y en particular factores tales como: concentración, tamaño, granulometría, composición mineralógica y otras.

Las investigaciones experimentales realizadas hasta el presente en hidrotransporte de minerales sólidos se refieren fundamentalmente a la determinación de las pérdidas específicas por rozamiento, la velocidad crítica, densidad de la pulpa y régimen racional que en última instancia determinan los indicadores técnico – económico de hidrotransporte.

El régimen con que se puede transportar estas mezclas varía desde el puramente laminar hasta el puramente desarrollado, en la (figura 2, curva 1 del anexo1) se observa, que la hidromezcla se desplaza prácticamente como si fuera un cuerpo sólido y ocupa toda la sección de la tubería.

Con el aumento de la velocidad del movimiento los enlaces estructurales no logran restablecerse y el flujo ocurre con una viscosidad constante y pequeña, prácticamente no se rompe la estructura. A este régimen se le llama régimen de flujo estructural. Para la curva de flujo, la recta del flujo $i = f(v)$ se expresa por la ecuación lineal Svedova – Bingham, lo que posibilita calcular el régimen de flujo establecido (el perfil de velocidades establecidas en condiciones de desplazamiento homogéneo). Señalamos, que para valorar este régimen se puede utilizar además el parámetro de viscosidad efectiva μ_e , la cual disminuye con el incremento del gradiente de velocidad. En este caso los cálculos se complican. Unido a esto, la utilización del esquema indicado de flujo viscoso plástico posibilita con facilidad resolver las tareas prácticas. Para describir el flujo de hidromezcla en este régimen se utilizan

dos parámetros independientes: la viscosidad η y la tensión dinámica límite o límite dinámico de fluidez τ_d .

Durante la transición del flujo laminar al turbulento, el valor de la viscosidad estructural disminuye con el aumento de las tensiones tangenciales (o el gradiente de velocidad), sin embargo cuando se alcanza el límite dinámico de fluidez, la viscosidad estructural permanece prácticamente constante. Por cuanto en la práctica en la mayoría de los casos se logra el régimen estructural, lo que mayor interés representa es el estudio de la influencia de la concentración de sólido, temperatura, sus propiedades superficiales y otros factores que influyen en los parámetros reológicos

La curva 2 (figura 2b del anexo 1), caracteriza la distribución de velocidades en un flujo de una suspensión de caolín, correspondiente al régimen de movimiento estructural. El perfil de velocidades justifica la existencia de zonas características en el flujo cercano a la pared con estructura y distribución de velocidades parabólicas, y la zona central con una estructura constituida (núcleo del flujo); de igual forma mantiene una deformación pequeña. A medida que aumenta la velocidad media, el espesor de la zona cercana a la pared con estructura destruida se aumenta. Perfiles de velocidades semejantes se han obtenido para suspensiones de arcilla, carbón, materiales de la construcción, etc. Ellos corroboran; que el régimen de flujo plástico viscoso de Svedova – Bingham corresponde con el perfil de velocidades real. El análisis preliminar demuestra; que el espesor de la capa cercana a la pared con estructura destruida aumenta con rapidez, pero el grado de destrucción de la estructura de la hidromezcla se encuentra en dependencia directa a las dimensiones del flujo.

Con el aumento del gradiente de velocidad en el flujo la hidromezcla entra en un proceso de destrucción de la estructura, después del cual el aumento posterior del gradiente de velocidad no provoca una caída considerable de la viscosidad. Es necesario señalar, que para una serie de mezclas el límite de destrucción de la resistencia ocurre en el régimen transitorio, cuando el flujo se mueve como un líquido homogéneo con una viscosidad mínima $\mu_{\min.}$. La zona lineal de la curva reológica de la mezcla estructural, fluye a tal régimen

que pasa, a través del inicio de la ordenada; por eso la viscosidad del sistema se determina como newtoniano. Esta misma viscosidad se mantiene en el régimen turbulento.

Cuando es alta la viscosidad del medio (es alta la concentración de la fase sólida) con frecuencia no se presenta la posibilidad de alcanzar un grado límite de destrucción de la estructura antes de que aparezca la turbulencia o la destrucción del flujo suave. Por eso para algunas

hidromezclas de alta concentración no existe el régimen turbulento. Así, las mediciones realizadas con suspensiones de arcilla demuestran un paso directo del régimen estructural al régimen de flujo turbulento sin pasar por la zona considerada de velocidades transitorias (o existe una zona muy pequeña).

Esta peculiaridad es característica para suspensiones con elevado valor de concentración de la fase sólida y un alto valor de τ_0 . Este factor justifica también los experimentos realizados con suspensiones de polvo y granos de minerales.

En algunos casos, mediante el movimiento de suspensiones fibrosas (de masa de papel, turba, sedimentos de agua subterráneas a pequeñas concentraciones) se ha observado la intersección de las curvas de flujo de la suspensión con las curvas del agua $i = f(v)$; es decir en algunas zonas las curvas $i = f(v)$ se distribuyen por debajo, fundamentalmente como resultado de la disminución de la densidad del medio. Sobre el régimen de movimiento de tales suspensiones se puede juzgar por los datos medidos por E. Gaize, X. Lanke, representado en (figura 5, anexo 1), donde, se observa un paso rápido del régimen estructural al régimen de flujo turbulento, por ejemplo las curvas 2 – 4. Ello se explica por la variación de las características del material (desecho de papel cartón y otros) cuando se le adiciona agua hasta alcanzar una concentración volumétrica 8.6 %.

Análisis del transporte hidráulico en el proceso carbonato amoniacal en la Industria del níquel.

El proceso carbonato amoniacal en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa, el transporte de pulpa se realiza desde los tanques de

contacto en la entrada de la planta de lixiviación hasta la evacuación final de las colas.

En el proceso de transportación de acuerdo con la densidad de las pulpas y con una misma granulometría varían los parámetros de transportación y su régimen de trabajo, esta situación requiere de un estudio reológico para la determinación del tipo de hidromezclas, por otra parte la presencia de amoníaco en las colas y su alto grado de solubilidad Daniel, Alberty (1963), hace que con presiones relativamente bajas la cantidad disuelta en la pulpa sea relativamente alta, la caída de presión provoca el desplazamiento de una fase gaseosa que pueda ocupar una sección que hace variar los parámetros de flujo. En la práctica se crea además de la fase sólida y líquida, una fase gaseosa adicional, en esencia el flujo de la hidromezcla en la planta de recuperación de amoníaco está afectado, tanto por las posibles propiedades reológicas de las mismas como por la presencia de la fase gaseosa.

Otra forma de aplicación del transporte hidráulico se encuentra en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, donde se utiliza el transporte de pulpas lateríticas por gravedad y a presión. El transporte por gravedad se realiza desde la planta de preparación de pulpa hasta los espesadores de pulpa, con una suspensión de 25 – 30 %de peso en sólido, por una tubería de hormigón de 610 mm de diámetro y 5129 m de longitud. El transporte a presión se realiza desde los espesadores de pulpa hasta la planta de lixiviación con ayuda de bombas centrífugas, a través de una tubería de 460 m de longitud y 508 mm de diámetro.

Shichenko (1951) Sobre la base de las investigaciones experimentales estableció; que en el movimiento de mezclas de arcilla por tuberías se presentan dos regímenes de flujo, el estructural y turbulento. Como resultado de las investigaciones fue establecido, que la distribución de velocidades por la ecuación de Svedova – Bingham, ocurre solo a velocidades del flujo hasta $V= 0,6$ m/s.

Ivenski (1957) mediante el estudio de los regímenes de movimientos de las mezclas de materiales de la construcción por tuberías de diferentes diámetros estableció, que existe el régimen estructural en los límites de velocidades hasta 0.5 m/s, se observa el régimen estructural, que se acompaña de la

rotación de los granos, lo que conlleva a la destrucción de los enlaces estructurales.

En el trabajo de Iakovlev (1962), se exponen los resultados de estudios experimentales, los cuales demuestran que, el movimiento de líquidos estructurales por tuberías

se caracteriza por la presencia de un núcleo del flujo, que se mueve con velocidad constante como un cuerpo compacto.

Pakrovskaya (1985) , realiza un amplio estudio técnico – práctico donde abarca temas muy importantes y novedosos entre los que se destacan: características, parámetros y regímenes de transportación de hidromezclas de diferentes grados de saturación; métodos para la preparación de pulpas para el hidrotransporte, desgaste hidroabrasivo de los sistemas de tuberías durante la transportación de materiales abrasivos; fiabilidad del trabajo de las instalaciones de hidrotransporte; métodos de control y regulación de los parámetros de hidrotransporte de los golpes hidráulicos; valoración económica de la efectividad del transporte hidráulico.

Pérez Barreto; en su trabajo [1979], sobre la base de las investigaciones teórico experimentales y el análisis de otros autores determinó los parámetros y estableció los regímenes racionales de hidrotransporte de minerales de hierro y concentrados . Elaboró las recomendaciones sobre la modelación de las suspensiones, selección de los regímenes efectivos y la metodología para la determinación de los parámetros de materiales sólidos de alta densidad en flujos de alta densidad (hasta 40 % de sólido por volumen).

Suárez en su trabajo 1998, hace referencia a la elaboración del modelo físico – matemático del movimiento de suspensiones de serpentinita blanda por tuberías, basado en los resultados de las investigaciones de las propiedades reológicas , la determinación de las regularidades de la variación de los coeficientes de resistencia hidráulica en dependencia de la concentración másica en el intervalo de 40 a 80 % en régimen laminar; la determinación de las pérdidas específicas de presión para el movimiento de dichas suspensiones en régimen turbulento; la determinación de las

ecuaciones para la obtención de la velocidad crítica y la velocidad límite de caída de los granos de serpentinita dura.

Izquierdo en su trabajo (1989) sobre la determinación de los parámetros y regímenes de hidrotransporte de mineral laterítico aplicable a las condiciones del proceso productivo de la Empresa comandante Pedro Soto Alba determinó las propiedades físico – mecánicas de las hidromezclas, formuló el modelo físico – matemático del flujo de las pulpas lateríticas; comprobó que durante el flujo dependiendo de la velocidad de las pulpas y de la concentración del sólido, se presentan los regímenes estructural, transitorio y turbulento, obtuvo las dependencias para determinar el coeficiente de resistencia hidráulica para el movimiento del régimen estructural y las pérdidas hidráulicas durante el movimiento de la hidromezcla en régimen turbulento.

1.9 Requerimientos energéticos para el transporte de hidromezclas sólido - líquido no newtonianas por tuberías. Balance de energía mecánica.

Ecuación de balance de energía mecánica.

Para el diseño de sistemas de tuberías se requiere conocer la relación entre los gradientes de presión ($\Delta P/L$), requeridos para lograr flujos volumétricos, (Q), en un intervalo de diferentes diámetros, (D), del tubo, a distintas temperaturas de operación y diferentes propiedades físicas de los fluidos.

Las expresiones que relacionan las variables señaladas en el régimen laminar, para los modelos reológicos más difundidos en la literatura, así como las limitaciones que puedan tener en su precisión en los sistemas de flujo con diámetros relativamente grandes. De ahí, que, en los cálculos de ingeniería, se prefiera hacer uso de las expresiones que relacionan el factor de fricción de Fanning con el número de Reynolds y con otros números adimensionales, tanto en régimen laminar como en turbulento Skelland (1970), Rosabal (1988).

Una de las leyes fundamentales de la mecánica de los fluidos se expresa mediante la ecuación de balance de energía mecánica aplicada al sistema de flujo en cuestión Skelland (1970), Rosabal (1988) . En la mayoría de los textos de ingeniería química, el balance de energía mecánica para

condiciones estacionarias de flujo se conoce como ecuación de Bernoulli, y se ilustra sus aplicaciones para el caso particular del flujo newtoniano.

En el caso específico del flujo de suspensiones minerales no newtonianas también se aplica el balance de energía mecánica en un sistema de flujo, al cual entra el fluido por un plano (1) y sale por un plano (2).

$$\frac{Z_1 \cdot g}{g_c} + \frac{P_1}{\rho} + E_{C_1} = \frac{Z_2 \cdot g}{g_c} + \frac{P_2}{\rho} + E_{C_2} + W_s + \Sigma F \dots\dots\dots (1.11)$$

Donde:

Z_g - Es la energía potencial para una altura vertical referida a un plano horizontal de referencia tomado arbitrariamente, m^2/s .

$\frac{P}{\rho}$ - Es la energía de presión hidrostática, m^2/s^2 .

E_C - Es la energía cinética medida por unidad de masa, m^2/s^2 .

W_s - Es el trabajo por unidad de masa (como trabajo por una bomba sobre el fluido).

ΣF - Es la energía mecánica convertida a energía térmica como resultado de las fricciones del fluido, m^2/s^2 .

$$\Sigma F = \frac{\Delta P_f}{\rho} + (\text{pérdidas por fricción por unidad de masa debido a los efectos de entrada, de accesorios, de equipos, etc}). \dots\dots\dots (1.12)$$

En la expresión (1, 13), ΔP_f es la caída de presión por fricción asociada con el flujo totalmente desarrollado a través del sistema de flujo. El término $(\Delta P_f / \rho)$ se refiere a los tramos de tubería rectos, y por lo general, es el componente dominante en la mayoría de los sistemas de tuberías, excepto en aquellos casos en los que esos tramos sean cortos y el número de accesorios y válvulas sea grande.

Para el flujo no newtoniano, los términos E_C y ΣF dependen de la naturaleza reológica del fluido, y, por tanto, de los parámetros característicos del modelo reológico que describe la curva de flujo.

El término de pérdidas de fricción, ΣF , puede estimarse mediante la definición siguiente [4].

$$\Sigma F = \frac{1}{2} \cdot \langle V \rangle^2 \cdot e_v \dots\dots\dots (1.13)$$

En la que e_v (adimensional) es el factor de pérdidas de fricción, el cual es una función del número de Reynolds y de las relaciones geométricas del sistema de flujo.

Para el flujo por tuberías rectas circulares,

$$e_v = 4f \left(\frac{L}{D} \right) \dots\dots\dots (1.14)$$

Donde f es el coeficiente de fricción de Fanning.

Combinando las expresiones (1.14) y (1.15), se obtiene:

$$\Sigma F = 2f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\langle V \rangle^2}{g_c} \dots\dots\dots (1.15)$$

La caída de presión en una tubería para materiales que siguen el modelo de Bingham (plásticos ideales) se expresa en términos de variables de operación y de los parámetros reológicos y geométricos del sistema de flujo:

$$\Delta P = \phi \left(D, L, v, \rho, \mu_p, \tau_o, g \right) \dots\dots\dots (1.16)$$

Aplicando el análisis dimensional y la correspondiente manipulación de los términos, se obtiene una relación entre variables adimensionales que agrupan las variables de la expresión 1.17. Así, se llega a la expresión que relaciona al factor de fricción (f) con los números de Reynolds (Re) y de Hedstrom (He) Skelland (1970) y de Froude (Fr):

$$f = \frac{D(\Delta P)/4L}{\rho v^2/2} = \phi \left[\left(\frac{Dv\rho}{\mu_p} \right), \left(\frac{D^2 \rho \tau_o}{\mu_p^2} \right), \left(\frac{v^2}{gD} \right) \right] \dots\dots\dots (1.17)$$

Donde el $Re = \left(\frac{Dv\rho}{\mu_p} \right)$; $He = \left(\frac{D^2 \rho \tau_o}{\mu_p^2} \right)$; $Fr = \left(\frac{v^2}{gD} \right)$

Para hidromezclas que no contienen gases y tuberías llenas del fluido completamente, el Fr no tiene influencia. Por tanto, para esos casos, la ecuación (1,19) se puede representar en un gráfico de f vs Re con He como parámetro en la región laminar. Para flujo altamente turbulento se obtiene una curva prácticamente independiente del número de He . La región laminar y la turbulenta y es función del Re y del He .

En un trabajo publicado por Darby (2001) se proponen las expresiones que describen la ecuación (1,19) para las tres regiones:

Región Laminar

$$F_L = \frac{16}{Re} \left[1 + \frac{He}{6Re} - \frac{1}{3} \frac{He^4}{3f^3 Re^7} \right] \dots\dots\dots (1.18)$$

Región turbulenta desarrollada:

$$F_T = \frac{10^c}{Re^{0,193}}$$

$$C = - 1,378 \left[1 + 0,14e^{-2,9 \cdot 10^{-5} He} \right] \dots\dots\dots (1.19)$$

Región de transición

$$F = \left(f_L^\beta + f_T^\beta \right)^{1/\beta} \dots\dots\dots (1.20)$$

$$\beta = 1,7 \frac{40000}{R_e}$$

El sistema de ecuaciones (1.19,1.20,1.21) se describe gráficamente en la (figura 5 del anexo1)

Para sistemas trifásicos (sólido – líquido – gas) es necesario tener en consideración el numero de Fr. Este tipo de sistema es poco tratado en la literatura, sobre este aspecto se abordará en el próximo epígrafe.

1.10 Características del flujo de hidromezclas trifásicas por tuberías.

En muchas industrias químicas y metalúrgicas se manipulan suspensiones trifásicas (conformadas por una mezcla sólido-líquido-gas). En este epígrafe se analizan los modelos físicos sobre sistemas trifásicos que fluyen por tuberías es la única fuente bibliográfica encontrada que aborda esta temática, es el trabajo de Mijailov (1994) , ya que no se dispone de otras fuentes sobre este tema. El tema de flujo trifásico es poco tratado en la literatura.

Las experiencias demuestran que las estructuras del movimiento de las mezclas dependen de la fracción volumétrica del gas y de la velocidad de la fase líquida en la mezcla y es independiente de la forma de entrada del gas en la tubería.

En el caso de velocidades de la fase líquida, por tuberías, que no excedan de 3 – 3.5 m/s, se pueden formar las siguientes estructuras estables del movimiento de la hidromezcla trifásica.

Estructura emulsionada: Está compuesta por burbujas de gas relativamente pequeñas, la cual está más o menos uniformemente distribuida en los límites del área del flujo de la hidromezcla. Esta estructura es posible cuando la fracción volumétrica del gas en la mezcla es relativamente baja.

En una primera aproximación se considera, que la estructura emulsionada en tubería vertical será estable cuando.

$$C \leq 0.05F_r^{0.2} \dots\dots\dots (1.21)$$

Donde: C – fracción volumétrica del contenido de gas en la mezcla.

Fr – el número de Froude.

Estructura lamelar (también se le denomina obturada) se representa por capas alternadas de la fase líquida y del gas, las cuales ocupan prácticamente toda la sección de la tubería. El gas, en este caso se mueve con grandes burbujas, las cuales ocupan toda la parte central de la sección de la tubería y se asemeja por su forma a un proyectil , que atraviesa la fase líquida. Las partículas sólidas, contenidas en la mezcla, por la acción de las burbujas de aire se acumulan junto con el agua a las paredes de la tubería.

La estructura lamelar en dependencia del volúmen contenido de aire y la velocidad de la mezcla posee algunas peculiaridades con diferentes características de flujo.

El límite superior de la existencia de la estructura lamelar estable en una tubería vertical se puede considerar para

$$C = 0.5F_r^{0.1} \dots\dots\dots (1.22)$$

En las tuberías horizontales, cuando es constante la entrega de gas en el flujo de obturación estacionario, se observa que ocurre la separación de la mezcla: la parte superior (no mayor de la mitad) de la tubería esta ocupada por gas, y la inferior - con mayor velocidad se mueve la hidromezcla no gasificada.

Estructura de barra o película. Es característica para mezclas con alto contenido de gas. El gas ocupa completamente la parte media de la sección

por toda la tubería, las fronteras entre diferentes burbujas de la estructura lamelar esta destruida, y en la tubería se mueve como si fueran dos flujos independientes: por la parte central – el gas, a lo largo de la pared – el flujo de un anillo fino de la fase líquida. Por el limite superior esta estructura se puede tomar.

$$C = 0.65F_r^{0.05} \dots\dots\dots (1.23)$$

Resistencia hidráulica durante el movimiento de la mezcla trifásica.

La alta complejidad de la estructura y dinámica del movimiento del flujo de la mezcla trifásica no posibilita por ahora determinar las resistencias hidráulicas por vía teórica. Por eso todas las dependencias para la determinación de las pérdidas de presión durante el movimiento de las mezclas trifásicas poseen un carácter empírico.

Para tuberías horizontales la caída de presión total por unidad de longitud se puede escribir en forma:

$$\Delta P_T = \Delta P_o + \Delta P_g \dots\dots\dots (1.24)$$

Donde ΔP_T – caída presión total resultante.

ΔP_o – caída presión de la hidromezcla por efectos de fricción.

ΔP_g – caída de presión por aceleración de la mezcla como resultado de la expansión del gas.

Según la (ecuación 1.34), la caída de presión en la tubería, para un sistema trifásico, es mayor que para un sistema bifásico sólido – líquido en iguales condiciones de operación debido al efecto que ejerce la presencia y el movimiento de la fase gaseosa .

Como se verá en el capítulo III, al parecer el modelo físico que mejor se ajusta al flujo de las colas es el de estructura lamelar u obturada, de acuerdo con lo observado durante los ensayos experimentales en las tuberías horizontales de la instalación semi - industrial utilizada.

En el estudio realizado por Hurtado (1999), éste hace un análisis y evaluación de las afectaciones ambientales que provocan cada una de las zonas que componen el complejo industrial “Cdte. Ernesto Che Guevara”, donde los impacto de mayor influencia se muestran en la figura 6 ,anexo 1)

La instalación de bombeo de los desechos lixiviados (colas) presentan fallos y averías producto al desplazamiento de gases y altas temperaturas, las bombas extraen en estado cavitacional lo que provoca ruidos, bajos rendimientos de la instalación, consumo de energía elevado y desprendimiento de gases al entorno que afecta directamente la salud de los trabajadores.

1.11 Conclusiones del capítulo I.

- En las etapas de explotación de la instalación industrial de hidrotransporte se confrontan dificultades con el trasiego de los desechos lixiviados (colas del proceso CARON), así como problemas de eficiencia tecnológica de dicha instalación.
- En la bibliografía consultada se hace referencia en general, al estudio de las propiedades superficiales y de flujo de suspensiones acuosas con partículas de Maghemita, pulpas minerales (de lateritas férricas, bentonitas, arcilla, cemento, etc.) así como los polímeros. No se ha encontrado información sobre estos aspectos para los desechos lixiviados (colas) de las industrias que trabajan bajo la tecnología del proceso CARON, con las cuales se han confrontado ciertas dificultades en su manipulación y transportación con los sistemas de hidrotransporte existentes en las empresas que operan con el mencionado proceso tecnológico.
- En la literatura no reencontró información sobre la influencia que tienen diferentes factores tales como: propiedades magnéticas, granulometría, mineralogía concentración de la fase sólida, temperatura y pH de la suspensión sobre el hidrotransporte de las suspensiones de las colas y sus requerimientos energéticos.
- En la bibliografía consultada es insuficiente la información acerca del flujo con tres fases de las colas a través de tuberías de sistemas con tres fases, de ahí la necesidad del estudio experimental de este sistema, en particular.
- Entre los óxidos de hierro, la magnetita y la maghemita son los minerales que a temperatura ambiente exhiben propiedades magnéticas

apreciables y sus partículas se comportan como pequeños imanes naturales, no se han encontrado trabajos que traten este aspecto del magnetismo para las colas del proceso CARON. No obstante los resultados obtenidos por varios autores sobre las características magnéticas de las suspensiones de maghemita sirven como punto de referencia para el análisis de las pulpas de cola en este aspecto.

- Existe un manejo ambiental inadecuado de las instalaciones de hidrotransporte y deposición de las colas durante todo el periodo de explotación, que ha originado afectaciones ambientales severas relacionadas con el vertimiento de residuales sólidos (colas del proceso CARON), así como emisiones a la atmósfera de grandes volúmenes de material particulado (polvo) y gases, fundamentalmente amoniaco y dióxido de carbono.

1.12. Planteamiento del problema.

El estudio bibliográfico ha mostrado una serie de aspectos que no se encuentran actualmente deslucido y el análisis realizado muestra la necesidad de efectuar investigaciones teóricas y experimentales que permitan en última instancia obtener una metodología de cálculo técnico y científicamente argumentada para la evaluación de las instalaciones existentes, el diseño y ejecución de nuevos proyectos.

El sistema de hidrotransporte en la Empresa Ernesto Che Guevara presenta fallas y averías producto al desplazamiento de gases y altas temperaturas, las bombas entran en régimen cavitacional lo que provoca ruidos, bajo rendimiento de la instalación, consumo de energía elevado, lo que incrementa los costos o la amortización.

A los dos problemas señalados anteriormente se le agrega la necesidad de recomendar un régimen de trabajo que evite la cavitación y disminuya los consumos energéticos.

Para lograr el objetivo propuesto es necesario resolver las siguientes tareas:

- 1 - Análisis crítico de la fuente.
- 2 – Determinar las propiedades físico – mecánica de las colas.
- 3 – Elaborar y fundamentar el modelo físico – matemático para el flujo de pulpa de cola a alta temperatura.

- 4 – Realizar las investigaciones teóricas y experimentales de los principales parámetros hidráulicos de las colas.
- 5 – Elaborar la metodología de cálculo y proyección del hidrotransporte de las colas a partir del modelo matemático que se obtenga.
- 6 – Elaborar la recomendaciones en particular definir el régimen de trabajo para la reducción del consumo energético y del gasto de las inversiones.

CAPITULO II. CARACTERIZACION DE LAS COLAS.

2.1 Áreas del proceso tecnológico que dan origen a las muestras de estudio en el presente trabajo.

En la figura 2.1 se presenta un esquema muy simplificado de la mayor parte del proceso tecnológico de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa. En el mismo se aprecia la ubicación de la Planta de Recuperación de Amoniaco y del pozo de cola que son las fuentes de obtención de las muestras en la presente tesis.

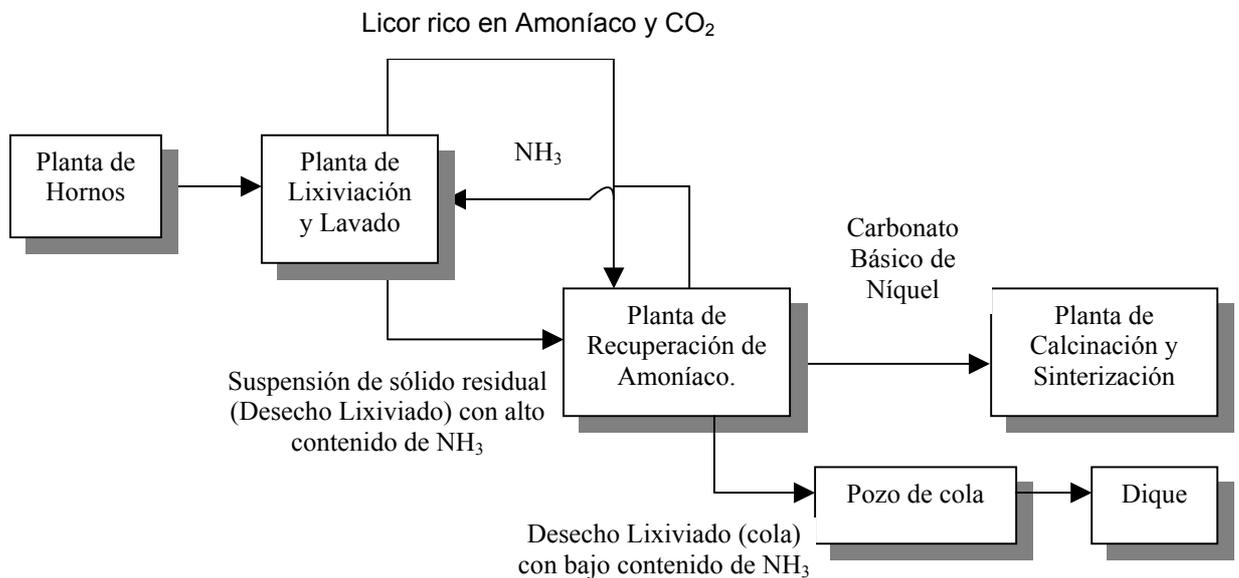


Figura. 2.1 Esquema de la parte del Proceso Tecnológico donde se obtienen, transportan y almacenan los desechos lixiviados (colas).

2.2 Materiales y técnicas utilizadas.

Se estudiaron las pulpas correspondientes a 6 muestras compósitos industriales de desechos lixiviados (colas) del proceso CARON de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, que transitan por el proceso de recuperación de amoniaco. Con vistas a obtener dichas muestras (sólido seco) se tomaron distintos volúmenes de sus hidromezclas en el pozo cola de la planta de Recuperación de Amoniaco y en la descarga de las líneas

que llegan al dique, en diferentes períodos con la finalidad de lograr una mayor representatividad de las mismas en la determinación de las características químicas, granulométricas, mineralógicas y magnéticas del mineral residual que se obtiene en las etapas del proceso carbonato amoniacal, donde dicho material es transportado mediante un sistema de flujo. Estos volúmenes de hidromezclas tomados fueron desecados, posteriormente. Los sólidos secos, obtenidos en cada período fueron mezclados debidamente, conformándose así las muestras compósitos que se identificaron como R-1, R-2, etc., según el período que corresponde a cada una de ellas.

Con cada suspensión se realizaron ensayos reométricos a diferentes concentraciones de sólidos (desde 25 – 60 %) en peso, a distintas temperaturas (en el rango de 28 - 90⁰ C) y pH, de acuerdo con las condiciones del proceso productivo de la industria. Para cada concentración y temperatura se realizaron tres réplicas, lo que permitió que los resultados obtenidos sean confiables. Para cambiar los valores de pH, durante la determinación de sus curvas de flujo, se utilizaron soluciones 0.1M de HNO₃ y KOH.

Las mediciones de pH se efectuaron con un peachímetro digital Corning M-140 de fabricación inglesa.

Las muestras fueron caracterizadas mineralógicamente por difracción de Rayos X (según el método de policristalinos), utilizando un difractómetro alemán del tipo HZ6-4; empleando el software SEIFEKT, X – Ray Technology, versión 2.26 de 1999(Alemania),

Las características químicas de las muestras se evaluaron empleando técnicas de fluorescencia de Rayos X y espectroscopia de absorción atómica (espectrofotómetro CDN-18).

La morfología y distribución del tamaño de las partículas se estudiaron mediante microscopía óptica a través de un microscopio binocular, tipo Stereomikroskop Technival, microscopía electrónica y por análisis de tamizado por vía húmeda (con juegos de tamices según la serie de Tyler).

Las mediciones de las características magnéticas estáticas de las muestras de cola se realizaron en los laboratorios del Centro Nacional de

Electromagnetismo Aplicado (CNEA) de la Universidad de Oriente, utilizando el magnetómetro vibracional mvm 2000 a la temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$.

Para la realización de la caracterización reológica se utilizó un reómetro rotacional del tipo Rheostest 2.1 de cilindros concéntricos de fabricación alemana. Para obtener las curvas de flujo que mejor describen los datos, el modelo reológico y los parámetros reológicos de cada curva, se empleó el método de los mínimos cuadrados mediante el software TIERRA Versión 2.0 de Legrá (2002) y el Microsoft Excel 2000 de Microsoft Office.

Las pruebas de estabilidad fueron realizadas en una instalación de laboratorio que cuenta con un peachímetro digital HANNA-PH 211.

Los ensayos de sedimentación se realizaron en pruebas de banco con probetas de laboratorio graduadas de 1000ml y un cronómetro.

La investigación de los parámetros y regímenes de hidrotransporte de las colas se realizaron en una instalación de escala semi - industrial construida en el ISMM (única de su tipo en Cuba), dotada con el equipamiento, instrumentos de medición y control necesario y en la instalación de hidrotransporte industrial en explotación, ubicada en la Planta de Recuperación de amoníaco.

2.3 Diseño experimental e inferencia estadística.

Para la realización de los experimentos, con vistas a correlacionar el esfuerzo cortante y la viscosidad plástica con el contenido de los materiales y la temperatura, para el caso de los desechos (colas), se planteó un diseño factorial de experimentos **abc**, ver [Tabla 2.1](#), González E.S (1996) y González B.M (1997) , con tres réplicas centrales, de la siguiente manera:

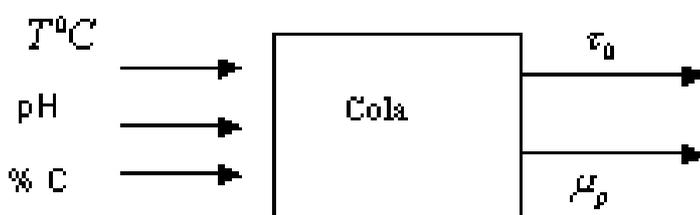


Figura 2.2. Variables para los residuos lixiviados (colas).

Se realizaron los ensayos experimentales con cada una de las seis muestras, ellas a diferentes concentraciones de sólidos, temperatura y pH, de acuerdo con las condiciones del proceso productivo de la industria. Para cada caso, se siguió el mismo diseño experimental.

Al analizar el aspecto de la reproducción para decidir cuantas réplicas realizar en cada experimento tuvimos en cuenta que en los posibles modelos que pudieran obtenerse a partir de la matriz experimental se consideraron los que incluyen las relaciones lineales entre las variables y sus interacciones por lo que sería necesario examinar el error experimental de cada variable y de sus interacciones cosa que solo puede hacerse si se tienen 3 o más réplicas, ya que con 1 réplica la media μ de los valores para un experimento coincide con el valor de la réplica y el error experimental

$e_e = \frac{\sum |x_i - \mu|}{n}$ (n es el número de réplicas) es nulo; con dos réplicas los

resultados de la media y del error experimental pueden estar muy influenciados por una medición anómala (lo cual sería contraproducente) y

además la varianza $S^2 = \frac{\sum (x_i - \mu)^2}{n - 1}$ tendría una dificultad semejante.

Por otra parte se consideró que la calidad de la tecnología que se utilizaría para desarrollar las mediciones permitía una alta precisión con muy pocas posibilidades de que se introdujeran errores sistemáticos y que el costo de cada experimento era alto lo cual implicaba debía seleccionarse el número de réplicas mínimos económicamente permisibles, por lo que se decidió realizar 3 réplicas en cada experimento.

El procesamiento digital de las tablas de datos se realizó mediante el software Tierra Versión 2.0 del 2002.

2.3.1 Modelación matemática

El problema puede describirse por la necesidad de obtener expresiones que modelen las tendencias de los fenómenos estudiados con el fin de conceptualizar las cualidades de las mismas en sus diferentes fases y tengan un nivel satisfactorio de potencia de pronóstico lo cual garantiza la simulación del comportamiento de los fenómenos bajo diferentes regímenes de trabajo.

Por el carácter de los datos (obtenidos a partir de diseños de experimentos) se decidió realizar solo un estudio básico estadístico de los datos de cada parámetro y considerando la alta precisión de las mediciones se decidió conservar todos los datos.

A continuación se procedió a evaluar los posibles métodos o tipos de modelos matemáticos que pudieran representar el comportamiento de los parámetros. A partir de pruebas realizadas y de consultas efectuadas a especialistas matemáticos Legrá (2002); y de la bibliografía consultada Levi (1962), López (1982), Lastov (1996), González (1996, 1997), Hernández (2001) se seleccionó el método de ajuste por los mínimos cuadrados.

Este método puede describirse (para una variable independiente y sin perder generalidad) por la ecuación general (Modelo Lineal Generalizado):

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i f_i(x) \dots\dots\dots(2.1)$$

Donde x es la variable o parámetro independiente; y es la variable dependiente; a_0 y a_i son los coeficientes ajustados; k es el número de sumandos de la expresión mínimo cuadrado y debe ser menor que el número de datos. Las funciones $f_i(x)$ deben ser independientes entre sí (por ejemplo no se pueden utilizar al mismo tiempo x y $2x$).

Para cada caso, los esfuerzos se concentraron en determinar el mejor conjunto de funciones $f_i(x)$ tal que se cumplieran los dos preceptos expresados en el primer párrafo de este epígrafe (modelar tendencias y capacidad de pronosticar). Estas funciones en los casos tratados dependen de una o varias de las variables independientes estudiadas.

Los indicadores propuestos para valorar la eficiencia de los modelos fueron el coeficiente de correlación, las pruebas F de Fisher (para todo el modelo) y T de Student para los coeficientes a_i , y la experiencia acumulada en los estudios anteriores realizados.

Lo adecuado de la decisión tomada con respecto a la estrategia de modelación descrita está probado cuando se observan los resultados de los coeficientes de correlación obtenidos (generalmente por encima de 0,95) y los resultados de las pruebas F de Fisher y T de Student realizados (todas dieron resultados positivos).

Los modelos obtenidos en esta investigación describen adecuadamente los fenómenos físicos observados y permiten calcular los parámetros de los modelos garantizando un rango de error pequeño para mediciones realizadas en las condiciones experimentales originales. Para el caso de los modelos reológicos que se estudiarán en el próximo epígrafe este error es menor del 3% para cualquier estimación realizada a partir de las condiciones experimentales originales tal como se muestra en las [Tablas 2.37 a Tabla 2.42](#). De lo explicado hasta aquí se infiere que estos modelos pueden ser utilizados para la determinación de los valores de los parámetros dependientes estudiados cuando varían los parámetros de operación en el proceso industrial.

2.3.2 Estudio y modelación de los parámetros reológicos a partir de los datos obtenidos experimentalmente en un reómetro.

A partir de los datos de las curvas de flujo y de los parámetros reológicos determinados y utilizando el programa de computación STAGRAPHICS, se realizó el análisis estadístico, obteniendo los modelos para cada caso en función de todas las variables cuyos coeficientes son significativos estadísticamente.

Con el Software “Tierra” Versión 2.0 del 2002, se obtuvieron los modelos de regresión y en cada caso se realizó:

- a. Un análisis de residuos con vista a comprobar la validez de los modelos, obteniéndose que las medias se ajustan a cero y la población sigue una distribución normal para un intervalo de confianza del 95 %.
- b. Prueba F de Fisher para todo el modelo.
- c. Pruebas T de Student para determinar si los coeficientes del modelo son significativos.

Se probaron varios modelos en los cuales se comprobó que la influencia de los términos compuestos (interrelaciones) era muy pequeña en comparación con la complejidad de los modelos que los incluyen, por lo que se prefirió asumir aquellos que solo incluyen las variables T, pH y C. Los modelos descodificados obtenidos son:

Para el esfuerzo cortante:

$$\tau_o = 0,410422 - 0,26743 (T) - 0,001325 (pH) + 0,43677 (C) \dots\dots\dots(2.2)$$

Donde $r=0.9728$ y para una prueba F de Fisher se obtuvo $F_c=113,57$ y como $F_t=2.46$ entonces se acepta el modelo. Los valores de la correlación parcial para los coeficientes de T, pH y C son, respectivamente, -0.325686 , -0.360737 y 0.4096255 y una prueba t de Student para los coeficientes muestra la calidad de este modelo (nótese que en todos los casos $t \leq \text{abs}(t_i)$):

Valor teórico (t de Student), $t= 1.65972$

Valores de t_i para los coeficientes: -3.26344813 , -4.457201 y 9.170231 .

Para la viscosidad plástica:

$$\mu_p = 0,022455 - 0,00459(T) - 0,000775(\text{pH}) + 0,013615(C) \dots\dots\dots(2.3)$$

Donde $r=0.98056$ y para una prueba F de Fisher se obtuvo $F_c=141,062$ y puesto que $F_t=2.46$ entonces se acepta el modelo. Los valores de correlación parcial para los coeficientes de T, pH y C son, respectivamente, -0.278813124 , -0.3901726 y 0.4102417 y una prueba t de Student para los coeficientes muestra la calidad de este modelo (nótese que en todos los casos $t \leq \text{abs}(t_i)$):

Valor teórico (t de Student), $t= 1.65972$

Valores de t_i para los coeficientes: -7.835012 , -5.982113 y 13.400172 .

Las ecuaciones (2.2) y (2.3) permiten calcular valores de τ_0 y μ_p para diferentes magnitudes de temperatura; pH y concentración de las colas. Nótese que a medida que aumenta la temperatura, el esfuerzo cortante y la viscosidad disminuyen.

2.4. Características Físico – Química y Mecánicas de la fase sólida y de la hidromezcla de las colas.

2.4.1. Caracterización de la fase sólida

Composición química.

En la (Tabla 2.1) se muestran los datos de la composición química correspondiente a cada muestra mineral estudiada.

Tabla 2.1. Composición química de los residuos lixiviados en recuperación de amoníaco, % en peso.

Muestras	Composición química							
	Ni	Co	Fe	Mg	SiO ₂	Al	Cr	Mn
R-1	0.30	0.081	47.6	4.30	12.45	2.00	3.5	0.75
R-2	0.28	0.079	47.6	4.30	12.44	2.05	3.27	0.75
R-3	0.28	0.079	47.6	4.15	11.29	2.04	3.42	0.66
R-4	0.29	0.079	47.8	4.35	12.51	2.00	3.62	0.68
R-5	0.28	0.079	47.6	4.20	11.91	2.03	3.56	0.69
R-6	0.29	0.079	47.1	4.41	11.42	1.98	3.35	0.71

Según los datos de la composición química los elementos predominantes, son el hierro y la sílice con valores medio de 47,7% y 12,34% respectivamente. En general, se observa poca variabilidad en las composiciones químicas de las muestras analizadas; sin embargo, por la (Tabla 2.2) puede verse que los elementos químicos se distribuyen en distintos minerales, por lo que la composición mineralógica difiere en cierta medida en las muestras investigadas en lo que respecta a los porcentajes de las fases mineralógicas presentes.

Composición mineralógica.

La composición mineralógica obtenida para la fase sólida de las muestras de cola se da en la (Tabla 2.2).

En la tabla se observa la presencia de las fases mineralógicas siguientes:

Magnetita (FeFe_2O_4)

Maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)

Fayalita (Fe_2SiO_4)

Magnesiocromita ($\text{Mg,Fe} \text{Cr}_2\text{O}_3$)

Lizardita 1T ($(\text{Mg,Ni})_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$)

Cuarzo (SiO_2)

Tabla 2.2. Composición mineralógica de la fase sólida correspondientes a las muestras de cola estudiadas.

Fases Mineralógicas	Muestras				
	R-1	R-3	R-4	R-5	R-6
Magnetita	40,41	38,20	38,80	37,94	40,10
Maghemita	36,55	36,40	36,00	36,80	37,45
Fayalita	11,51	9,49	9,32	10,61	10,89
Magnesiocromita	6,69	6,39	6,23	6,19	6,55
Lizardita 1T	3,94	9,12	9,19	7,41	4,20
Cuarzo	0,90	0,40	0,42	1,08	0,81
Relación $\left(\frac{\text{Magnetita}}{\text{Maghemita}} \right)$	1,106	1,05	1,08	1,031	1,07

Los datos de la tabla indican que la magnetita -maghemita constituyen las fases principales que componen estas colas.

Como fases secundarias más importantes están presentes la fayalita, la magnesiocromita y la lizardita 1T. A la muestra R-2 no fue posible determinarle la composición mineralógica. A manera de ilustración, en la Figura se presenta el difractograma obtenido para la muestra R-1 (Figura 2.3).

Dado que la magnetita y la maghemita son óxidos de hierro con características magnéticas, es de esperar que las muestras poseen propiedades ferrimagnéticas, teniendo en cuenta el alto contenido de ambos óxidos férricos.

Es interesante señalar que, en la revisión de la literatura especializada, se encontró resultados acerca de la composición mineralógica de las colas de la Empresa "Comandante René Ramos Latour" de Nicaro (epígrafe 1.6, cap.1), que es una fabrica niquelífera con tecnología carbonato amoniacal (proceso CARON) . Las colas de Nicaro también contienen la Magnetita como fase principal, pero no se reporta la presencia de maghemita. Conociéndose que una de las vías de obtención de maghemita es por oxidación de la magnetita, se supuso que la maghemita presente en las

colas de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara de Moa”, sea el resultado de la oxidación de una parte de la magnetita que posee el mineral a la salida de los Hornos de Reducción, como consecuencia de características propias de la operación de la fábrica. Para comprobar esto, se analizaron muestras de los desechos lixiviados que salen de la Planta de Lixiviación y que habían sido tomadas conjuntamente con las colas que se estudian en la presente Tesis, en los mismos períodos. Los resultados de la composición mineralógica de los desechos lixiviados demostraron la presencia de maghemita en esas muestras, en menor proporción que en las colas, y de magnetita en mayor proporción. En la Tabla 2.4 se dan los datos del análisis realizado, correspondiente a la magnetita y a la maghemita. Las restantes fases mineralógicas se encuentran, en mayor o menor proporción, pero en el mismo orden que en las colas.

Comparando los datos de ambas tablas se observa que en las colas los contenidos de magnetita son mayores que en los desechos lixiviados.

Por los resultados obtenidos se deduce que, debido a las muy elevadas temperaturas (alrededor de 300° C) que posee el mineral al entrar a la planta de lixiviación (en Nicaro la temperatura es del orden de 200° C), debe comenzar un proceso de oxidación de la magnetita que, al parecer, se extiende hasta la Planta de Recuperación de Amoníaco, y que pudiera explicar la presencia de la maghemita en la cola de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Composición granulométrica.

Los resultados del análisis granulométrico se presentan en la (Tabla 2.3) , en la que se observa que las partículas de tamaños menores de 43 μm , son mayoritarias y constituyen más del 60 % del volumen de la fase sólida, lo que se ilustran las características de distribución de tamaño por cernido (Figura 2.4), para la muestra R-2. Todas las muestras exhiben similar granulometría y constituyen sistemas altamente polidispersos.

Tabla 2.3. Resultados del análisis granulométrico.

Clases de tamaño (mm)	Diámetro medio (mm)	Fracción peso (%)					
		R-1	R-2	R-3	R-4	R-5	R-6
+0,175	0,20	10,0	8,79	7,50	8,0	7,66	9,52
-0,175 +0,147	0,16	2,6	2,75	2,70	2,8	2,67	2,49
-0,147 +0,074	0,11	14,8	11,09	10,16	12,0	12,03	11,67
-0,074 +0,043	0,059	11,95	9,51	10,72	11,0	11,45	10,84
-0,043	0,022	60,65	67,85	68,92	66,2	66,19	65,48
Total	-	100	100	100	100	100	100

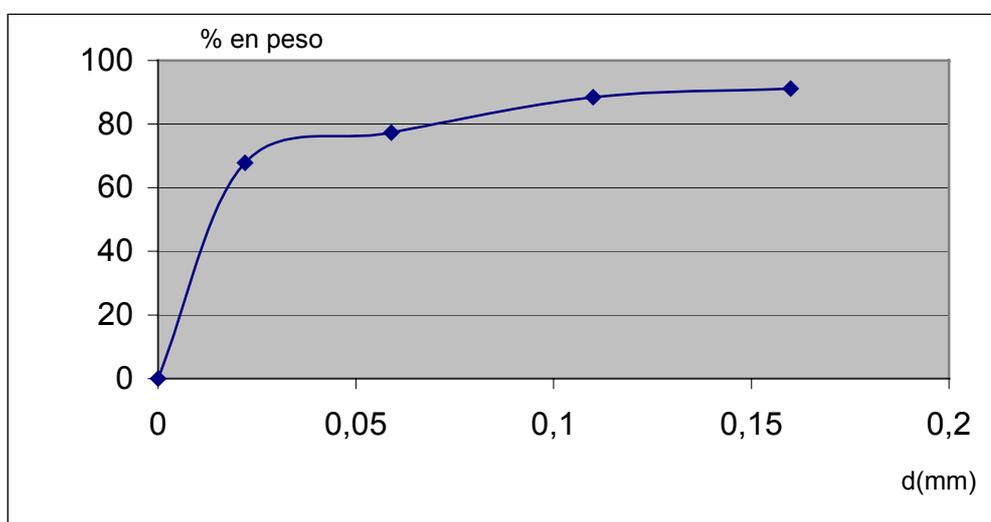


Figura 2.4. Característica de distribución de tamaño por cernido (muestra R-2).

Conociendo el peso inicial de cada muestra y el de las fracciones correspondientes a las mismas, se obtienen las diferentes fracciones de tamaño de las muestras. Este tamaño de partículas da lugar a suspensiones con un comportamiento típico de los sistemas coloidales. Del análisis se deriva que las muestras de sólido son polidispersas.

Forma y tamaño de las partículas.

Con vista a tener una información de la forma de las partículas, se obtuvo un número de fotografías en las muestras dispersadas con auxilio de un microscopio electrónico.

Las observaciones realizadas para las muestras R-1 y R-3, demuestran el carácter de polidispersión de las partículas sólidas. Las partículas tienen forma de elipsoide de revolución, con una relación axial de 1,76 para la muestra R-1 y 1,18 para la muestra R-3, lo cual puede verse en la Figura 2.5, correspondiente a la muestra R-3.



Figura 2.5. Fotografía que ilustra la forma de las partículas para la muestra R-3.

Debido a esta forma elipsoidal las partículas de Magnetita y de Maghemita poseen propiedades magnéticas apreciables, lo cual se confirmó prácticamente con auxilio de un imán y con la caracterización magnética.

Esta forma elipsoidal también contribuye a que en las suspensiones de colas constituidas con estas partículas, exista la posibilidad de la formación de estructuras fuertes en dependencia de la concentración de sólidos, tal como se analiza en el epígrafe correspondiente a las propiedades reológicas.

Diámetro equivalente e índice de aplastamiento de las partículas.

La morfología de los granos se estudió con mucho cuidado con la ayuda de un microscopio binocular, clasificándose la muestra según los tamices 0.1 – 0.21; de dicha clasificación se analizaron las clases + 0.1 – 0.21 y + 0.21 (la clase – 0.1 no se analizó debido al pequeño tamaño de las partículas por lo que el microscopio no permitía observarlas). Se examinaron 100 granos, correspondientes a la muestra 1 y a la muestra 3 las cuales fueron

fotografiadas (ver Figura 2.5) con la ayuda de un microscopio electrónico. La relación entre el tamaño y la forma de las partículas y su composición mineralógica se estudiaron con anterioridad, los resultados obtenidos fueron elaborados por la metodología propuesta por Giusti (1985).

El largo, el ancho, y el espesor de cada grano se midió con el objetivo de determinar el diámetro equivalente:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{\left(\frac{6}{\pi}\right) \cdot l \cdot a \cdot e} \dots\dots\dots(2.4)$$

Donde:

l: largo (mm)

a: ancho (mm)

e: espesor (mm)

y el índice de aplastamiento

$$I_A = \frac{e}{\sqrt{l \cdot a}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Este índice expresa el aplanamiento que sufren los granos de cola. A pequeños valores del I_A las partículas presentan forma aplanada en forma de elipsoide en revolución; mientras que, para valores igual a la unidad de dicho índice, las partículas alcanzan forma esférica. En el caso concreto de las muestras de colas estudiadas el índice de aplastamiento alcanza valores promedio de 0,58 (ver Figura 2.), y la geometría de las partículas correspondientes es la elipsoidal, en correspondencia con su composición mineralógica, la forma de las partículas y las mediciones experimentales realizadas en la instalación industrial, se puede constatar que durante el desplazamiento de las partículas a concentraciones cercanas y superiores al 35% de sólido en peso las partículas forman estructuras debido a su forma alargada y al elevado contenido de maghemita y de magnetita presentes en las fases mineralógica de las colas. Como se puede apreciar, la forma de las partículas de las colas es una característica estructural de gran importancia. En general estas partículas pueden tener diversas formas; estas pueden ser de cierta complejidad, pero se pueden tratar teóricamente como esferas o elipsoides de revolución (mayoritariamente estas últimas). Al unirse estas partículas entre sí se obtienen formas muy diferentes que en nada se

parecen a su forma inicial. De ahí que la forma de las partículas de colas se encuentre estrechamente vinculada al índice de aplastamiento.

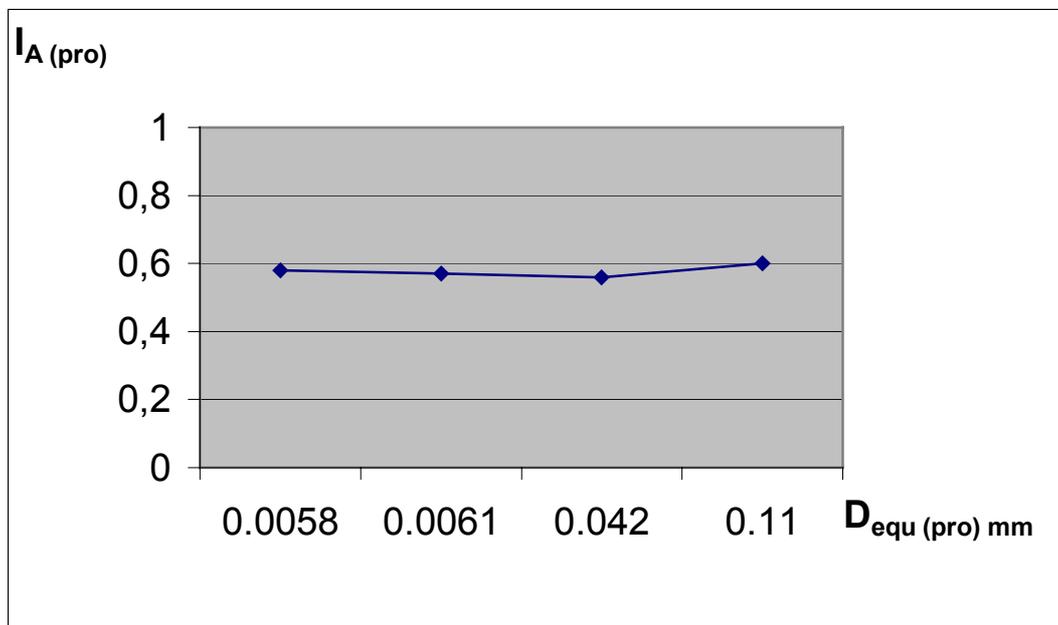


Figura 2.6. Representación de $I_A = f (D_{equ(pro)})$ para muestras de colas.

2.13 Caracterización magnética de las muestras de cola.

El hecho de que las fases mineralógicas principales de las colas sean la Magnetita y la Maghemita, crea la necesidad de caracterizar magnéticamente las colas dado que tanto la Magnetita como la Maghemita constituyen minerales con importantes características magnéticas. Por otra parte, la caracterización magnética proporciona una información que permite comprender mejor los resultados obtenidos por la vía de la caracterización química, mineralógica y granulométrica de la cola, así como inferir las posibles causas de algunos comportamiento observados en la propiedades de este producto y de sus suspensiones en agua amoniacal.

En la Figura 2.7 se presentan las curvas de histéresis magnética a temperatura de 25°C para las muestras R-1 y R-5. Como puede verse en las figuras, ambas muestras presentan características propias de los materiales ferrimagnético. Curvas de histéresis similares se han obtenido para nanopartículas de Maghemita, Garcell y Col. (1998). Las diferencias mas importantes entre estas dos muestras viene dada por la magnetización

remanente, M_r , con un valor de 4,56 kA/m para la muestra R-1 y de 3,22 kA/m para la muestra R-5, así como por la fuerza coercitiva de magnetización, H_{cm} , con un valor de 14,53 kA/m (183 Oe) para la muestra R-1 y de 10,59 kA/m (133 Oe), para muestra R-5.

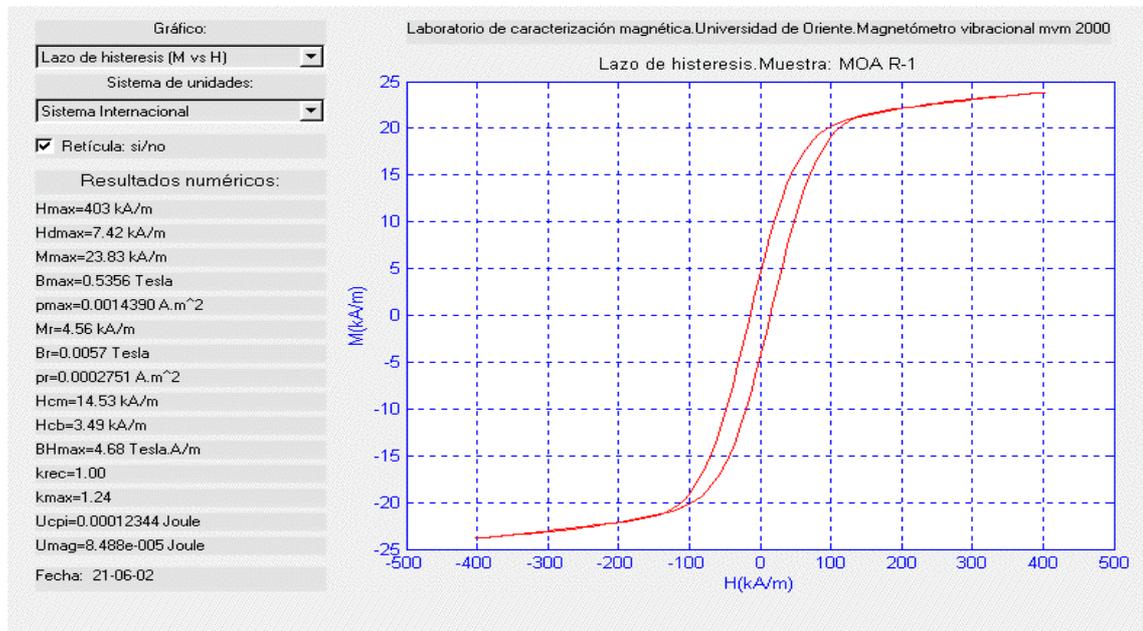


Figura 2.7. Curva de histéresis magnética a temperatura de 25°C correspondiente a la muestra R-1.

La diferencia observada en los valores de estos dos parámetros de ambas muestras indican que la muestra R-1 exhibe propiedades magnéticas más acentuadas que la R-5. Por otra parte, se determinó para ambas muestras que la permeabilidad magnética relativa máxima, $k_{m\acute{a}x}$, es igual 1,24. Este parámetro indica que estas muestras adquieren un campo magnético 1,24 veces mayor, que el campo magnético que se les aplique. Por tanto, si se tiene en cuenta que la intensidad del campo magnético de la Tierra es aproximadamente de 0,2 Gauss ($0,2 \cdot 10^{-4}$ Tessler), entonces la cola depositada en el dique adquiere un campo magnético de 0,25 Gauss, es decir, mayor que el campo magnético natural de la Tierra. Por consiguiente, dada la enorme masa de cola depositada en el dique, es de esperar que esta provoque una anomalía magnética en esa región.

En la (Tabla 2.7) se muestra un resumen de la caracterización magnética de las 6 muestras de cola estudiadas. En ella pueden verse los valores de los

parámetros M_r y H_{cm} explicado anteriormente. Se observa, por ejemplo, que el magnetismo remanente disminuye en el orden R-1>R-6>R-5 lo cual coincide con la proporción de Magnetita y Maghemita (Tabla 2.3) que también disminuye en ese mismo orden, dado que la Magnetita posee propiedades magnética de mayor intensidad que la Maghemita.

Tabla 2.4. Resumen de caracterización magnética.

Magnitudes/ Muestras	R-1	R-2	R-3	R- 4	R-5	R-6
Mr	4.56 kA/m 4.56 emu/cm ³	3.59 kA/m 3.59 emu/cm ³	3.51 kA/m 3.51 emu/cm ³	3.41 kA/m 3.41 emu/cm ³	3.22 kA/m 3.22 emu/cm ³	3.26 kA/m 3.26 emu/cm ³
Hcm	14.53 kA/m 183 Oe	13.33 kA/m 167 Oe	12.63 kA/m 159 Oe	11.21 kA/m 141 Oe	10.79 kA/m 133 Oe	10.79 kA/m 136 Oe

Las magnitudes del producto BH máximo (Tabla 2.4) indica, que la muestra R-1 es capaz de imantarse en mayor cuantía que las restantes, bajo la acción de un campo magnético de la misma intensidad

Por otra parte, el comportamiento reológico de las pulpas de las muestras estudiadas no se corresponde con el de la caracterización magnética, ya que las suspensiones que exhiben mayores viscosidades son las de las muestras R-6 y R-3, y no la de R-1. Ello pudiera atribuirse a los efectos combinados de las propiedades magnéticas con las superficiales, que proporcionan ese resultado neto.

2.4.2 Caracterización de las hidromezclas de las colas.

1.8 . Estabilidad de las suspensiones.

Las suspensiones preparadas debido a su alto contenido de partículas finas (menores de 43 μm), se comportan como sistemas coloidales.

Dado que en los sistemas coloidales, las partículas se cargan eléctricamente es necesario el estudio de las propiedades superficiales que influyen sobre la estabilidad de las suspensiones de cola, con vista a una mayor comprensión de los efectos del pH sobre el comportamiento de estas pulpas, los cuales a su vez influyen sobre su reología en proceso de sedimentación, en la operación de los sistemas hidráulicos y en el diseño de éstos.

2.8.1 Curvas de densidad de carga superficial en función del pH.

La relación de σ_0 vs pH describe las condiciones de estabilidad de las suspensiones. En la (Figura 2.8) se presentan las curvas de σ_0 vs pH a dos concentraciones del electrolito (KNO_3) para una suspensión de cola (R-2) preparada con agua destilada. Como puede apreciarse, los valores de σ_0 se incrementan con el aumento de la fuerza iónica para un mismo valor de pH. Las curvas se interceptan en el eje de las abscisas indicando el valor del pH correspondiente al p.z.c de la suspensión.

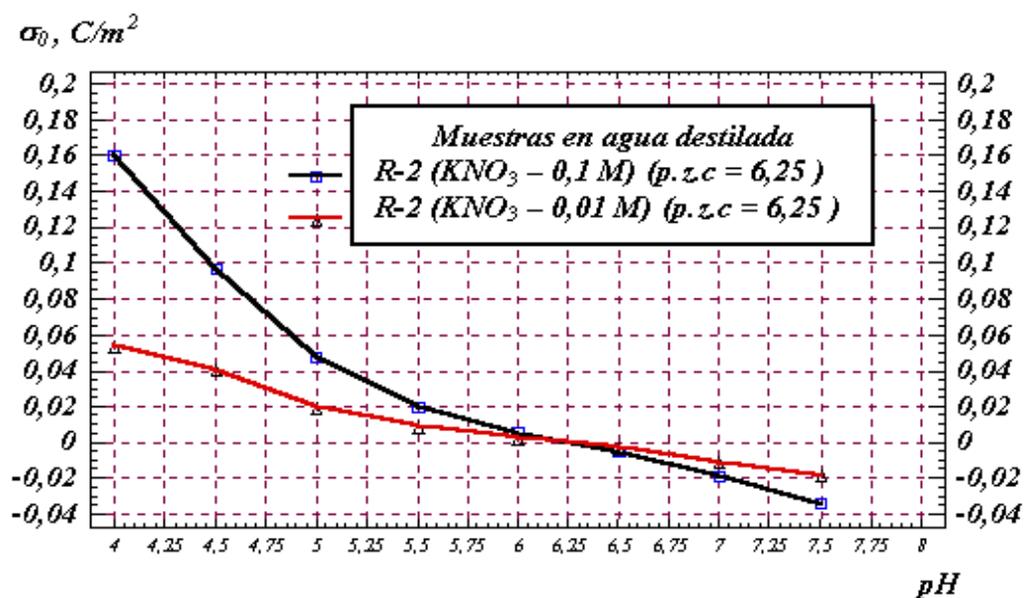


Figura 2.8 Curvas de carga superficial en función del pH y la fuerza iónica.

En este caso, el valor del p.z.c depende de la concentración del electrolito, indicando claramente que no hay adsorción específica de iones NO_3^- y K^+ en la superficie de las partículas sólidas (por lo que se dice que el electrolito es indiferente), por esta razón se utiliza este electrolito para variar la fuerza

iónica en las pruebas de estabilidad. Para valores de $\text{pH} < \text{p.z.c}$ la carga neta superficial del sólido es positiva y para valores de $\text{pH} > \text{p.z.c}$ es negativa. En la (Figura. 2.12) se muestran las curvas de σ_0 vs pH a tres concentraciones diferentes del electrolito indiferente (KNO_3) para una suspensión de cola (R-3) preparada con agua amoniacal. Un comportamiento similar exhiben las suspensiones de las muestras restantes, tanto con agua destilada como con las preparadas con agua amoniacal. A pH alejados del p.z.c predominan las fuerzas de repulsión electrostática entre las partículas, por lo que la suspensión es más estable, no forman agregados y la sedimentación se dificulta. A pH próximos al p.z.c la pulpa se hace inestable y las partículas pueden flocular y sedimentar con mayor posibilidad.

2.9 Influencia de la naturaleza de las muestras y de la composición iónica del medio dispersante sobre la estabilidad de la suspensión.

La influencia de la naturaleza de las muestras de mineral puede ser explicada con el auxilio de la (Figura 2.13), en la cual se presentan las curvas de σ_0 vs pH , a una misma fuerza iónica y medio dispersante, de las suspensiones correspondientes a dos de las muestras estudiadas.

Se observa que para un mismo valor de pH la carga superficial es diferente en cada una de las curvas, por lo cual se deduce que las diferencias existentes en su composición mineralógica constituyen un factor fundamental en el comportamiento mostrado por cada muestra.

Conociendo que los p.z.c resultantes de las pulpas de cada mineral se obtienen por la contribución de los p.z.c de cada fase mineralógica, se llega a la conclusión de que las diferencias existentes en los valores del p.z.c están dadas por las diferencias que presentan las muestras minerales en su composición mineralógica (Tabla 2.5). En la figura puede verse que la suspensión que exhibe un mayor p.z.c es la correspondiente a la muestra (R-3), y es esta, la que presenta mayor contenido de Magnetita y de Maghemita ; mientras que la pulpa de la muestra (R-2) tiene un menor valor de su p.z.c , dado su inferior contenido de Maghemita - Magnetita.

Así, a mayores contenidos de Magnetita y de Maghemita en las pulpas, las cargas superficiales son mayores y los p.z.c tienden al $\text{pH} \approx 6.6$, (en agua destilada) que es el valor del p.z.c para suspensiones de Magnetita y de Maghemita obtenidos en otros trabajos.

La (Tabla 2.5) confirma el análisis realizado y muestra los resultados de los p.z.c para cada una de las suspensiones de cola, en dependencia del medio dispersante y de la concentración(fuerza iónica) del electrolito KNO_3 .

Tabla 2.5. Valores de p.z.c de las colas del proceso CARON para diferentes muestras en agua destilada y agua amoniacal.

Muestras	Agua Destilada		Agua Amoniacal		
	10^{-2} M	10^{-1} M	10^{-3} M	10^{-2} M	10^{-1} M
R-1	6.25	6.25	-	5.5	5.5
R-2	6.25	6.25	5.54	5.51	5.50
R-3	6.40	6.35	5.70	5.72	5.70
R-4	6.28	6.30	-	5.60	5.60
R-5	6.32	6.30	-	5.625	5.62
R-6	6.50	6.45	-	5.80	5.75

El efecto del medio dispersante, con el cual se preparan las suspensiones, puede verse tanto en la (Tabla 2.5) como en la (Figura 2.14). En esta última se muestran las curvas de σ_0 vs pH para las suspensiones preparadas con la muestra (R-6) en ambos medios dispersantes y a una misma fuerza iónica (10^{-2} M KNO_3). Puede verse que en la pulpa preparada con agua amoniacal, las partículas adquieren mayor carga superficial (a un mismo valor de pH), y se desplaza el p.z.c hacia pH más ácidos, esto demuestra la adsorción específica de cationes (como el NH_4^+ , que se encuentra en grandes cantidades), lo cual influye sobre otras propiedades de las pulpas, tales como las reológicas y las de sedimentación, y, por tanto, en la transportación de estas suspensiones por tuberías.

2.10 Caracterización reológica de los desechos lixiviados (colas).

Se analizaron las 6 muestras con diferentes concentraciones de sólido (desde 30 a 60 % en peso) en un reómetro rotacional Rheostest 2.1 de cilindros concéntricos en la Universidad de Oriente, donde se obtuvieron los valores de esfuerzo cortante (τ) en función de la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), a diferentes temperaturas (en el rango de 23 a 90° C) y a diferentes pH, de acuerdo a las condiciones del proceso productivo de la industria.

2.10.1 Efecto de la concentración de sólidos.

En las muestras de colas analizadas se pudo comprobar que, para concentraciones de 30 y 35% en peso de sólido, las curvas de flujo obtenidas exhiben un comportamiento pseudoplástico, mientras que para concentraciones de 40 a 60% en peso las pulpas adquieren propiedades plásticas, mostrando un comportamiento típico de los plásticos de Bingham (Figura 2.15). En todos los casos, a medida que aumenta la concentración los esfuerzos cortantes, τ , se incrementan, y, por tanto las viscosidades aparentes, para un valor fijo de $\dot{\gamma}$.

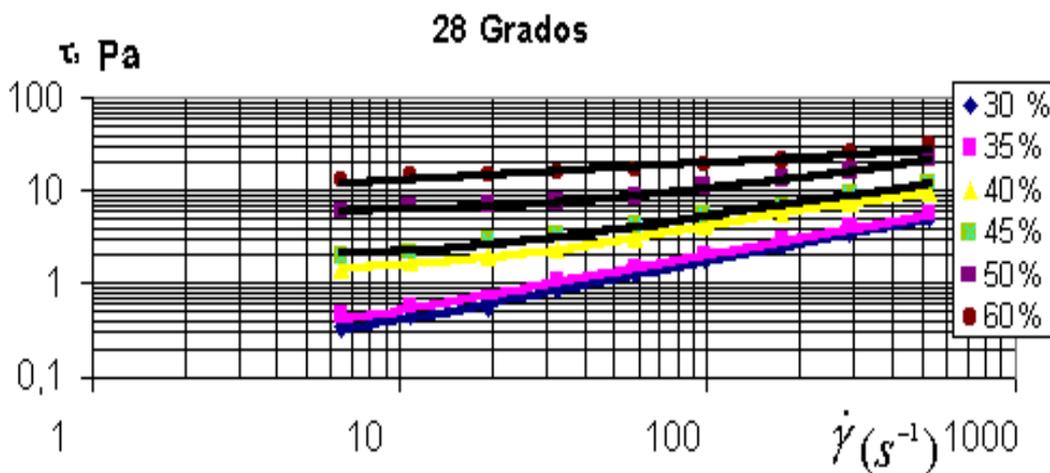


Figura 2.9. Curvas de flujo (τ vs $\dot{\gamma}$) a distintas concentraciones de sólido de las pulpas (muestra R-3).

Para las pulpas que poseen comportamiento pseudoplástico sus datos han sido ajustados al modelo de Oswald de Waele, el cual está caracterizado por los parámetros reológicos: índice de consistencia, K , e índice de flujo, n . Los valores de K aumentan con el incremento de la fase sólida, mientras que los de n cambian muy poco con dicho incremento a una temperatura dada (Tabla 2.6).

Las pulpas que exhiben un comportamiento plástico se han caracterizado mediante los parámetros reológicos del modelo Bingham: τ_0 (esfuerzo cortante inicial) y μ_p (viscosidad plástica). Ambos parámetros aumentan con el incremento de la concentración de la fase sólida a una misma temperatura (Figuras 2.16 y 2.17; Tabla.2.6). Comportamientos similares se han obtenidos por Cerpa (1997) en pulpas de lateritas.

2.11. Influencia de la naturaleza de las muestras minerales en el comportamiento reológico de las suspensiones.

La naturaleza de los minerales juegan un papel fundamental en el comportamiento reológico de las suspensiones. Las diferencias existentes en la composición mineralógica de las muestras marcaron las diferencias en los comportamientos de sus suspensiones.

Estas diferencias se pueden observar en la (Figura. 2.18). En la figura se muestran las curvas de flujo de algunas suspensiones analizadas a una misma concentración de sólidos y medio dispersante (Agua amoniacal). Se observa que la pulpa de muestra R-6 presenta los mayores valores de τ , y, por consiguiente, la mayor viscosidad; mientras que la suspensión de la muestra R-4 es la menos viscosa. Ello está en correspondencia con los contenidos de Maghemita y Magnetita en las muestras y con las propiedades superficiales.

Las curvas anteriores confirman el modelo (Plástico Bingham) que describe el comportamiento reológico de sus suspensiones.

2.11.1 Efecto de la temperatura.

En las pulpas estudiadas que exhiben comportamiento pseudoplástico, los valores del índice de consistencia, K , disminuyen con el aumento de la temperatura (Figura.2.19 a); mientras que, por el contrario, el índice de flujo n aumenta ligeramente con el incremento de la temperatura a una misma concentración (Figura.2.19 b), como es de esperar.

Las pulpas que presentan plasticidad, la viscosidad y los parámetros reológicos disminuyen con el aumento de la temperatura (Figura 2.20 a y 2.20 b). Este comportamiento es típico de la mayoría de las dispersiones minerales.

Las Figuras.2.21 (a) y 2.21 (b) muestran la influencia de la temperatura sobre las propiedades reológicas de las pulpas de las colas mediante la correlación gráfica de τ vs. $\mu_0 \dot{\gamma}$, que ha sido propuesta por Atsushi y Col. (1987). El método propuesto permite comprender el efecto de la temperatura sobre el mecanismo de estructuración de la suspensión, teniendo en cuenta que las fuerzas hidrodinámicas que actúan entre las partículas del medio disperso son proporcionales al producto de la viscosidad del medio dispersante y del gradiente de velocidad, $\mu_0 \dot{\gamma}$, a diferentes temperaturas y concentraciones. Así, puede observarse que para las concentraciones de 30 y 35% en peso de sólidos se obtienen curvas únicas para todas las temperaturas, lo cual indica que a esas concentraciones la temperatura solo afecta a la viscosidad del medio dispersante, pero no a los mecanismos de formación de la estructura. En cambio, para la concentración de 45% no se obtiene una única curva al variar la temperatura, manifestándose con ello que para esta concentración la temperatura influye, no solo sobre el medio dispersante, sino, también, sobre la estructura que forman las partículas sólidas, debilitándose las fuerzas de cohesión interpartículas al aumentar la temperatura. Este efecto se observó, también, para todas las concentraciones mayores de 45%, en todas las suspensiones estudiadas.

2.11.2 Efecto del pH.

El efecto del pH en las pulpas de las colas se muestra en la (Figura 2.22), donde se observa la variación de la viscosidad con el pH a diferentes concentraciones del sólido y a la temperatura de 28°C, para la muestra R- 2 y R- 3, en agua destilada.

Los resultados son similares para las suspensiones de las restantes muestras.

Como se observa en la figura, los máximos valores de viscosidad en cada muestra se alcanzan alrededor de los p.z.c de cada muestra, donde se logra la mayor inestabilidad y estructuración de las pulpas. Para valores de pH inferiores o superiores al indicado, las viscosidades son menores. Por consiguiente, la proximidad o lejanía del pH al p.z.c determina en gran medida la viscosidad de la suspensión y con ello su comportamiento reológico. Esta valoración está basada en los resultados obtenidos por Garcell (1998) con suspensiones acuosas de nanopartículas de Maghemita, para las que se determinó un valor del punto isoeléctrico (i.e.p) y del punto de carga cero (p.z.c) de 6,6. Los valores de i.e.p. obtenidos por otros autores con suspensiones de Magnetita y Maghemita (6,6; Garcell (1998) y 6,6 – 7 ; Blesa y Col. (1984; 1997) respaldan totalmente estos resultados.

2.12. Estimación de los parámetros reológicos K y n para las pulpas de colas del proceso CARON que presentan comportamiento pseudoplástico en dependencia de la temperatura.

Los valores del índice de consistencia K y del índice de flujo n, pueden ser estimados mediante expresiones obtenidas a partir de los datos experimentales, que han sido procesados con ayuda del programa de computación **TIERRA**.

Para determinar la dependencia del índice de consistencia con la temperatura (tomando, arbitrariamente como referencia, $T_1 = 40^0$ C), se correlacionaron (en forma normalizada) los diferentes valores de los índices de consistencia a distintas temperaturas, K_i , respecto al índice de

consistencia experimental a la temperatura de referencia, $K_{40^{\circ}C}$, como una función de la relación adimensional de temperaturas, $\frac{40 - T_i}{40}$. Así, se obtuvo

la siguiente correlación:

$$\ln\left(\frac{K_i}{K_{40^{\circ}C}}\right)_{\%} = \left[\frac{40 - T_i}{40}\right] \cdot e^{-0.0178 \cdot T_i} \dots\dots\dots (2.7)$$

La ecuación (2.7) es única y válida para cualquier concentración comprendida entre 25 – 35 % en peso de sólidos y para cualquier temperatura en el rango de 28 - 90° C.

En la (Figura 2.23) se representa la curva generalizada descrita por la ecuación (2.7). Tanto la (Figura 2.23) como la expresión (2.7), permiten estimar los valores de K como función de T, a una concentración dada (dentro de los rangos de validez establecidos) con un error medio de 1.7 %.

Los índices de flujo son poco afectados por la concentración y por la temperatura, en los rangos señalados anteriormente para el índice K. Los valores de n para las pulpas de las colas pueden ser estimados por la expresión siguiente:

$$n = 0.4357 \cdot T_i^{0.1177} \dots\dots\dots (2.8)$$

La ecuación (2.8) da valores calculados de n con un error medio de ± 1.438 %, respecto a los valores experimentales.

2.13 Caracterización magnética de las muestras de cola.

El hecho de que las fases mineralógicas principales de las colas sean la Magnetita y la Maghemita, crea la necesidad de caracterizar magnéticamente las colas dado que tanto la Magnetita como la Maghemita constituyen minerales con importantes características magnéticas. Por otra parte, la caracterización magnética proporciona una información que permite comprender mejor los resultados obtenidos por la vía de la caracterización química, mineralógica y granulométrica de la cola, así como inferir las posibles causas de algunos comportamiento observados en la propiedades de este producto y de sus suspensiones en agua amoniacal.

En la Figura 2.24 (a) y 2.24 (b) se presentan las curvas de histéresis magnética a temperatura de 25°C para las muestras R-1 y R-5. Como puede

verse en las figuras, ambas muestras presentan características propias de los materiales ferrimagnético. Curvas de histéresis similares se han obtenido para nanopartículas de Maghemita, Garcell y Col. (1998). Las diferencias más importantes entre estas dos muestras viene dada por la magnetización remanente, M_r , con un valor de 4,56 kA/m para la muestra R-1 y de 3,22 kA/m para la muestra R-5, así como por la fuerza coercitiva de magnetización, H_{cm} , con un valor de 14,53 kA/m (183 Oe) para la muestra R-1 y de 10,59 kA/m (133 Oe), para muestra R-5.

La diferencia observada en los valores de estos dos parámetros de ambas muestras indican que la muestra R-1 exhibe propiedades magnéticas más acentuadas que la R-5. Por otra parte, se determinó para ambas muestras que la permeabilidad magnética relativa máxima, $k_{m\acute{a}x}$, es igual 1,24. Este parámetro indica que estas muestras adquieren un campo magnético 1,24 veces mayor, que el campo magnético que se les aplique. Por tanto, si se tiene en cuenta que la intensidad del campo magnético de la Tierra es aproximadamente de 0,2 Gauss ($0,2 \cdot 10^{-4}$ Tessler), entonces la cola depositada en el dique adquiere un campo magnético de 0,25 Gauss, es decir, mayor que el campo magnético natural de la Tierra. Por consiguiente, dada la enorme masa de cola depositada en el dique, es de esperar que esta provoque una anomalía magnética en esa región.

En la (Tabla 2.7) se muestra un resumen de la caracterización magnética de las 6 muestras de cola estudiadas. En ella pueden verse los valores de los parámetros M_r y H_{cm} explicado anteriormente. Se observa, por ejemplo, que el magnetismo remanente disminuye en el orden R-1>R-6>R-5 lo cual coincide con la proporción de Magnetita y Maghemita (Tabla 2.3) que también disminuye en ese mismo orden, dado que la Magnetita posee propiedades magnética de mayor intensidad que la Maghemita.

Las magnitudes del producto BH máximo (Tabla 2.7) indica, que la muestra R-1 es capaz de imantarse en mayor cuantía que las restantes, bajo la acción de un campo magnético de la misma intensidad.

Por otra parte, el comportamiento reológico de las pulpas de las muestras estudiadas no se corresponde con el de la caracterización magnética, ya que

las suspensiones que exhiben mayores viscosidades son las de las muestras R-6 y R-3, y no la de R-1. Ello pudiera atribuirse a los efectos combinados de las propiedades magnéticas con las superficiales, que proporcionan ese resultado neto.

2.14 Conclusiones parciales.

Los resultados obtenidos en el desarrollo de la caracterización de las colas permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- 1.- Las pulpas de las muestras de colas de la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” de Moa estudiadas, poseen composiciones químicas muy parecidas, pero difieren en su composición mineralógica, siendo esta última la que determina las diferencias entre ellas, dadas por su naturaleza. Las fases mineralógicas principales en todas las muestras son la Magnetita y la Maghemita con un contenido medio en el orden del 39,09 y 36,64% en peso del total respectivamente, siendo las fases secundarias más importante la fayalita, la magnesio-cromita y la lizardita 1T.
- 2.- Las muestras están constituidas por partículas finas con tamaños inferiores a 43 μm (más del 60% en peso de sólidos) y un tamaño medio de 0.072mm, siendo ellas las causantes principales de las propiedades superficiales y de la plasticidad de las suspensiones. La distribución de tamaño las caracteriza como sistemas polidispersos.
- 3.- Las mediciones realizadas con ayuda de la microscopía electrónica revelan un índice de aplastamiento promedio de 0.58 y un diámetro equivalente promedio de 0.04mm, siendo la forma predominante de las partículas la de un elipsoide de revolución lo que facilita la formación de estructuras debido al aumento de la superficie de contacto entre las partículas.
- 4.- Los resultados de las investigaciones de la velocidad de caída límite demuestra que el criterio de Liashehenko posee valores mas estables y uniformes que los demás criterios con relación a los datos experimentales. El coeficiente de forma utilizado en la fórmula de

Liashehenco oscila de 0.569 a 0.487 para tamaños de granos de 0.175 a 0.044mm, lo que corrobora la forma elipsoidal de estos.

- 5.- Los ensayos experimentales sobre la velocidad de sedimentación a diferentes concentraciones de sólido en peso, demostraron que esta disminuye a medida que aumenta el contenido de sólido en la zona de sedimentación impedida, se incrementan los volúmenes de sedimento, comportándose similar a un sistema homogéneo, separándose la parte espesada del líquido clarificado.
- 6.-La estabilidad de las suspensiones de las muestras estudiadas y sus puntos de carga cero (p.z.c.) son afectadas por el medio dispersante, al comparar los resultados obtenidos de pulpas preparadas con agua destilada o con agua amoniacal. Las pulpas de agua amoniacal exhiben mayores cargas superficiales y p.z.c. más ácidos. Ello se atribuye a la adsorción específica de iones de cargas positiva, como el NH_4^+ . Para $pH < p.z.c.$, la carga superficial es positiva y para $pH > p.z.c.$ es negativa.
- 7.- Las magnitudes de las cargas superficiales y de los p.z.c. se incrementan con el aumento del contenido de maghemita-magnetita de las muestras, tendiendo hacia el valor del p.z.c. de esos minerales puros. Así, los valores del p.z.c. cambian de mayor a menor por muestras en el siguiente orden
 $R-6 > R-3 > R-5 \approx R-4 > R-2 = R-1.$
- 8.- El comportamiento reológico depende fundamentalmente de la concentración de sólido y de las propiedades superficiales, dado el alto contenido de partículas finas. A concentraciones de 25 a 35% en peso de sólidos el comportamiento es pseudoplástico, mientras que para concentraciones mayores fluyen como plástico Bingham.
- 9.- Las curvas de flujo y las viscosidades cambian con la temperatura y el pH, comprobándose que la temperatura tiene influencia solamente sobre el medio dispersante para las concentraciones de 25 a 35% en peso de sólidos. Sin embargo; para las concentraciones comprendidas entre 40-60% de sólido en peso, la temperatura además, tiene un

marcado efecto sobre la estructura que forma la parte sólida. Los mayores valores de viscosidad, a diferentes concentraciones y temperaturas, para todas las muestras se alcanzan a magnitudes del pH igual o cercanas a los p.z.c. de las suspensiones.

- 10.-La caracterización magnética demuestra que las colas son materiales ferrimagnéticos debido a que sus fases mineralógicas principales son la Magnetita y la Maghemita. Este hecho da pie para suponer que la presencia de la cola acumulada en grandes cantidades en el dique provoca alguna anomalía magnética en el entorno en que se encuentra con el correspondiente impacto negativo medioambiental.

CAPITULO III. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE TRANSPORTACION DE LAS COLAS.

3.1 Breve descripción de la instalación experimental a escala Semi-industrial.

La investigación de los parámetros y regímenes de hidrotransportación de las colas del proceso CARON se realizaron en una instalación de dimensiones semi- industriales construida en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa tal como ya se mencionó en el epígrafe 2.2. Esta instalación fue modernizada y dotada de equipos y accesorios que permiten mayor calidad en el registro y control de las variables y su procesamiento posterior.

El esquema de la instalación se muestran en la (figura 3.15), consta de los tanques 1 y 2, para la calibración del tubo Venturi y de recepción de la pulpa hidrotransportada respectivamente, las bombas centrífugas 3 y 4, los puntos de toma de presión 5, el tubo Venturi 6, los tramos de tuberías 7, 8 y 9, para determinar las pérdidas hidráulicas, el drenaje del sistema por la válvula 12, las válvulas de regulación 13 y 14, y las ventanas del cristal 15 y 16. Desde la (figura 3.2 a la 3.5) se muestran vistas parciales de la instalación que proporcionan imágenes muy descriptivas de las secciones más importantes que la componen.

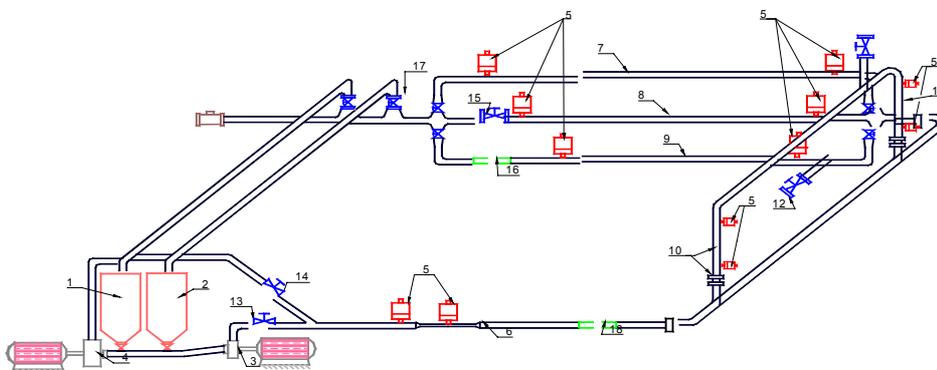


Figura. 3.1. Esquema de la instalación de hidrotransporte para la modelación de flujos y ensayos de bombas.

Las tuberías 7,8,9, poseen los diámetros 50, 100, 150 mm respectivamente y los puntos de tomas de presión están separados por longitudes de tubos de 20, 14.5 y 10 m respectivamente.



Figura 3.2 Instalación de hidrotransporte a escala semi -industrial.

Los puntos 5 (para medir la presión) se encuentran alejados de los extremos de la tubería a distancia igual o mayor de 40 D, para evitar las influencias de las perturbaciones más cercanas (codos, ventanas de cristal, etc.). El punto de observación del flujo de la pulpa (ventana de cristal) se encuentra situado a 5.5 m del tubo de Venturi.

El tanque 1, posee un volumen de 1.9 m³ y el tanque 2, de 2.9 m³ . La bomba 3 tiene una capacidad de 160 m³ / h, y, la bomba 4, de 60 m³ / h. Durante la toma de datos experimentales, la instalación opera en circuito semi – cerrado (succión, impulsión, canal (17) y tanque) .La limpieza se logra con el trabajo de la instalación en circuito abierto (succión, impulsión y drenaje).

Para eliminar el aire en cada medición se tomaron diferentes medidas, una de ellas fue la ubicación de ventosas mediante las cuales se expulsaba el aire de la tubería a la atmósfera.

La regulación del caudal de la bomba se realizó con ayuda de una válvula de compuerta que se encuentra en la tubería de alimentación. El llenado del sistema (con agua amoniacal, primero, y añadiendo sólido, después) se efectuó directamente en el tanque receptor- regulador.

La medición del caudal de la pulpa se realizó con un flujómetro electromagnético NP-11(16). Para su calibración, se utilizó el método del peso volumétrico con ayuda de un tanque graduado (1), instalado al final del circuito de tubería en serie con el colector de alimentación (2).

El tiempo de llenado del tanque calibrado se midió con un cronómetro con precisión de 0,1 s. El error máximo durante la determinación del caudal no fue mayor de 1,5 %. La temperatura del agua amoniacal y de la pulpa en el colector, se midió con un termopar situado en el tanque.

Las pérdidas de presión en la zona investigada se midieron con transmisores de 0 – 5 mA, los cuales captan la presión, la transforman en energía eléctrica, y envían la señal para un registrador central, el cual da la información de los valores de presión medido en cada punto.

La pendiente hidráulica se determinó por la expresión;

$$i = \Delta P_{\text{roz}} / L \quad (\text{Pa/m}) \dots\dots\dots(3.1)$$

Donde:

ΔP_{roz} – Caída de presión por rozamiento,(Pa)

L – Longitud de la tubería entre los puntos de toma de presión,(m)

El valor de las divisiones de la escala de peso es de 0,05 Kg. Por los datos de estas mediciones el error relativo durante la determinación de la concentración no superó el 1%.

Para el estudio del proceso y carácter del movimiento de la pulpa, fueron utilizados tramos de 100 (8) y 150 mm (9), la ventana de cristal (16) colocada en la tubería de 150 mm (8). La concentración de la pulpa periódicamente se controló a través de la toma de muestras con su posterior corrección.

La investigación de los parámetros de transportación de las colas se realizó durante la variación de la concentración másica de 25 hasta 50 % y a las temperaturas de 28, 60 y 90°C.

El contenido de las partículas sólidas, para un volumen dado de la hidromezcla, se calculó por la siguiente fórmula:

$$S = m_s / m_s + m_a \dots\dots\dots(3.2)$$

Donde: S – Concentración en peso, adimensional.

m_s – masa del sólido, Kg.

m_a - masa del agua, Kg.

La concentración volumétrica se determinó por la expresión:

$$Cw = S \rho_p / \rho_s \quad \text{o} \quad Cw = \rho_p - \rho_o / \rho_s - \rho_o$$

donde: ρ_s – densidad del sólido; kg/m³

ρ_o – densidad del agua; kg/ m³.

ρ_p – densidad de la pulpa; kg/ m³.

La densidad calculada de la pulpa se determinó por la fórmula:

$$\rho_p = \rho_s / \rho_s - s (\rho_s - 1)$$

En la tabla 3.1 se dan los datos acerca de los parámetros básicos para la preparación de las suspensiones durante los ensayos experimentales.

Tabla 3.1. Parámetros obtenidos para la realización de los experimentos con

No.	Volumen del tanque, m ³ .	Volumen de la tubería, m ³ .	Masa de mineral, kg.	Concentración de las suspensiones en peso, %.	Concentración de las suspensiones en volumen, %.	Densidades de las suspensiones en, kg/m ³ .		
						28°C	60°C	90°C
1	1.820	1.028	949.3	25	8.78	1230	1190	1046
2	1.820	1.028	1220.5	30	11.45	1300	1235	1105
3	1.820	1.028	1898.6	40	19.09	1500	1425	1275
4	1.820	1.028	2563.2	45	24.8	1650	1568	1400
5	1.820	1.028	2848	50	28.6	1750	1663	1488

las colas en la instalación semi – industrial.

3.2.1 Dependencia de gradiente hidráulico ($i = \Delta P / L$) con la velocidad en tuberías circulares.

Las investigaciones de los parámetros de hidrotransporte de las colas se realizaron para concentraciones de 25, 30, 40, 45 y 50 % en peso de sólidos (tabla 3.1) en un rango de temperatura de 28 – 90⁰ C.

Los datos experimentales fueron elaborados, obteniéndose las relaciones $i = f(v)$ para el flujo de cola en las tuberías de 100 y 150 mm de diámetro.

En las figura 3.7 se muestran las curvas a 28°C. En ellas se observa que durante el hidrotransporte de las pulpas de colas del proceso CARON se presentan, en general, dos regímenes de movimiento: estructural (laminar) y turbulento. En los gráficos, no se distingue claramente la existencia de una zona de transición debido, muy probablemente, a que esta es muy breve y los datos experimentales obtenidos no resultan suficiente para su representación clara. Es por ello que el cambio de régimen, aparentemente, es brusco.

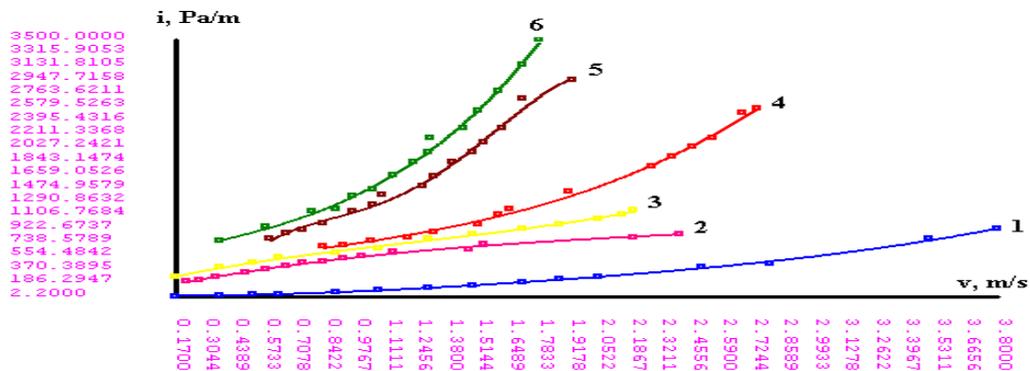


Figura 3.7. Dependencia $i = f(v)$ para el movimiento de las pulpas de cola (muestra R-1) en un tubo circular de $D = 150$ mm a la temperatura de 28°C y a las concentraciones: 1– agua; 2– 25 %; 3– 30 %; 4– 40 %; 5 – 45 %; 6 – 50 %.

En la figura, solo se aprecia bien el cambio de régimen para las concentraciones de 45 y 50 % (en la tubería de 150 mm) y para 50 % (en la tubería de 100 mm). Las restantes curvas muestran solo el régimen turbulento.

Los puntos experimentales correspondientes a la zona turbulenta presentan, en todos los casos, un comportamiento no lineal.

La zona inicial de las curvas que describen el régimen estructural puede ser representada por una recta que tiende a interceptar el eje de las ordenadas a una distancia dada del origen. Para diferentes concentraciones másicas, estas rectas tienen diferentes ángulos de inclinación (figura 3.7). Las curvas $i = f(v)$ obtenidas para el régimen turbulento tienen mayor pendiente que las curvas análogas para el agua.

En la figura 3.7 se observa que la posición de las curvas depende de la concentración de sólidos, mostrando las mismas características y se diferencian por un incremento de las pérdidas hidráulicas debido al aumento de la fase sólida en la hidromezcla.

Los datos representados en la figura 3.7 fueron procesado estadísticamente mediante un programa de computación (Tierra) con vistas al ajuste de las curvas a una ecuación polinomial de $i = f(v)$, tal como se muestra en las tablas 3.2 y 3.3. El mismo procedimiento se aplicó para las curvas obtenidas a las temperaturas de 60 y 90°C, en el mismo rango de concentraciones de sólido, para todas las suspensiones de las muestras estudiadas. Los resultados se dan en las tablas 3.1 a 3.6 del Anexo 3.

Con la finalidad de describir el efecto de la temperatura, en la figura 3.8 se presentan las curvas de $i = f(v)$ ($D = 100\text{mm}$), a las temperaturas de 28 y 90°C y para una concentración de 50% de sólido correspondiente a la muestra R-3. Puede verse en la figura, que con el aumento de la temperatura el límite de fluidez de las pulpas aumenta progresivamente, por lo que las viscosidades efectivas de las suspensiones decrecen, lo que provoca una disminución apreciable en las pérdidas hidráulicas .

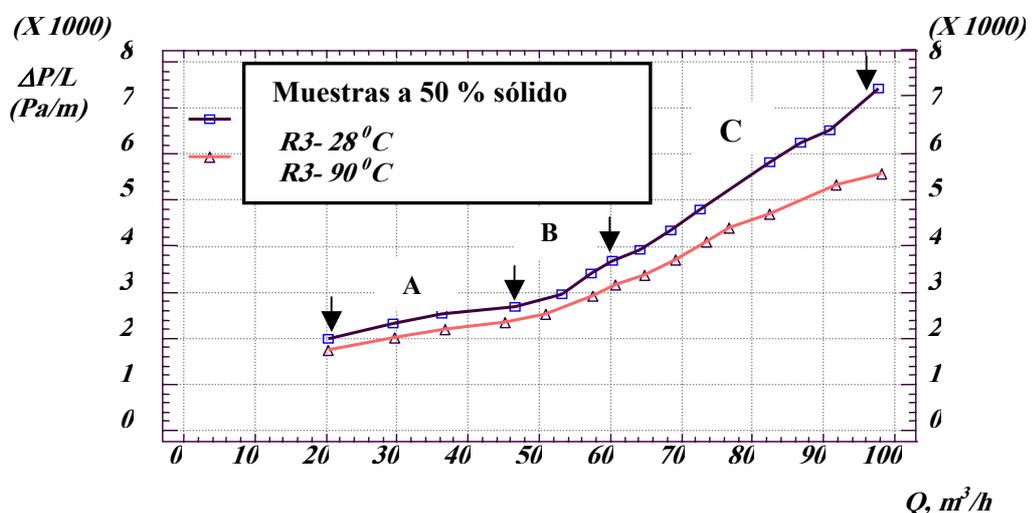


Figura 3.8 Curvas de $\Delta P/L$ vs Q que demuestran el efecto de la temperatura.

En las curvas se observan con claridad los tres regímenes de flujo (laminar, transición y turbulento) que están representada por las zonas A, B, C, respectivamente. En relación con esto ultimo, la posibilidad de obtener datos de las tres zonas depende de la concentración de sólidos, fundamentalmente. Así para concentración de 50% se logran las tres zonas, en cambio, para 40% de sólido se observa solamente la zona C.

Es necesario indicar que una de las peculiaridades del flujo de las colas lo constituye la zona transitoria entre el régimen laminar y el turbulento. Así, para una misma concentración (40 ó 50 % de peso en sólido), al incrementar la temperatura se reduce la magnitud de u , lo que indica la destrucción de los lazos estructurales de las colas y un cambio en la distribución del perfil de velocidades por la sección transversal de la tubería, mediante el cambio del régimen de movimiento por la relación $V_{\text{máx.}} / V_{\text{med.}} = 1,27 - 1,68$.

Con vista a describir la influencia de la naturaleza de las muestras, en la figura 3.9 se presenta la dependencia $i = f(v)$ ($D = 100\text{mm}$) de las suspensiones correspondiente a las muestras R-1 y R-3, a 90°C y 50% en peso de sólido. En la figura se observa que, para una misma velocidad, el gradiente de presión es mayor para la muestra R-3. Este comportamiento corrobora los resultados de las curvas de flujo (comportamiento reológico) y de los resultados de estabilidad en el Capítulo II. Para ambas muestras se distinguen las zonas correspondientes a los regímenes de flujo laminar y turbulento.

Comportamientos similares se obtienen para todas las muestras, a las tres temperaturas estudiadas y a todas las concentraciones, las cuales no se muestran en el trabajo, pero pueden ser comprobadas a través de los gráficos de $i = f(v)$ presentados anteriormente, tanto en el texto como en el Anexo 3.

Tabla 3.2. Resultados de la elaboración de los datos experimentales (D = 100 mm).

Concentración másica. (C %).	Ecuación.	Coefficiente de correlación.	Desviación estándar.
agua	$i = (-14.0476) \cdot (1) + (26.6143) \cdot (V) + (96.7643) \cdot (V^2)$	0.9999	13.216
25	$i = (1023.3834) \cdot (1) + (-2304.622) \cdot (V) + (2287.4066) \cdot (V^2) + (-762.9451) \cdot (V^3) + (84.9025) \cdot (V^4)$	0.9933	100.1268
30	$i = (-151.5753) \cdot (1) + (1218.2622) \cdot (V) + (-372.6291) \cdot (V^2) + (50.2225) \cdot (V^3)$	0.9957	65.6221
40	$i = (2382.9303) \cdot (1) + (-3299.1734) \cdot (V) + (2805.6233) \cdot (V^2) + (-856.4800) \cdot (V^3) + (91.1303) \cdot (V^4)$	0.9884	91.7649
45	$i = (53.2449) \cdot (1) + (1229.4922) \cdot (V) + (-279.5508) \cdot (V^2) + (41.9858) \cdot (V^3)$	0.9957	85.3446
50	$i = (2403.3956) \cdot (1) + (-2338.5546) \cdot (V) + (1566.4489) \cdot (V^2) + (-197.4389) \cdot (V^3)$	0.9965	112.6731

En la tabla 3.7 del Anexo 3 se dan los parámetros de hidrot transporte obtenidos en la instalación semi-industrial para las pulpas de colas (muestra R-1), a diferentes concentraciones 40-50% que siguen el comportamiento de los plásticos Bingham.

El comportamiento de las relaciones $i = f(v)$ obtenidas para las pulpas de cola (que se han descrito en los gráficos) es similar al obtenido por otros autores para suspensiones de caolín, carbón, laterita, serpentina blanda y otros en el flujo de otros materiales por tuberías de distintos diámetros, Izquierdo(1989), Pakrovskaya (1985), Pérez(1970), Smoldriev(1989), Suárez(1989), lo cual demuestra las peculiaridades comunes que

caracterizan el flujo de las hidromezcla por tuberías, independientemente de la naturaleza y propiedades de la fase sólida y del medio dispersante, tal como se han explicado por Smoldriev y colaboradores (1989) (Ver Capítulo I).

3.3 Correlaciones para el cálculo del gradiente de presión para las hidromezclas de cola con sistema trifásico.

3.3.1 Modelo físico para describir el flujo de las suspensiones de cola a través de tuberías.

En el capítulo I (epígrafe 1.10), se presenta un resumen acerca de las estructuras del movimiento para el caso de las hidromezclas trifásicas (conformado por sólido- líquido-gas). Allí se describen varios tipos de estructuras en dependencia del grado de influencia de la fase gaseosa sobre las características de flujo de este tipo de suspensiones. Así se describe la estructura lamelar (obturada), la emulsionada y la de barra o película. En todos los casos, para describir el flujo de los sistemas trifásicos, hay que tener en cuenta la influencia del número de Froude, dado que la presencia de la fase gaseosa impide que la mezcla sólido-líquido llene completamente la tubería. Por consiguiente, el flujo trifásico por tubería se caracteriza por el movimiento del gas en la masa de la hidromezcla en forma de burbujas (que pueden ser de diferentes dimensiones), conformando una película que envuelve la fase sólido-líquido, o formando un pistón por el centro de la tubería.

Durante la realización de los ensayos experimentales correspondiente a la presente Tesis en la instalación semi-industrial a través de la ventana de cristal que se ha descrito en el epígrafe 3.1 y en las pruebas que se llevaran a cabo en el sistema de transportación de cola en explotación en la fábrica, se pudo observar a todas las temperaturas pero con mayor incidencia a 90°C y a bajas concentraciones (30%), los gases amoniacales disueltos en las suspensiones crean burbujas que se desplazan a lo largo de la tubería dentro de la masa sólido-líquido en movimiento; mientras que a alta concentraciones (40-50% de sólidos) se constató que la fase gaseosa se separa en la parte superior de la tubería horizontal y la mezcla espesada se desplaza por la parte inferior de esta. Este cuadro demuestra que las

suspensiones de colas al transportarse a través de las tuberías lo hacen en forma de flujo trifásico según la estructura lamelar u obturada que se describe en el epígrafe 1.10 del Capítulo I.

Tal como se explica en el epígrafe señalado para tuberías horizontales, la caída de presión total por unidad de longitud de la suspensión trifásica se debe a los efectos de fricción más una contribución causada por la aceleración de la mezcla como resultado de expansión del gas. Es por ello que, para un sistema trifásico la caída de presión en la tubería resulta mayor que para un sistema bifásico sólido-líquido en iguales condiciones de operación.

Para la determinación de la caída de presión por unidad de longitud (pendiente hidráulica) para el flujo trifásico de la cola se propone utilizar la relación siguiente:

$$i = \frac{\Delta p}{L} = \varphi \frac{2f \cdot \rho \cdot v^2}{D}, \text{ Pa/m} \dots \dots \dots (3.4)$$

Donde: *i* – pendiente hidráulica durante el movimiento de la mezcla trifásica.

f – coeficiente de fricción. Se estima por las ecuaciones (1.17) a (1.20) ó por la figura 5 (Anexo1).

φ – coeficiente de corrección que tiene en cuenta la presencia de vapores de amoníaco en la mezcla, y que ocasionan efectos hidrodinámicos adicionales, así como que impiden el llenado de la tubería por la pulpa.

Un valor medio de $\varphi = \varphi(Fr)$ (quedando implícito el He) puede ser estimado por la ecuación (3.5) o por la figura 3.11.

$$\varphi = (7.621) \cdot (1) + (0.314) \cdot (Fr) + (2.122) \cdot (1/Fr) + (-2.877) \cdot (\sqrt{Fr}) \dots \dots \dots (3.5)$$

Fr – criterio de Froude, determinado por la velocidad promedio de la mezcla. Los resultados del ajuste de mínimo cuadrado y la validación del modelo para calcular *φ* por la expresión 3.5 aparece reflejada en la tabla 3.8 del Anexo 3.

En la figura puede verse que el coeficiente de fricción es una función del Re y del He para el régimen laminar, mientras que para la zona turbulenta prácticamente solo depende del Re. El comportamiento de las curvas es similar al mostrado en la figura 5 (Anexo 1), para sistemas bifásicos, pero con valores de f muy superiores a los de esta.

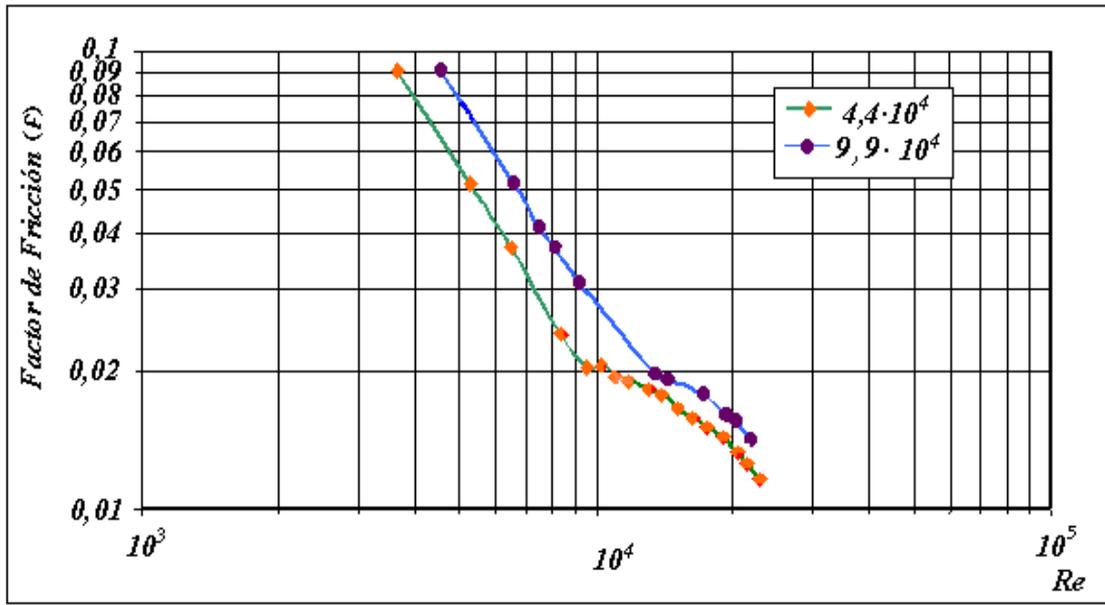


Figura 3.10 Curvas de f vs Re para diferentes valores del número adimensional He.

A partir de los resultados elaborados, en este trabajo, se obtuvo una correlación que permite estimar el coeficiente de fricción experimental en la zona turbulenta, la cual se da a continuación:

$$f_{\text{exp}} = \frac{10^C}{\text{Re}^{1,0621}} \dots\dots\dots(3.3)$$

$$C = 3,7037 - 6,3205 \cdot 10^{-6} \text{He}$$

Esta expresión se obtuvo con un coeficiente de correlación de 0,9748, y resulta válida para valores de He = 44000 – 100000, y Re = 10000 – 50000.

- Se ha visto en el epígrafe 1.9 (Capítulo I) que el coeficiente de fricción, para el flujo de materiales que siguen el modelo reológico de Bingham, es una función del número de Reynolds, del número de Hedstrom y del número de Froude, los cuales se definen en la ecuación (1.27). Para sistemas bifásicos, el coeficiente f puede ser estimado por las ecuaciones (1.18), (1.19) y (1.20) en dependencia del régimen de flujo.

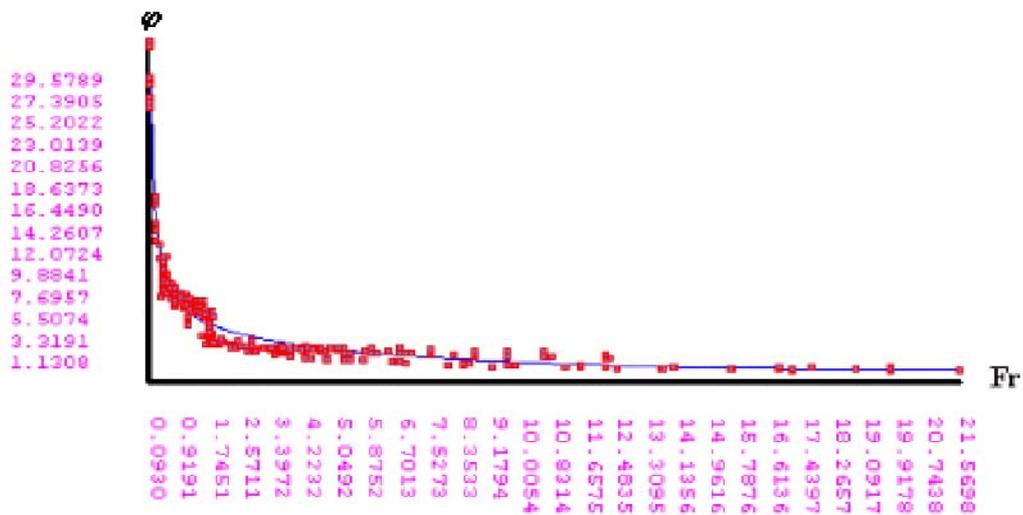


Figura 3.11 Coeficiente de corrección medio ϕ , para las pérdidas hidráulicas en función del Fr en tuberías de $D = 100$ y 150 mm.

3.5.2 Construcción de las curvas del sistema.

Para la construcción de las curvas del sistema con la ayuda del programa Microsoft Excel se representan en el gráfico los valores de altura de la red contra los valores de caudal (tabla 3.6), para los cuales se determinaron, haciéndola interceptar con la curva de la bomba, obteniéndose así el punto de trabajo del sistema para la línea $A L = 1654$ m, según se muestra en la figura 3.13.

3.6.4 Resultados de la modelación de la ecuación de altura y potencia de la bomba.

$$H = A + B \cdot Q + C \cdot Q^2 \dots\dots\dots(3.17)$$

$$N = D \cdot Q + E \cdot Q^2 + F \dots\dots\dots (3.18)$$

Donde:

H: Carga. (m)

N: potencia.(Kw.)

Q: caudal (m³/s)

A,B,C,D,E,F: coeficientes que se obtienen de las curvas dadas por el fabricante de bombas. Con ayuda del programa MathCAD y del sistema de ecuaciones, se forma una matriz para determinar los coeficientes A,B,C,D,E,F.

Tabla 3.2. Valores de los coeficientes (agua y cola).

Coeficientes	Para el agua	Para la cola
A	70	43
B	72.654	44.834
C	74.32	45.851
D	60	33.
E	61.345	33.842
F	62.225	34.323

Así se obtienen las expresiones que describen la carga y la potencia de la bomba, en función del caudal:

Para el agua

Para la cola

$$H = 70 + 72.654 \cdot Q + 74.32 \cdot Q^2 \quad H = 43 + 44.834 \cdot Q + 45.851 \cdot Q^2 \dots\dots (3.19)$$

$$N = 60 \cdot Q + 61.345 \cdot Q^2 + 62.225 \quad N = 33 \cdot Q + 33.842 \cdot Q^2 + 34.323 \dots\dots (3.20)$$

3.6. Sistema de ecuaciones para determinar los parámetros racionales del sistema de hidrotransporte.

Por racionalización de un sistema de hidrotransporte se entiende la selección de aquellos valores de los parámetros de dicho sistema que

garantizan su mayor efectividad. Las variables de operación más importantes en el hidrotransporte lo constituyen la velocidad del flujo de la pulpa y la concentración de material sólido en él. Con el aumento de la velocidad y la concentración se puede disminuir el diámetro de la tubería (por tanto, disminuye el peso de la tubería metálica y su costo) y utilizar bombas de menor capacidad. Esto garantiza la disminución de las inversiones básicas, pero, al mismo tiempo, se aumentan las pérdidas de presión; es decir, crece el gasto de energía eléctrica, y se incrementa el desgaste del equipamiento. Esto conlleva al aumento de los gastos de explotación. Por consiguiente resulta obvio la necesidad de calcular aquellos valores de velocidad y concentración de la pulpa que posibiliten obtener los gastos de explotación mínimos.

Para la determinación de la velocidad racional del flujo de la pulpa (Dakukin 1987), propuso la correlación (3.21):

$$X_{rac} = \left[\frac{1.3 \cdot V1 - V2 \cdot X_{rac}^{-0.5} - 0.5 \cdot V3 \cdot X_{rac}}{1.2 \cdot (V4 + V5 + 1)} \right]^{0.6} \dots\dots\dots(3.21)$$

Donde: X_{rac} – Es la relación entre las velocidades racional e inicial:

$$(X_{rac} = \frac{V_{rac}}{V^0}).$$

V^0 - Valor inicial de la velocidad del flujo, en (m/s); (con frecuencia es la velocidad crítica).

Durante la selección de la velocidad óptima es necesario mantener la condición.

$$V_{rac} \geq V_{CRIT} \dots\dots\dots(3.22)$$

Si esta condición no se cumple, entonces en calidad de la velocidad de trabajo se toma la crítica.

C_b - Costo de una bomba. $C_b=8\ 907.69$ USD.

E- Coeficiente normativo de efectividad de la inversión básica. $E=33,3$.

n_b -Cantidad de bomba en el sistema. $N_b=5$.

S' - Concentración inicial. %

Q_T - Cantidad de sólido transportado en un año, T

ρ_T - Densidad del sólido, Kg/m³

L- Longitud de la tubería, m.

r- Tarifa de pago de la energía eléctrica.

La concentración racional de la pulpa puede ser estimada por la reacción propuesta por Dakukin(1987):

$$Y_{rac} = \left[\frac{V_2}{0.6[V_1 + V_3 \cdot (1 - b_1) + 1] - 0.4 \cdot V_3 \cdot b_1 \cdot Y_{rac} + 0.6[V_4 \cdot b_2 \cdot Y_{rac}^{0.3} - 1.5[V_4(1 - b_2) + V_5]Y_{rac}^{0.9}]} \right]^{-2.5} \dots(3.23)$$

Donde: $Y_{rac} = S_{rac}/S'$

S' - Valor inicial de la concentración.

$$V_1 = \frac{28.2(E + 0.073) \cdot (0.14C_b H + 0.85) \left(\frac{Qt}{\rho t}\right)^{0.15} \cdot (v^*)^{-1.85} \cdot (S)^{0.15} \cdot \delta 1}{n \cdot r_1 + 9.3 \cdot r_2} \dots\dots\dots(3.24)$$

$$V_2 = \frac{0.48(E + 0.073) \cdot (0.13 \cdot C_b H + 0.78) \cdot \left(\frac{Qt}{\rho t}\right)^{0.65} \cdot (v^*)^{-2.35} \cdot (S)^{-0.35} \cdot \delta 1}{n \cdot r_1 + 9.3 \cdot r_2} \dots\dots(3.25)$$

$$V_3 = \frac{2300(E + 0.036) \cdot n \cdot n \varepsilon^{0.63} (v^*)^{-0.85} (S)^{0.04} (0.75 + 1.67 \cdot S)^{0.37} \left(\frac{Qt}{\rho t}\right)^{-0.22} \cdot Lv^{-0.63}}{n \cdot r_1 + 9.3 \cdot r_2} \dots\dots (3.26)$$

$$V_4 = \frac{196(E + 0.15) \cdot n \cdot n \varepsilon^{0.2} (v^*)^{-0.25} (S)^{-0.67} (0.75 + 1.67 \cdot S)^{0.8} \left(\frac{Qt}{\rho t}\right)^{-0.07} \cdot Lv^{-0.2}}{n \cdot r_1 + 9.3 \cdot r_2} \dots (3.27)$$

$$b_1 = \frac{0.62 \cdot S}{0.75 + 1.67 \cdot S} \dots\dots\dots(3.28)$$

$$b_2 = \frac{1.34 \cdot S}{0.75 + 1.67 \cdot S} \dots\dots\dots(3.29)$$

Las dependencias (3.21) y (3.23), se resuelven por el método de aproximación sucesiva (aplicar método de Newton). Inicialmente se toma ($X_{rac} = Y_{rac} = 1$), y se colocan en la parte derecha de las ecuaciones (3.21) y (3.23). Seguidamente, el ciclo de cálculo (X_{rac} y Y_{rac}), se repite. El cálculo se

termina, cuando la diferencia entre los valores calculados y los supuestos sean pequeños. Con frecuencia son suficientes tres o cuatros ciclos de cálculo.

Es necesario señalar que las dependencias (3.21) a (3.29), fueron elaboradas para materiales sólidos con una granulometría no mayor de 3 mm, con resultados confiables en esos límites.

A continuación, se procede a ilustrar con su ejemplo el uso del sistema de ecuaciones propuesto.

Para resolver las ecuaciones del tipo $Z=f(z)$ se pueden utilizar diferentes métodos analíticos, numéricos y gráficos. Debido a la complejidad que presenta el sistema de ecuaciones obtenidas para la determinación de X_{rac} y Y_{rac} , se prefiere utilizar un método gráfico-numérico, apoyándose en el software Derive for Windows, versión 4.0. Para ello se transforman las ecuaciones del tipo $Z=f(z)$ a ecuaciones del tipo $0=f(z)-z$ y se grafica la función $U=f(z)-z$ para determinar si existían ceros de esta función y en que intervalos puedan estar situados. En ambos casos se determinó el comportamiento de las funciones $U=f(v)-v$ y $U=g(c)-c$ donde ambas presentan dos ceros (interceptos con el eje horizontal) cada una. A partir de conocer en que intervalos se encontraban estos ceros y usando la opción SOLVE de este software se obtuvieron, por el método de Bisección, las raíces de cada ecuación.

$$X_1=0,063\ 289$$

$$X_2=0,754$$

$$Y_1=1.14\ 979$$

$$Y_2=17.7\ 597$$

Ahora toca decidir, para cada caso, cual es la solución más adecuada.

Para el caso de la concentración es adecuado exigir que $C_{rac} \leq C_{cr}$. Puesto que $C_{rac}=Y_{rac} * Y_{ini}$; $Y_{ini}=35$; $Y_1=1,14979$; $Y_2=17,7597$, entonces $C_{rac1}=Y_1 * 35=40,24$ y $C_{rac2}=Y_2 * 35=62,1589$; sobre la base de que $C_{cr}=60$, se toma $C_{ract1}=40,24\ 265 \leq 60=C_{cr}$.

Para el caso de la velocidad es adecuado exigir que: $V_{opt} \geq V_{cr}$. Puesto que $V_{rac}=X_{rac} * V^0$ y $V^0=0,99$ m/s; $X_{rac2}=0,7\ 616$ y $X_{rac1}=0,0\ 639282$; entonces,

$V_{rac1} = X_{rac1} * 0,99 = 0,063289$; $V_{rac2} = X_{rac2} * 0,99 = 0,754$; de ahí que $V_{cr} = 0,44$ m/s, por lo tanto, se toma $V_{rac2} = 0,754 \geq 0,44 = V_{cr}$.

CAPITULO IV . VALORACIÓN TÉCNICO – ECONÓMICA.

4.1. Valoración Técnico- Económica.

Una gran parte de los gastos durante el hidrotransporte lo constituyen los gastos de energía eléctrica, por lo que su economía es una de las direcciones estratégicas de la producción en la actual etapa. Una correcta selección y organización en la explotación del equipamiento de bombeo en régimen económico permite el ahorro de energía eléctrica y aumentar la efectividad del transporte hidráulico.

Para proyectar y explotar con efectividad el equipamiento de las instalaciones de hidrotransporte es necesario seleccionar correctamente el equipamiento de bombeo para las condiciones concretas de explotación, determinar y analizar el régimen de trabajo de las bombas en el sistema de hidrotransporte en correspondencia con los requerimientos exigidos y, considerando mínimo los gastos de energía eléctrica, determinar y analizar los indicadores técnico - económico de trabajo del sistema de hidrotransporte.

Dentro de los indicadores técnico - económicos principales de la instalación de hidrotransporte se encuentran: productividad anual de la instalación por el sólido transportado , en $m^3/año$; potencia instalada sumaria del motor, en kW.; gasto anual de energía eléctrica kWh/año; gasto específico de energía eléctrica por $1 m^3$ de material transportado, kWh/ m^3 ; costo de energía eléctrica gastado en la transportación de $1 m^3$ de material sólido \$/ m^3 . Por otra parte los costos de mantenimiento decrecen al disminuir las y fallas y averías del equipamiento. También disminuye el costo total de los descuentos anuales de los activos fijos al incrementarse el tiempo de vida útil de la instalación.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados de los principales indicadores tomados en cuenta en la determinación de los gastos de explotación de la instalación actual trabajando en dos condiciones (a régimen normal de trabajo (1) y a régimen cavitacional (2)) de operación según la metodología propuesta por González B.M.(1997).

En condiciones normales de operación, la instalación trabaja con una capacidad de 160 m³ / h; sin embargo cuando entra en régimen cavitacional su capacidad se reduce a la mitad, ocasionando pérdidas por mayor consumo de energía y mantenimiento de la instalación, tal como se refleja en la tabla 4.1 con el correspondiente incremento de los costos de producción de la Empresa y una menor productividad. Por consiguiente, si se logra eliminar el régimen cavitacional se ahorrarán 3,2 \$ USD por cada m³ de cola transportada, con un ahorro en los gastos de explotación de 40 340 \$USD anualmente.

4.1 . Costo de transportación de un m³ de cola, \$ USD.

INDICADORES	1	2
Gastos de salario del personal de operación.	17769.7	17769.7
Gastos por consumo de agua para disminuirle la temperatura a la cola.	32850	32850
Gastos de energía eléctrica.	143848.4	182208
Gastos por iluminación.	78.84	78.84
Gastos imprevistos.	14	14
Gastos por mantenimiento.	3772	4883
Gastos de amortización de las bombas.	2672.307	2672.307
Gastos de amortización de las tuberías y soportes.	4892.065	4892.065
Gasto del salario del personal indirecto	813	813
Total (G_b)	205943.112	246180.912
Gasto para transportar un m ³ de cola en 3.5 Km (USD)	1.3	4.50

Teniendo en cuenta el análisis de lo ilustrado en la tabla 4.1, acerca de la situación actual de la Planta de Recuperación de Amoníaco, se concluye que, aplicando los resultados obtenidos en la presente Tesis, es posible, lograr mejoras sustanciales favorables a la producción y a la economía de

la fábrica. A manera de ejemplo, se desarrolla en forma resumida , a continuación , un estudio de factibilidad del mejoramiento del sistema de transporte de las colas en la Empresa Che Guevara.

4.2 Resumen de la factibilidad del mejoramiento de la eficiencia del sistema de transporte de cola en la Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara.

El estudio sobre el mejoramiento de la instalación de colas de la Planta Recuperación de Amoniaco de la Empresa “Cmdte Ernesto Ché Guevara”, a fin de mejorar su eficiencia se desarrolla sobre la base de determinar los parámetros racionales de trabajo, que permitan lograr estabilidad y disminuir los costos en el transporte de las colas. Para ello se ha tenido en cuenta el aumento de capacidad requerido por la Planta para los próximos 5 años. Como resultado de este estudio se recomienda el cambio de la instalación actual, en específico, el cambio de las actuales bombas por otras bombas centrífugas especialmente diseñadas para el bombeo de pulpas abrasivas, tipo PKB 2001, con una variación de la potencia de 75 KWh a 55 KWh, y el cambio del diámetro de tuberías del actual D-200 a D-250 para mejorar las características de flujo de la pulpa.

Alcance

En este resumen se pretende presentar un cálculo de prefactibilidad de la instalación, con vistas a determinar desde el punto de vista económico financiero, las características del proyecto citado.

Modelación

Se ha utilizado un modelo establecido para 7 años en correspondencia con el tiempo de vida útil calculado a la instalación, con 6 meses para la contratación, entrega, construcción y montaje y 6,5 años de explotación. Ha sido elaborado el cálculo del costo de inversión, estado de resultados para el proyecto, flujo de caja y flujo de fondos, así como el cálculo del financiamiento requerido.

Ingresos

Inicialmente fueron calculados los gastos de la instalación actual y de la nueva instalación, resultando un ahorro para el proyecto en los siguientes elementos:

Ahorro de electricidad (por concepto de instalar bombas de menor potencia), calculado a un precio de 70 USD/MW). Ahorro de consumo de agua (m^3 por año a un precio de 0,15 USD/ m^3). Ahorro por mantenimiento y materiales auxiliares de la operación, por ser este equipamiento más fiable. Ahorro por gastos imprevistos, el cual se valoró conservadoramente en 13600 dólares para el primer año, sobre la base de una reducción esperada del índice de rotura a de 0,20 a 0,03. También se consideró el ahorro de no ejecutar el recambio de bombas de la instalación actual, la cuál se encuentra depreciada a un 75 %, en el segundo año de vida del proyecto. Este ahorro se proyectó para una sola vez en los 7 años, a pesar de que la instalación actual tiene un tiempo de vida calculado en 3.5 años y la proyectada de 6,25 años.

Gastos de Inversión

La inversión en activos fijos comprende básicamente el recambio de tuberías y bombas, estimadas sobre la base de ofertas y estimados actualizados a precios del año 2002, revisados con personal de la Empresa Importadora del Niquel y de la Subdirección Comercial de la Ché Guevara. La construcción y montaje de la instalación se calcularon sobre la base del costo de los activos fijos que se incorporan, considerando 37% para el montaje y desmontaje de las bombas y 60 % para el de las tuberías. Se consideran gastos preoperativos consistentes en el proyecto de investigación realizado, un proyecto de ingeniería y licencia ambiental. El total de inversión alcanza 223.5 MUSD.

Capital de trabajo

Se reporta un incremento de gastos por este concepto al considerarse un aumento de la inmovilización de efectivo, como resultante del proceso de inversión y un aumento de capacidad del 5% en el uso de la instalación, a partir de la generación adicional de colas como resultado del aumento de capacidad de la planta y la reducción de la ley de mineral en el primer año.

Gastos de Operación

Los gastos de operación de la nueva instalación son similares a los de la actual, exceptuando los gastos de electricidad, mantenimiento, agua e

imprevistos que resultan inferiores a los actuales y de ahí un ingreso neto para el proyecto. Se consideró un incremento de los gastos financieros a consecuencia del pago de intereses relacionados con la inversión.

Indicadores de factibilidad

El valor neto actualizado del proyecto, calculado para una tasa de rendimiento del 15%, como promedio para proyectos similares, resulta positivo en 113,6 MUSD, al término de los 6,5 años de operación, lo que indica que el proyecto resulta económicamente factible y que como resultado de su realización se generan ingresos para la entidad.

La tasa interna de retorno de 44% indica el límite del costo del financiamiento requerido, muy por encima del disponible que se estima en 11,5 % de interés anual, lo que confirma la factibilidad del proyecto.

El período de recuperación es de solo 11 meses. Si no fuera considerada la necesidad de renovar ningún equipamiento de la instalación actual, en los próximos años aún el periodo de recuperación del proyecto no superaría los 3.2 años.

Financiamiento

Se considera una ejecución al crédito de 190.0 MUSD, al 11.5 %, con un período de repago de 4,5 años, con un período de gracia de 6 meses y un gasto financiero total de 67.5 MUSD. Estas condiciones están dentro de las normalmente consideradas para la Empresa en su etapa de expansión. El financiamiento se proyectó únicamente a partir de los recursos que genera el proyecto por ahorros.

Los principales indicadores obtenidos en este estudio se dan en las tablas 4.1 a 4.5 del Anexo 4.

4.2. Conclusiones parciales

1.- El análisis económico realizado revela que los principales gastos de la instalación son provocados por la cavitación incrementando el gasto energético y los gastos por concepto de mantenimiento. Si se lograra eliminar este fenómeno del sistema, se ahorrarían 3,2 USD por cada metro cúbico transportado con un ahorro de los gastos de explotación de 40 337,8 USD.

2.-En el estudio de factibilidad de la propuesta de mejora de la instalación industrial, para las condiciones de operación de la Planta de Recuperación de Amoniaco, se obtienen los siguientes parámetros de rentabilidad: El valor neto actualizado del proyecto, calculado para una tasa de rendimiento del 15%, resulta positivo en 113,6 MUSD, al término de los 6,5 años de operación; la tasa interna de retorno de 44%, un 11,5 % de interés anual, una recuperación es de solo 11 meses. el periodo de recuperación del proyecto no superaría los 3.2 años.

CONCLUSIONES GENERALES.

- 1.- La caracterización del sólido y de la hidromezcla de la cola realizado en la presente tesis, además de ser una novedad, constituye una necesidad para mejorar la actual tecnología de manipulación y transportación de la cola del proceso CARON .
- 2.- La investigación permitió establecer que las colas constituyen un sistema polidisperso con predominio de partículas inferiores a $43\ \mu\text{m}$, con partículas en forma de elipsoides de revolución, que presentan un índice de aplastamiento de 0,58 y un diámetro equivalente promedio de 0,04 mm, y , además , que la fase sólida presenta una composición química bastante estable y conformadas por varias fases mineralógicas, siendo las fases principales, la Magnetita y la Maghemita, esta última , al parecer, surge por oxidación de una parte de la magnetita como consecuencia de la acción de las condiciones de operaciones actuales en las Plantas de Lixiviación y la de Recuperación de Amoníaco. La caracterización magnética demuestra que la fase sólida posee propiedades típicas de los materiales ferrimegnéticos, debido a al alto contenido de Magnetita y Maghemita.
- 3.- Los ensayos de estabilidad confirman que dado el alto contenido de partículas finas, las hidromezcla de las colas se comportan como un sistema coloidal, cuyos valores de p.z.c en agua destiladas son similares a las reportadas en la literatura para suspensiones de Magnetita y de Maghemita, como era de esperar , las magnitudes de los p.z.c disminuyen hacia valores de pH más ácidos en las pulpas preparadas en agua amoniacal. Se comprueba la gran influencia que ejercen estas propiedades superficiales sobre la reología y de la sedimentación de las pulpas.
- 4.- La caracterización reológica permitió establecer el carácter no newtoniano de las colas, dependiendo grandemente su comportamiento de la concentración de sólidos. Así se observa un flujo seudoplástico a concentraciones de 25 – 35 % en peso y un comportamiento plástico Bingham para valores mayores de 40 % en peso , a todas las temperaturas estudiadas (28- 90 ° C) .

- 5.- Se obtuvo experimentalmente las curvas de estabilidad y los puntos de carga cero (p.z.c.) en agua destilada y en agua amoniacal industrial. Los valores de los p.z.c. en agua destilada son cercanos a los registrados en la literatura para suspensiones de Magnetita y Maghemita en agua destilada (pulpas de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”), estos valores se desplazan hacia la izquierda es decir hacia la zona más ácida (pH más bajo) lo que influye considerablemente en la reología de las pulpas y sedimentación de los sólidos en las mismas.
- 6.- Las investigaciones de los parámetros del transporte hidráulico de las colas de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” con un componente gaseoso, mostraron mayores caídas de presión y factores de fricción que los reportados en la literatura para pulpas bifásicas normales, bajo las mismas condiciones de trabajo. La composición mineralógica, la concentración y temperatura de las muestras ejercen gran influencia sobre el gradiente hidráulico. Se obtuvo las correlaciones gráficas y expresiones matemáticas que describen el flujo de esas colas por tuberías; así como el factor de fricción para régimen laminar y turbulento.
- 7.- La velocidad racional de transportación se obtuvo para el inicio del régimen turbulento a partir de criterios de menor consumo de energía por toneladas de sólidos transportados, los que resultaron inferiores a los aplicados en la actualidad y reportados en la literatura para velocidades críticas de pulpas bifásicas normales. En las velocidades racionales obtenidas, el sólido se mantuvo en suspensión en la pulpa y no se observó sedimentación alguna.
- 8.- El conjunto de correlaciones obtenidas permitió conformar un modelo matemático aplicado para la metodología de cálculo de las instalaciones de transporte de colas trifásicas en el proceso CARON, que permitió calcular las instalaciones, establecer regímenes racionales de trabajo y seleccionar adecuadamente el equipamiento; así como valorar el trabajo de las existentes, lo que constituye el principal problema de estas en la actualidad.

RECOMENDACIONES

- 1.- Recomendar a la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara la introducción de los resultados de esta tesis con vista a eliminar el régimen de operación cavitacional que actualmente se presenta en el sistema de bombeo de las colas con el objetivo de disminuir el consumo de agua y energía eléctrica que provocan pérdidas considerable a la fábrica.
- 2.- Proponer a la dirección de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", un proyecto para la evaluación y /o modificación de las instalaciones que operan con colas, con vista a la ampliación de las capacidades instaladas sobre la base de la reducción de los consumos energéticos, y de agua, y de gastos de mantenimiento.
- 3.- Propiciar que alguna institución elabore una tecnología que permita la separación de la Magnetita y de la Maghemita de las colas de manera que estas constituyan una posible fuente de materia prima de estos óxidos ferrimagnéticos para ser utilizadas en otra rama de la economía nacional que lo requiera, el cual ayudaría a mejorar el balance económico de la Empresa.
- 4.- Recomendar a CITMA que se realice un estudio acerca de la anomalía magnética que causa la acumulación de las colas en las proximidades de la ciudad de Moa, dado su impacto ambiental con posibles consecuencias sobre la salud de los habitantes, flora y fauna de la ciudad.
- 5.- Aplicar los aportes metodológicos señalados en la introducción de la tesis en los planes y programas de estudio de las carreras indicadas.

1. ALDANA, E.V. Factores que influyen sobre la compactación de sedimentos en el proceso de sedimentación de pulpas de lateritas. Trabajo de diploma. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 2000.
2. ALEXANDER, B.I. Influencia de la viscosidad del líquido sobre la resistencia de relleno. Investigaciones aplicadas sobre hidrotransportación de productos del beneficio de minerales. Leningrado: Mecanobr, 1987. 119 p.
3. ALEXANDRO, B.I; A.A. KULESHOV. Investigación y establecimiento de los regímenes de la transportación de las colas del beneficio de la Fca. No. 3 de Dshezkazgan GMK. Leningrado, 1986.
4. ALMEIDA, G.M. Evaluación de la eficiencia energética de la planta de recuperación de amoníaco de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998.
5. ANDREIEV, V.I. Manual del constructor de maquinaria. Moscú: Editorial UNESTORGIZDAT, 1987. 3 t.
6. ANDREIEV, S.E. Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Moscú: Editorial Mir, 1980.
7. ANEIRO J.P. Problemas de diseño de elementos de máquinas. La Habana: Ediciones ENSPES, 1983.
8. ASME. Code design formulas for cylinders under internal pressure, 2000.
9. ATSUSHI, T. et. al. Effect of Temperature on rheological properties of Suspensions. *Non – Newtonian Fluid Mechanics*, 1987, 26 (175): 6-16.
10. Auditoria ambiental de la explotación minero metalúrgica del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara, 1998.
11. BEYRIS. J P. Sedimentación de la pulpa cruda en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba. Trabajo presentado en el Primer

- Coloquio Científico Politécnico del ISPJAM. Santiago de Cuba, 1989.
12. BEYRIS. J. P. Mejoramiento del proceso de Sedimentación de la pulpa del mineral laterítico de la Empresa Comandante Pedro Soto Alba.(Moa Níkel S.A), Tesis Doctoral, ISMM, 1997.
 13. BIRD, R.B.; W.E. STEWART; E.N. LIGHTFOOT. Fenómenos de transporte. Barcelona: Editorial Reverté, 1973
 14. BLAISDELL, A.E. Statistics in Practice. Washington: Saunders College Publishing, 1993.
 15. BLESA, M.A. Solid state ionics 101 – 103, 1235 (1997).
 16. BLESA, M.A y col. Colloid interface Sci. 99,32 (1984)
 17. BOCCACINE, A.R. Viscosity of porous Sintered Glasses. *Journal of Materials Science*, 1995, (2): 335-348.
 18. BROW, G.G. Operaciones básicas de la ingeniería química. La Habana: Pueblo y Educación, 1965.
 19. CASTELLANOS, J. Metalurgia Extractiva de los Metales Oxidados de Níquel. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1972. 198p.
 20. CATÁLOGO PUZMEISTER. Bombas Industriales. Federal Republic of Germany, 1996.
 21. CEPRONIQUEL. Estudio de ingeniería. Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Moa, 1999.
 22. CERPA, A. y col. Mineral contents and particle-size effect on the colloidal properties of concentrated lateritic suspensions. *Clay and clays minerals*, 1999, 47 (515): 20-25.
 23. CERPA, A. Propiedades de flujo de suspensiones minerales lateríticas. Influencia de la mineralogía y de las propiedades coloides-químicas. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Madrid, España, 1997.
 24. CERPA, A. y Garcell. L .R Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas. La Habana: Informe al evento Metalurgia 98, 1998.

25. CERPA, A.y col. Rheological properties of. concentrated lateritic suspensions. *Prog. Colloid Polym Science*, 1996, 100 (226): 6-12.
26. CESIGMA. División América. Estudio de impacto ambiental, proyecto de explotación minero-metalúrgico Cupey, Las Camariocas. La Habana, 1997.
27. CHANG, C.A. Análisis de la solubilidad de los complejos amoniacaes de Co 2+. *Revista Minería y Geología*, 1984, (1): 7-15.
28. CHENG, D.C. Viscosity - concentration equations and flow curves for suspensions. *Chemistry and Industry*, 1980, 17 May: 18-23.
29. CHERKASSKI, V.M. Bombas, Ventiladores y Compresores. Moscú: Editorial Mir, 1986.
30. CHILKINSON, I.L. Líquidos no newtonianos. Moscú: Mir, 1964. 216p.
31. CHISTAKOV, V.; E. AGUILILLA DIÉGUEZ. Técnicas de medición industrial. La Habana: Pueblo y Educación, 1986.
32. CHONG, H. Rheological testing and modeling of fresh high performance concrete. *Material and Structures*, 1995, (28): 1-7.
33. CHRISTELLE, T. Syntesis of epoxy-amino multiacrylic prepolymers by relative extinsion. *Jounal of applical polymer science*, 1996, 59: 415-423.
34. CORNELL, R.M.; U. SCHWERTMAN. The Iron Oxides. New York: VCH, 1996
35. COSTA, G.M. et.al. A comprehensive Moessbauer study of highly substituted aluminum maghemite. *Geochemical Society*, 1996, (5): 93-104.
36. CUETO, R.F. Descontaminación del licor residual WL de la compañía Moa Níquel. Descripción y análisis de las principales variantes tecnológicas usando las colas del mineral de la Fábrica Ernesto Che Guevara y otros reactivos. Moa: Centro de Investigaciones de la laterita, 1998.

37. CUETO, R.F. Propuesta tecnológica para descontaminar licor residual WL de la compañía Moa Níquel. Moa: Centro de Investigaciones de la Laterita, 1997.
38. DANIELS, F; R.A. ALBERTY. Físico-química. La Habana: Pueblo y Educación, 1963. 834 p.
39. DARBY, R. Laminar and turbulent pipe flows of non newtonian fluids, in flow dynamics and transport phenomena, 2000
40. DARBY, R. Take the mystery out of non-newtonian fluids. *Chemical Engineering*, 2001, (3): 66-73.
41. DARIAS, M. Introducción a la Química Coloidal. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1987.
42. DEMAÍ, A; F. SOUBIES. Aluminous maghemite as palaeoenvironmental marker in lateritic soils; the case study of the Salitre areas, Minas Gerais, Brazil. Seventh International meeting; Eurolat' 96. Geociencias (Aveiro), 1996: 25-30.
43. DAKUKIN.V.P. Análisis técnico –económico de un sistema de hidrotransporte por tubería. I.M.L, Leningrado, 1987.
44. DESHVARSHEISCHILI, A.B. Sistemas de transporte por tuberías en las plantas de beneficio de minerales. Niedra: Moscú, 1981.
45. DÍAZ, A. Manual de hidráulica aplicada. Santiago de Cuba, Ediciones ISPJAM, 1990.
46. DÍAZ, A. Selección del diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos (segunda parte) flujo por bombeo. *Revista Tecnología Química*, 1999, 19(1): 18-27.
47. DSHUNUSOV, Y. Elaboración del equipamiento complejo para la sedimentación e hidrotransportación de las pulpas finas dispersas. Tesis de Doctorado. Leningrado, 1988.
48. DUNCAN, J. Introducción a la química de superficie y coloidal. Madrid: Editorial Alambra, 1977.
49. DYRAND,R. Transporte hidráulico de los materiales sólidos por decantación. Paris,1952.
50. ECONOSTO. ROYAL General catalogue valves, fitting and related equipment. Róterdam, marzo 2000.

51. EMSEV, B.T. Hidromecánica técnica. Moscú: Editorial Construcción de Maquinarias, 1987.
52. EUDOKINOV, P.D. Proyecto y explotación de planta y beneficio de cola. Moscú, 1978.
53. FALCÓN, J. Sedimentación de minerales lateríticos. *Revista Minería y Geología*, 1995, (2): 16-26.
54. FERRERO, J.M. Tratado de hidráulica. Madrid: Editorial Alambra, 1982.
55. FERRO, A. Estudio de la sustitución de las pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente P. Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 2000.
56. FOMENKO, T.G. Procesos de enriquecimiento de minerales por gravitación. Moscú: Editorial Mir, 1980.
57. FONT, G.; A. SUÁREZ. Diseño de equipos de transferencia de calor para el precalentamiento indirecto de la pulpa en la planta de lixiviación. Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería química, 1995.
58. FOTELNY, I. Effect of the mixing conditions on the phase structure of pp/ps blends. *Journal of Applied Polymen Science*, 1996, 59: 55-164.
59. FRANCO, P.D. Equipos de bombeo. La Habana: Pueblo y Educación, 1981. 212 p.
60. FREUD, E.J; A.G. SIMON. Modern Elementary Statistics. Eighth edition. Washington: Prentice Hall, 1992.
61. GARCELL, L. Características reológicas y mineralógicas de las pulpas limoníticas de Moa en períodos de sedimentación crítica. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería Química., 1984.
62. GARCELL, L. Caracterización reológica de la pulpa de limonita de Moa. *Revista Tecnología química*, 1992, (1): 5-9.

63. GARCELL, L. Comportamiento reológico de la pulpa laterítica. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad Ingeniería Química, 1993.
64. GARCELL, L. Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de Moa, en períodos de sedimentación normal y crítica. Informe investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería química, 1993.
65. GARCELL, L. Determinación de parámetros reológicos en pulpas minerales que se comportan como plásticos reales. *Revista Tecnología Química*, 1984, (2): 14-19.
66. GARCELL, L. Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, 2001, (2): 1 – 40.
67. GARCELL, L. Interfacial and rheological characteristics of maghemite aqueous suspensions. *Colloid Interface Science*, 1998, 205 (470): 68-72.
68. GARCELL, L. Relación entre las características de sedimentación y granulométricos de las pulpas crudas de Moa y la presencia de determinadas fases mineralógicas. *Revista Tecnología Química*, 1995, 15(1): 19-23.
69. GARCELL, L.; A. DÍAZ; G. SURIS. Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1988.
70. GARCELL, P.L; A. CERPA. Caracterización reológica de la pulpa de limonita de Moa. *Revista Tecnología química*, 1992, (1): 63 – 68.
71. GARCÍA, A. Mediciones directas de esfuerzos cortantes iniciales y de propiedades superficiales en suspensiones minerales. Trabajo de diploma, ISPJAM, Facultad de Ingeniería Química, 1998.
72. GARCÍA, A.R. Effect of the geometry and flow characteristics on viscoelastic annular swell. *Journal of non Newtonian fluid Mechanics*, 1995, (6B): 17-21.
73. GARCÍA, J.D. Estudio preliminar de la obtención de un concentrado de cromita a partir de las colas de Nicaro. Trabajo de

- Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1988.
74. GIUSTI, L. The morphology, mineralogy and behavior of fine-grained gold from placer deposits of Alberta: sampling and implications for minerals exploration. Edmonton, Canadá: University of Alberta, 1985
75. GLASTONE, S. Termodinámica para químicos. Madrid: Ediciones Aguilar, 1977. 637 p.
76. GONZÁLEZ, B.M. et.al. Folleto de evaluación de proyectos. Temas escogidos. Santiago de Cuba: Universidad de Oriente, 1997.
77. GONZÁLEZ, E.S. Planificación de los experimentos en los problemas de ingeniería. Curso de Maestría. UCLV, Santa Clara, 1996.
78. GOVSHTOFT, V. Influencia de las fracciones micrométricas sobre los parámetros del transporte hidráulico de carbón. *Transporte hidráulico de carbón*, 1966, (12): 82-88.
79. GUARDIA, M. Influencia del tipo de agua sobre la reología de la pulpa de mineral limonítico de Moa. Trabajo de diploma. ISPJAM, Facultad de Ingeniería química, 1994.
80. GYR, A; H.W. BEWERDORFF. Drag reduction of turbulent flows by additives. Washington: Kluwer Academic Publishers, 1995. 234 p.
81. HERNÁNDEZ, G. Proceso industrial metalúrgico del níquel. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1988.
82. HERNÁNDEZ, J.L et. al. Optimización energética de un sistema de impulsión de agua industrial en una empresa minera. *Revista Innovación*, 2001, (1): 89-94.
83. HERRERA, P. et. al. Caracterización de productos parciales y finales del proceso de beneficio premetalúrgico de las colas de Nicaro a nivel de laboratorio ampliado . Centro de estudio aplicado al desarrollo nuclear Departamento de Materiales, Abril 1994.

84. HUNT, C.P. et.al. Effect of citrate-bicarbonate-dithionite treatment on fine-grained magnetite and maghemite. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 130(1-4): 87-94.
85. HURTADO FREIRE, G. Estudio de la influencia en el medio ambiente del sistema de generación de la Empresa del níquel Comandante Ernesto Che Guevara de Moa y el sistema de transmisión eléctrico adyacente. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1999.
86. IAKOVLEV, S.V; Y.M. DALKOV. Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales. Moscú: Gosstroishdat, 1961. 232 p.
87. IBENSKII, G.B. Transporte de las mezclas de materiales para la construcción por tuberías. Moscú: Gosstroishdat, 1957.
88. ITURRALDE, M. Nuevo modelo interpretativo de la evolución geológica de Cuba. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 1981, (3):22-27.
89. IZQUIERDO, P.R. Estudio de la instalación de hidrotransporte a presión de la pulpa laterítica de la Emp. Cmdte Pedro Soto Alba. *Revista Minería y Geología*, 1989, (3): 16-22.
90. IZQUIERDO, P.R. Investigación de los parámetros y elaboración de los regímenes racionales del transporte hidráulico de lateritas utilizadas en las condiciones de la Fca Cmdte Pedro Soto Alba. Tesis de Doctorado. Leningrado, 1989. 145 p.
91. IZQUIERDO, P. R; A.K. NICOLAEV. Investigación de los parámetros y regímenes racionales de hidrotransporte de las pulpas lateríticas aplicables a las condiciones de explotación de la Empresa "Cmdte. Pedro Soto Alba". *Revista Minería y Geología*, 1995, (1): 57- 59.
92. JAMES.R.O.; G.A. PARKS. Characterization of Acueous Colloids by Their Electrical Double – Layer and Intrinsic Surface Chemical Properties. *Surface and Colloids Science*, 1982, 12: 58-68.

93. JIMÉNEZ, M.J. et.al. Utilización de eyectores para el cebado de bombas centrifugas. *Revista tecnología de la construcción de maquinarias*, 1995, (3): 86-92.
94. KALININ, V.A. Transportación de desechos por tuberías. Mecanización y Electrificación de la Economía Rural Socialista. 1965.
95. KARASIK, B.M. et.al. Investigación del hidrot transporte de los productos de cola de beneficio de las plantas minero - metalúrgicas. Kiev, 1976.
96. KARASSIK, I. Bombas centrífugas: selección, operación y mantenimiento. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1968. 560 p.
97. KARASSIK, J.J. Bombas centrifugas y factores hidráulicos del sistema 2001
98. KIN, S.J.; T.M, KNOWN. Development of mineral simulation methods and analysis of extraction processes of particle filled plastic. Materials subject to slip at the wall. *Powder technology*, 1995, (85): 86-92.
99. KITO, O.; C.M. SIMON. An analytical solution to the viscous flows in curved duct with inlet swirl. *ISME International Journal*, 1995, 38(4): 53-58.
100. KSHONDZER, E.G; A.E. SMOLDRIEV. Funcionamiento de los parámetros de la hidromezcla para conductos industriales de carbón. Fis. Tec. Problemas de elaboración de los yacimientos minerales. Moscú, 1969.
101. LANTIKOV, Z; V.D. FILATOV. Ecuación aproximada de Buckingham del flujo plástico viscoso de sistemas dispersos. *Kolloidnii Revista*, 1963, 25(1): 22-29.
102. ASTOV, B.G. Investigación sobre la Optimización de los parámetros del transporte hidráulico de lodos de alta concentración. Tesis de Doctorado. Leningrado, 1976.
103. LEGRÁ, L.A. Software Tierra (c). Moa: ISMM, 2000.

104. LEONG, Y.K; D.V. BOGER: Surface Chemistry Effects on Concentrated Suspensions Rheology. *Journal. Colloid Interface Sci*, 1990, 136(1): 249 – 258.
105. Ley No. 81 del Medio Ambiente. La Habana: Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, 1989.
106. LÓPEZ, C.H. Optimización del Esquema de beneficio de las colas de Nicaro con fines siderúrgicos. Trabajo de Diploma. ISMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1988.
107. MADEN, B.M. Sistema de distribución de colas en las presas de la UPI Las Camariocas y protección del medio ambiente. Trabajo de Diploma. ISMM, 1995.
108. MAKKAVEEV, V.M. Teoría del movimiento de flujos turbulentos contenidos por arenas finas. *Izvestia AN SSSR*, 1952, (2): 5-11.
109. MARSDEN, D.D. Efecto del pH en dependencia de la temperatura, densidad y viscosidad cinemática. *Revista Sudáfrica, Instituto de Minas y Metalurgia*. No.6. 1962.
110. MARTÍNEZ, M. S; N. MILIÁN. Estudio de las propiedades físico mecánica de la pulpa laterítica influyente en el proceso de hidrotransporte. Trabajo de diploma. ISMM, Facultad de Metalurgia Electromecánica, 1995.
111. MATOS TAMAYO, R.; R. MING CORTÓN. Aspectos fundamentales de la química - física. La Habana: Pueblo y Educación, 1988. 338 p.
112. MIJAILOV, N.K. Estructura del flujo de hidromezclas trifásicas por tuberías. Moscú: Construcción de maquinarias, 1994
113. MIJAILOVA, N.A. Transporte de partículas sólidas en flujo turbulento. Leningrado: Guidrometeoizdat, 1966.
114. MIRZADSHAHZADE, A.X. Hidráulica de las mezclas de cemento y arcilla. Moscú: Editorial Mir, 1966.
115. MITROFANOV, S.I. Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales. Moscú: Editorial Mir, 1982.
116. MUÑIZ, M. A.; L. SIMÓN. Influencia de las propiedades reológicas y superficiales en la característica de sedimentación de

- la pulpa laterítica. Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 2001.
117. MURRAY, S.A.; D. KAVERNER. Graduación de las colas de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. La Habana CESIGMA, 1996.
118. MUSTER, T.M. Rheological vestigations of sulphide mineral Sherries. *Mineral EGINEERING*, 1995, 18(12): 154-155.
119. NC: 93 – 06 – 101: 1987 (Cu) paisaje, términos y definiciones.
120. NIEXOMETDINOV, A.B. Seudoplasticidad en hidromezclas de fracciones típicas. Modernización técnica y tecnología en el almacenamiento de desechos en condiciones de utilización compleja de la materia prima. Moscú: Niedra, 1984. 64 p.
121. NOVOA,R.ORTEGA. Influencia del Ph y otros factores de la sedimentación de pulpa de mineral . Revista Cenic,Febrero 1976.
122. NÚÑEZ, N. Metodología para el estudio de la determinación de minerales lateríticos. Tesis de maestría. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 1998.
123. NUROK, G.A. Procesos y tecnología de la hidromecanización en trabajos mineros. Moscú: Niedra, 1979.
124. NUROK, G.A. Procesos y tecnología para la hidromecanización de la minería a cielo abierto. Moscú, Editorial Mir, 1985.
125. OSTLE, B. Estadística aplicada. La Habana: Editorial Félix varela, 1981.
126. PACHECO, P.B. “Bombas, ventiladores y compresores. Santiago de Cuba: Ediciones ISPJAM, 1987.
127. PAKROVSKAYA, V.N. Corte de la distribución de la concentración por la sección del flujo en tubos cilíndricos. En:Transporte hidráulico de carbón. Moscú: ZNITEIYGOL, 1973.
128. PAKROVSKAYA, V.I. El transporte hidráulico en la industria minera. Moscú: Niedra, 1985. 192 p.
129. PAKROVSKAYA, V.I. Intensificación de los procesos del transporte hidráulico de hidromezclas de alta concentración. Instituto de Minas de Leningrado, 1976.

130. PAKROSKAYA, B.M. Manual de prácticas de laboratorio de máquinas y complejos de transporte minero. Leningrado: Instituto de Minas de Leningrado, 1982.
131. PAKROVSKAYA, V.I. Intensificación del transporte hidráulico. Leningrado: Instituto de Minas de Leningrado, 1987
132. PAKROVSKAYA, V.I. Vías para el incremento de la efectividad del transporte hidráulico. Moscú: Nedra, 1972.
133. PAVLOV, K.F.; P.G. ROMANKOV; A.A. NOSKOV. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. La Habana: Editorial Mir, 1981.
134. PAVÓN, O.; R. RIZO. Construcción y evaluación de un viscosímetro de tubo capilar para el laboratorio de operaciones unitarias. Trabajo de diploma. Las Tunas, 1995.
135. PARRA,CH.G. Sedimentación de la pulpa cruda de silicato de sodio .Trabajo de Diploma.ISMM. Moa.Facultad de Metalurgia.1984.
136. PEREZ BARRETO, R. Caracterizao de ensayos de maquinas de fluxo no laboratorio de vazao do IPT. Sao Paulo: Convenio CAPES-MES, 2000
137. PÉREZ BARRETO, R. Investigación de los parámetros del transporte hidráulico de las menas y concentrados en flujos de alta concentración. Tesis de Doctorado. Krivoi Rog, 1970.
138. PÉREZ BARRETO, R. Investigaciones experimentales del parámetro del transporte de sal común suspensa en flujos de salmuera saturadas. *Revista Minería y Geología*, 1983, (3): 19-23.
139. PÉREZ BARRETO, R. Soluciones aproximadas del problema del movimiento turbulento de fluidos heterogéneos viscosos e incomprensibles. *Revista Minería y Geología*, 1984, (1):6-8.
140. PÉREZ BARRETO, R.; S. MALIUK. Sobre la elección de criterios de semejanza hidrodinámica aplicadas al transporte hidráulico. *Revista Minería y Geología*, 1984, (3): 23-25.
141. PÉREZ, F. Equipos de Bombeo. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1983.

142. PÉREZ RODRIGUEZ, et.al. Occurrence of talc in soils with high iron content from the south-west of Spain. *Australian Journal of Soil Research*, 1996, 34(5): 635-651.
143. PERRY, J.H. Chemical engineers handbook. 6 ed. New York: McGraw Hill Book, 1984.
144. PICHINISNOI, I.O; V.V. TRAINIS. Transporte hidráulico de suspensiones de carbón plástico - viscosas. Moscú: Nedra, 1967.
145. PONCE, N.A. Mineralogía Y Composición Sustancial del Yacimiento artificial "Colas De Nicaro". *La Minería en Cuba*, 1979, 5(3): 30-36.
146. PONCE, N.A; I. CARRILLO. Composición Sustancial del Yacimiento Artificial "Colas de Moa". *Revista Tecnológica Serie Geología*, 1986, 16(2): 66-75.
147. PORTAL, L. Nuevas inversiones en los últimos 5 años en la industria del Níquel. *Granma Internacional* 27 de Mayo del 2001.
148. PORTUONDO, P.F. Economía de las empresas industriales. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1985. 2da. Parte.
149. Programa de fabricación. Catálogo Bombas Itur, España, 1996.
150. Programa del Partido Comunista de Cuba. La Habana: Editora Política, 1987.
151. RAHIER, H. Rheological transformation during. Low. Temperature and high temperature propiaties of a model compound. *Journal of materials Science*, 1996, 31: 19-23.
152. RAMOS, C.S. Diseño de Bombas Centrifugas radiales. *Revista Construcción de maquinaria*, 1994, (3): 3-7.
153. RAMOS, P.N. Bombas, Ventiladores y Compresores. La Habana: Ediciones ISJAE, 1989.
154. RAMOS, S.J. Intensificación del intercambio energético en eyectores liquido – liquido. Tesis de doctorado. Universidad de Camagüey, 1998. 177p.
155. RAYO, J. Transporte sobre terrenos de alta dificultad topográfica. *Revista Latino Minería* (minería, siderurgia, carbón y petróleo en América Latina), 2000, (45): 4-5.

156. REINIER, M. Reología. Moscú: Nauka, 1965.
157. Resolución Económica V Congreso del partido Comunista de Cuba. La Habana: Editora Política, 1997.
158. REMEDIOS, P.D. Caracterización reológica de productos derivados del azúcar y su aplicación al cálculo de Bombas de tornillo. Tesis Doctoral. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, Santiago de Cuba, 2000.
159. RIVAS RAMOS, J.M; R.V. CALA. Adsorption of maghemite and ferrihydrite containing heavy metals. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. *Edafología*, 1995, (1): 75-82.
160. ROBERTSON, I.D. Ferruginous lag geochemistry on the Yilgarn Craton of Western Australia; practical aspects and limitations. CSIRO Division of Exploration and Mining, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 1996, 57(1-3): 139-151.
161. RODRÍGUEZ O.J.; A. SÁNCHEZ. Estudios de la sedimentación de las pulpas de lateritas y de los factores que la afectan. Trabajo de diploma. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 2000.
162. RODRÍGUEZ, R.L. Importancia del transporte preferencial en la zona no saturada y la formación de fisuras en residuos mineros. Huelva: Universidad de Huelva. Departamento de Ingeniería del terreno y Cartografía, 1998.
163. RODRÍGUEZ, S. Mediciones directas de esfuerzos constantes iniciales y de propiedades superficiales en suspensiones minerales. Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 1998.
164. RODRÍGUEZ, I.R.; A. RODRÍGUEZ; L.M. FLEITES. Curvas de flujo de suspensiones fibrosas diluidos de pulpas químicas de bagazo blanqueado. *Revista Tecnología Química*, 1995, 6(3): 34-38.
165. ROSABAL, J; L.R. GARCELL. Hidrodinámica y separaciones mecánicas. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1988. Tomo I.

166. ROSABAL, J; M. VALLE. Hidrodinámica y separaciones mecánicas. La Habana: Editorial ENPES, 1989.
167. SABORIT, A.C; G.E. CRUZ. Estudio de la instalación de bombeo de cola de la planta de lixiviación y lavado a la planta de recuperación de amoniaco. Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Facultad Metalurgia y Electromecánica, 1999.
168. SAFONOV, U.K. Modelo reológico de las suspensiones concentradas. En: Automatización, Mecanización y equipamiento de los procesos de la producción de papel. Moscú: VNIP, 1977.
169. SAFONOV, U.K. Valoración de la influencia del efecto de pared sobre la viscosidad de las suspensiones de sosa. Moscú: VNIP, 1970.
170. SHI, F.N. A model for slurry rheology. *International journal of mineral processing*, 1996, (47): 103– 23.
171. SÁNCHEZ, D; W. CRUZ. Efecto del tipo de agua utilizada en la preparación del mineral limonítico sobre la viscosidad de sus pulpas. Trabajo de Diploma. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 2000.
172. SAPOG, N. Preparación y evaluación de proyectos. New York: McGraw Hill, 1995.
173. SINGER, M.J; et.al. Moessbauer spectroscopic evidence for citrate-bicarbonate-dithionite extraction of maghemite from soils. *Clays and Clay Minerals*, 1995, 43(1): 1-7.
174. SEPÚLVEDA, J. Teoría y problemas de ingeniería económica. México, 1985.
175. SHANG, S.N. Work of adhesion influence on the rheological properties of silica fillet polyme composites. *Journal of Materials Science*, 1995, (30): 67-69.
176. SHAW. D.J. Introducción a la Química de Superficie y Coloide. 2. ed. Madrid: Editorial Alambra, 1997.
177. SHICHENKO, R.I. Hidráulica de las hidromezclas arcillosas. Bacú: Aznefteizdad, 1951.

178. SKELLAND, A.H.P. Non-Newtonian Flow and Heat. Transfer. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1970.
179. SLOBSTOV, L.E. Método sobre el procesamiento de serpentinitas reducidas. *Revista Svetnie Metals*, 1979, (6): 25-29.
180. SMOLDRIEV, A.E. Disminución de incrustaciones en la tubería mediante el hidrot transporte. *Revista metales preciosos*, 1986, (2): 107-109.
181. SMOLDRIEV, A.E. Sobre los regímenes y parámetros del flujo de pulpa de roca minera triturada. *Izv. Vuzof. Geología y Búsqueda*, 1980, (1): 122-127.
182. SMOLDRIEV, A.E. Transporte Neumo - Hidráulico. Moscú: Metalurgia, 1997. 367 p.
183. SMOLDRIEV, A.E. Transporte por tuberías. Moscú: Nedra, 1980. 293 p.
184. SMOLDRIEV, A.E; Y.K. SAFONOV. Transporte por tuberías de hidromezclas concentradas. Moscú: Construcción de maquinarias, 1989. 208 p.
185. SMOLDRIEV, A.E; V. GOFSHTOVI. Influencia de las fracciones micrométricas sobre los parámetros de hidrot transporte de carbón. Veb: Explotación Hidráulica. Moscú: CHNIITEK, 1966.
186. SMOLSKII, B.M; E.P. SULMAN; B.H. GORISLAVIISH. Reodinámica e intercambio de calor en los materiales viscosoplásticos no lineales. Minsk: Ciencia y Técnica, 1970. 448 p.
187. STREETER, V.L. Mecánica de los fluidos. La Habana: Ciencia y Técnica, 1978. 737 p.
188. SOBOL, S.I.: Composición de las lateritas de Moa y su influencia sobre los procesos de lixiviación de minerales por ácido sulfúrico en autoclaves. *Revista Tecnológica*, 1968, (5 y 6): 23-28.
189. SUÁREZ FELIÚ, M. Determinación de los parámetros del hidrot transporte de las pulpas del mineral serpentinito. Tesis de doctorado. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998. 117p.

190. SUN, W; S.K. BANERJEE; C.P. HUNT. The role of maghemite in the enhancement of magnetic signal in the Chinese loess-Paleosol sequence; an extensive rock magnetic study combined with citrate-bicarbonate-dithionite treatment. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 133(3-4): 493-505.
191. TARASOR, V.K. Sobre la velocidad crítica mediante transporte por gravedad de los materiales sólidos. Moscú, 1980.
192. TAYLOR, R.M. Maghemite in soils and its origin I, properties and observations on soil maghemites. *Clay and clay minerals*, 1974, 10(289): 43-48.
193. TAYLOR, R.M. Maghemite in soils and its origin II, maghemite synthesis at ambiente temperature and PH 7. *Clay and clays minerals*, 1974, 10(229): 43-47.
194. TEJEDA, H.D. Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.
195. TORO, C.A. Recuperación de cobalto mediante la lixiviación con ácido sulfúrico de las colas de la tecnología carbonato amoniaco-46 p. Trabajo de diploma. ISMMM, Facultad de Metalurgia, 2001.
196. TORRES CLAVEL, E. Efecto de la interacción entre las partículas, sobre el comportamiento reológico de las pulpas de lateritas de Moa. Trabajo de diploma. ISPJAM. Santiago de Cuba, 1989.
197. TORRES, T.E. Modificación del sistema de bombeo de colas de la planta de lixiviación. Trabajo de diploma. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1993.
198. TOOSE, E.M. A boundary integral method for two dimensional) (non) – Newtonian drops in slow viscous flow. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1995, (2): 129 – 154.
199. TRAINIS, V.V. Investigación y elaboración de los métodos de cálculo del transporte hidráulico de carbón por tuberías en

- regímenes viscosoplástico y turbulento. Kiev: Autoreferat para D.C.T, 1969.
201. TRAINIS, V.V. Parámetros y regímenes del transporte hidráulico del carbón por tuberías. Moscú: Nauka, 1970. 192 p.
202. TRIMISJII, K.K. et.al. Sobre el efecto de pared durante el flujo de los sistemas dispersos plásticos. *Revista Coloidal*, 1973, 35(6): 123-128.
203. TURIÑO, I.H; Y.S. JÁUREQUI. Determinación aproximada de las características de funcionamiento de una bomba centrífuga. *Revista Centro Azúcar*, 1994, (Enero- Abril): 89 – 95.
204. TURIÑO. I.M, Y. SJÁUREQUI; Y. VALDÉS. Evaluación de sistemas de bombeo por métodos computacionales. *Revista Construcción de Maquinaria*, 1994, (3): 61 – 66.
205. TURRO, B.D.; Y.C. ZARZABAL. Metodología de investigación del transporte hidráulico aplicable a las condiciones de la industria del níquel. Trabajo de diploma. ISMM, Facultad de Metalurgia Electromecánica, 1997.
206. VALDES,G.F. Principios químicos coloidales de la sedimentación de las pulpas altamente dispersas de mineral laterítico de la fabrica de Moa. Tesis Doctoral. Moscú, 1983.
207. VEGA, R.J. Hidrodinámica y separaciones mecánicas. La Habana: Ediciones ENPES, 1998. tomo II.
208. VENNARD, J.K; R.L. STREET. Elementos de mecánica de los fluidos. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1986. 424 p.
209. VILALTA, G; J.P. ORTIZ. Modificacoes na estrutura de escoamentos turbulentos en canal devido a adicáo de polimeros. Mecanismo de reducão de atrito. Boletín técnico BT / PMC Escola Politécnica de VSP.
210. VILALTA, G; J.P. ORTIZ. Procesos de transferencia de energía en flujos turbulentos de soluciones polimericas.
211. VENNARD, J.K. Elementos de Mecánica de los fluidos. La Habana: Edición Revolucionaria, 1986.

212. VOEVODIN, A; G. GOBANTES. Diseño de impelentes para análisis de desgaste en Bombas. *Revista Construcción de Maquinarias*, 1984, (Mayo–Agosto): 123-126.
213. VOLLIS, G. Flujo unidimensional de dos fases. Moscú: Editorial Mir, 1972
214. VOLOKITIN, V.G. Elaboración del método de conservación de sales de alta concentración en forma de suspensión en ZBP. Leningrado: Autoreferat para C.D.C.T, 1984.
215. WELCH, D.E. Manual sobre estructuras de retención para residuos mineros y temas conexos. Notario, Canadá: Golder Associates, 1998.
216. WILLIANSON, B.P. et.al. The Viscoelastie properties of multigrade oils and their effect on journal – bearing characteristics. *Journal of non newtonian fluid Mechanics*, 1997, 23(3): 101-106.
217. YUAN, X. F. Flow behavior two – dimensional randomfoams. *Journal of Non - Newtonian Fluid Mechanics*, 1995, (60): 335 – 348.
218. YUFIN, A.P. Hidromecanización. Moscú: Strdizdat, 1965.
219. ZAGUSTIN, K. Consideraciones fenomenológicas en relación con la influencia de aditivos en flujo turbulento. *Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela*, 1983, (6): 26-29.
220. ZELIKMAN, A.N. *Teoría de los procesos hidrometalúrgicos*. Moscú: Editorial Metalurgia, 1982.

Tabla 1.1. Composición granulométrica de las colas de Nicaro.

Muestra	No.	Fracción (mm)	Mallas	Peso (g)	% P
M-3 + 0.15	1	+ 0.150	+ 100	27.26	25.91
	2	+ 0.074	+ 200	17.49	
	3	+ 0.044	+ 325	8.00	7.600
	4	- 0.044	- 325	51.43	48.90
M-4 - 0.03	5	+ 0.150	+ 100	2.99	2.41
	6	+ 0.074	+ 200	3.99	3.21
	7	+ 0.044	+ 325	8.99	7.34
	8	- 0.044	- 325	107.24	86.4
M-5 - 0.15 + 0.03	9	+ 0.150	+ 100	5.99	5.34
	10	+ 0.074	+ 200	11.12	9.91
	11	+ 0.044	+ 325	17.99	16.03
	12	- 0.044	- 325	75.30	67.11
M-6	13	+ 0.150	+ 100	8.57	7.1
	14	+ 0.074	+ 200	16.50	13.74
	15	+ 0.044	+ 325	11.99	9.98
	16	- 0.044	- 325	81.90	68.2
M-7	17	+ 0.150	+ 100	6.99	5.4
	18	+ 0.074	+ 200	12.99	9.97
	19	+ 0.044	+ 325	16.00	12.3
	20	- 0.044	- 325	91.93	70.6

Datos sobre la separación en fracciones de las muestras
resultantes del
tratamiento tecnológico.

(*Datos suministrados por el CIS)

1.2. Composición química de las colas de Nicaro.

M	% Co	% Fe	% SiO ₂	% MgO	% Al ₂ O ₃	% Cr ₂ O ₃	% MnO	% Ni
3 (+ 100)	0.061	49.4	10.4	10.4	6.94	4.35	0.76	1.7
3 (+ 200)	0.073	53.0	8.5	6.6	6.73	2.30	0.88	1.6
3 (- 325)	0.087	52.6	9.2	4.9	6.53	2.56	0.86	1.7
4 (+ 200)	-	41.68	-	-	1.41	9.78	-	-
4 (+ 325)	0.090	34.4	21.8	17.0	5.30	3.58	0.66	1.8
4 (- 325)	0.091	42.8	13.4	11.4	5.10	2.56	0.78	1.8
5 (+ 150)	-	38.80	-	-	0.70	8.47	-	-
5 (+ 200)	0.082	39.4	17.0	16.0	5.51	3.84	0.76	1.6
5 (+ 325)	0.082	42.4	15.7	11.6	6.32	4.10	0.76	1.6
5 (- 325)	0.089	49.0	16.9	7.5	5.10	2.56	0.86	1.7
6 (+ 100)	0.073	53.0	8.5	6.6	6.73	2.30	0.88	1.4
6 (+ 200)	0.079	50.6	10.7	9.0	6.32	2.82	0.90	1.5
6 (+ 325)	0.080	53.0	9.8	5.8	6.94	3.58	0.66	1.6
6 (- 325)	0.086	53.0	10.8	5.6	6.12	2.30	0.90	1.7
7 (+ 150)	-	12.6	-	-	0.20	4.56	-	-
7 (+ 200)	0.082	18.4	27.8	26.9	4.28	4.61	0.42	1.6
7 (+ 325)	0.079	26.4	23.8	21.6	5.51	4.10	0.82	1.5
7 (- 325)	0.089	41.6	17.5	12.6	5.71	3.07	0.80	1.7

Análisis químico de las muestras estudiadas.
 (* Datos suministrados por el CIS).

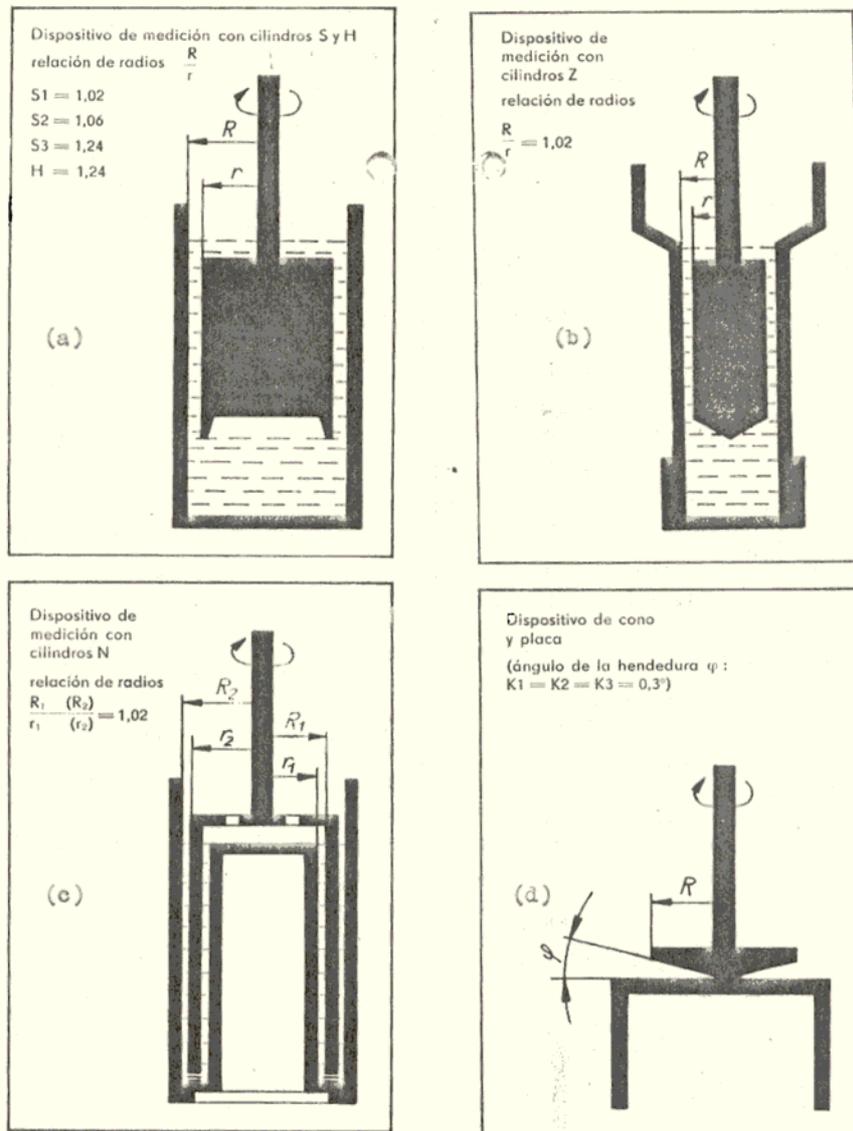


Figura 1. Elementos de medición de los reómetros rotacionales: (a) , (b) , (c) – de cilindros coaxiales ; (d) – de cono y plato.

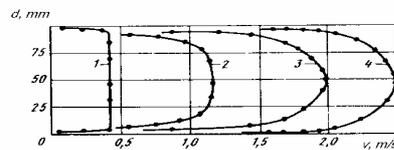


Figura 3. - Perfiles de distribución de velocidades de una suspensión de caolín con $D = 200$ mm y diferentes regímenes de flujo: 1 – homogéneo; 2 – estructural; 3 – transitorio; 4 – turbulento.

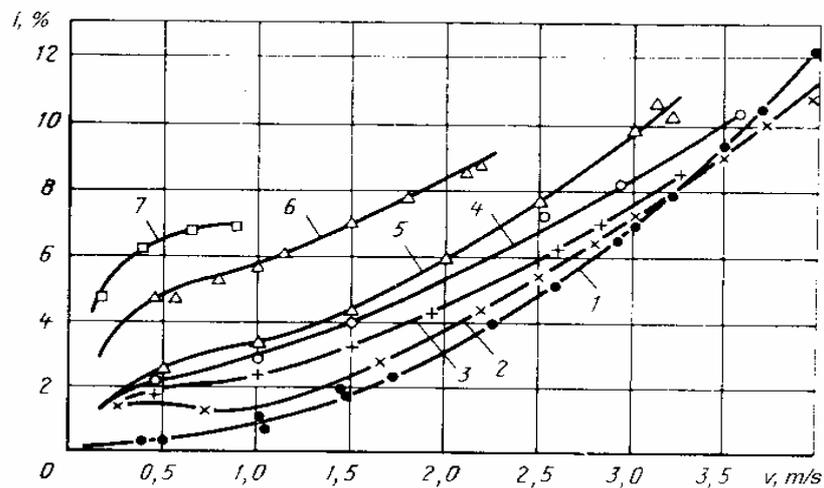


Figura 4. Dependencia de $i = f(v)$, que caracteriza el flujo de la hidromezcla de materiales granulares por tuberías $D = 0.3$ m: 1 – $C = 0$; 2 – $C = 2,3$ %; 3 – $C = 3,1$ %; 4 – $C = 3,2$ %; 5 – $C = 3,5$ %; 6 – $C = 4,5$ %; 7 – $C = 5,2$ %.

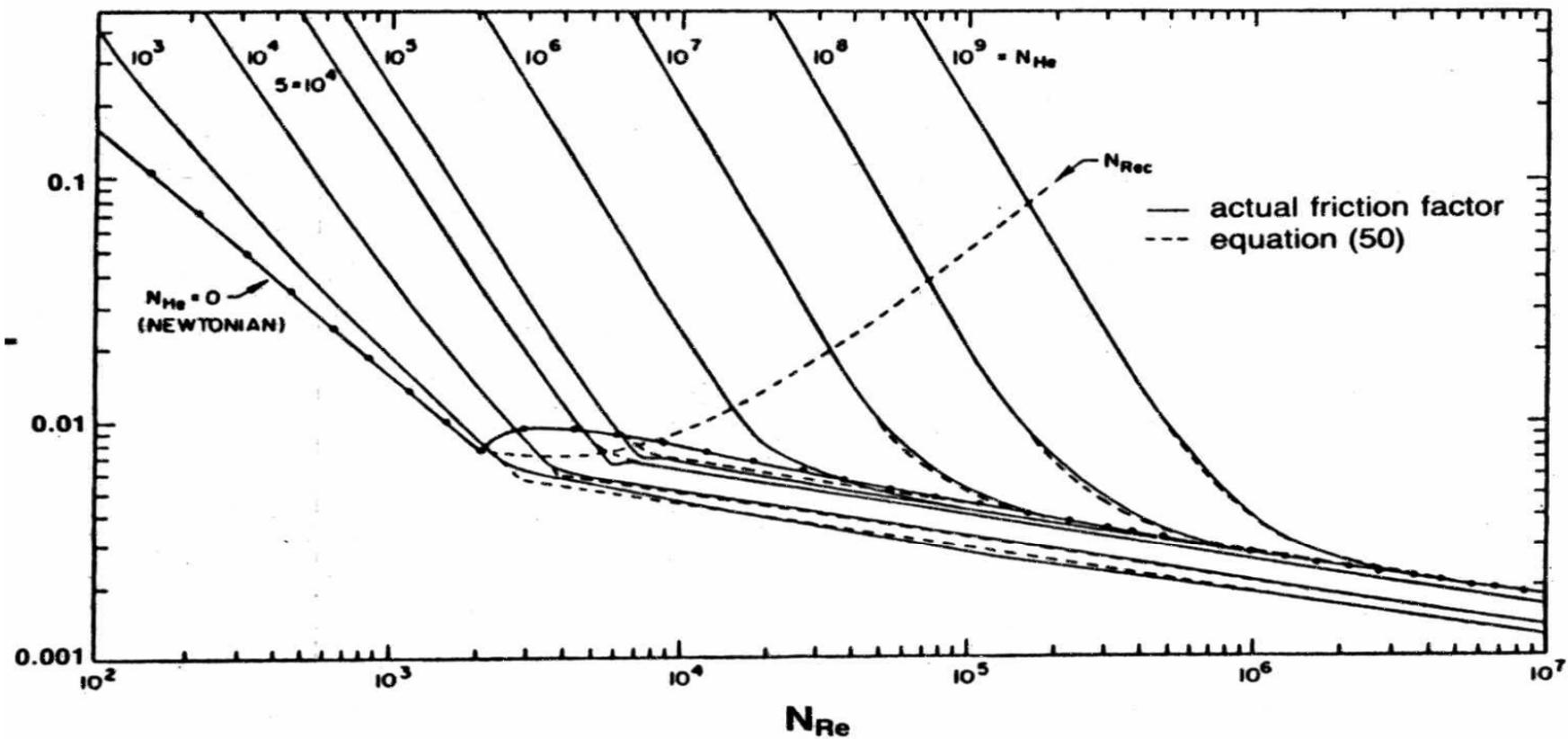


Figura 5. Factor de fricción en la función del número de Re y He para plásticos Bingham (materiales homogéneos, suspensiones sólido – líquido).

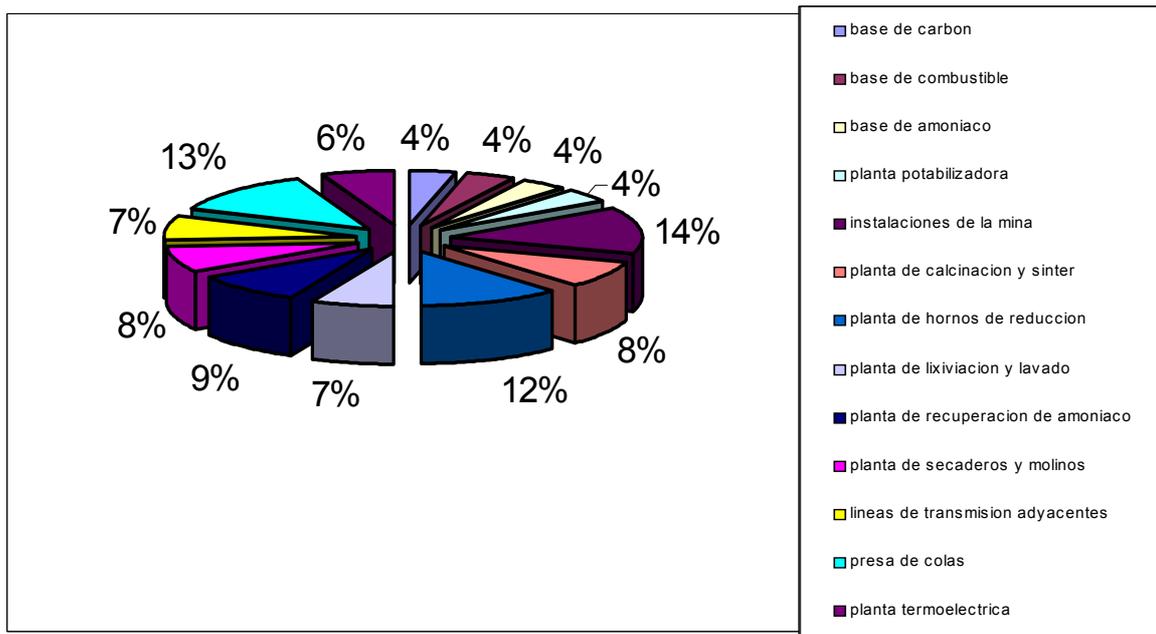


Figura 6 . Afectaciones ambientales que provocan cada una de las zonas que componen la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Tabla 3.1. Mediciones del agua en la tubería de 100 mm

dP (kgf/cm ²)	dP (Pa)	Q (m ³ /h)	i (Pa/m)	v (m/s)	Re
0,00746779	732,5903	18,6516	49,87	0,66	76375,814
0,02969446	2913,027	38,151	198,3	1,35	156223,256
0,06542366	6418,061	57,3678	436,9	2,03	234913,488
0,10470181	10271,248	74,0412	699,2	2,62	303188,837
0,15703775	15405,403	89,5842	1048,7	3,17	366835,349
0,19697478	19323,226	100,6056	1315,4	3,56	411966,512
0,25606422	25119,9	114,7356	1710	4,06	469826,977
0,32069423	31460,104	129,996	2141,6	4,6	532316,279
0,35019403	34354,034	135,648	2338,6	4,8	555460,465
0,3611404	35427,873	137,6262	2411,7	4,87	563560,93
0,37276062	36567,817	139,887	2489,3	4,95	572818,605

Lamda	Fr	ft	Re/Fr	ical (Pa/m)	iadm ²
0,02300759	0,4440367	0,005884	172003,383	51,0153532	878,611698
0,02186627	1,85779817	0,005558	84090,5426	201,616672	1708,01034
0,02130638	4,20071356	0,005436	55922,282	445,873732	2502,57761
0,02047003	6,99734964	0,00522	43329,0964	713,203472	3103,1422
0,0209726	10,243527	0,005334	35811,4298	1066,87097	3846,74639
0,02085823	12,9190622	0,005321	31888,2676	1342,25063	4296,4463
0,02084797	16,8028542	0,005301	27961,141	1739,20283	4897,46821
0,0203396	21,5698267	0,005184	24678,7462	2183,33823	5413,54904
0,02039826	23,4862385	0,005181	23650,4651	2375,94526	5665,21318
0,02043549	24,1762487	0,005176	23310,52	2443,38866	5758,321
0,02041674	24,9770642	0,00518	22933,7844	2526,2744	5847,54522

Tabla 3.3. Mediciones de la cola a 30% en peso de sólido en la tubería de 100 mm

dP (kgf/cm ²)	dP (Pa)	Q (m ³ /h)	i (Pa/m)	v (m/s)	Re	Lamda	ft
0,07999985	7847,9856	18,0864	534,24	0,64	3502	0,20066106	0,007388
0,11088629	10877,945	29,3904	740,5	1,04	6773,3	0,10532829	0,006129
0,11999978	11771,9784	31,9338	801,36	1,13	7647,2	0,09655114	0,005923
0,13999974	13733,9748	41,8248	934,92	1,48	10924,6	0,06566556	0,005354
0,15999971	15695,9712	46,0638	1068,48	1,63	13495,1	0,06186967	0,005043
0,17999967	17657,9676	55,9548	1202,04	1,98	16065,6	0,04717101	0,0048
0,19999963	19619,964	65,5632	1335,6	2,32	20178,4	0,03817571	0,00453
0,22007447	21589,3054	76,8672	1469,66	2,72	24998,1	0,03056087	0,004236
0,24408461	23944,7	92,9754	1630	3,29	32452,5	0,02316767	0,004
0,27029001	26515,45	108,2358	1805	3,83	39906,9	0,01893068	0,003711
0,27999949	27467,9496	111,9096	1869,84	3,96	41706,3	0,01834428	0,003664
0,30399914	29822,3159	116,1486	2030,11	4,11	43891,3	0,01848939	0,003612
0,31999941	31391,9424	118,9746	2136,96	4,21	45369,3	0,01854893	0,003579
0,35999934	35315,9352	124,344	2404,08	4,4	48196,8	0,01910426	0,003517
0,35005027	34339,9316	128,0178	2337,64	4,53	50124,6	0,0175254	0,003479

Fr	Re/Fr	ical (Pa/m)	phi	iadm1	iadm2	Recr	Fexp.
0,41753313	8387,3584	78,6792448	6,79010076	0,10033053	335,5	2415	0,03952415
1,10254842	6143,31296	172,357286	4,29630807	0,05266414	340,8	2415	0,02074648
1,30163099	5875,09061	196,640046	4,07526349	0,04827557	349,68	2415	0,01901765
2,23282365	4892,72854	304,912442	3,06619171	0,03283278	343,3	2415	0,01293413
2,70835882	4982,75927	348,367414	3,06710661	0,03093484	368,8	2415	0,01218645
3,99633028	4020,08815	489,26592	2,45682348	0,02358551	366,4	2415	0,00929126
5,48664628	3677,72934	633,939072	2,10682707	0,01908785	367,8	2415	0,00751946
7,54169215	3314,65399	814,830182	1,80363962	0,01528043	365,6	2415	0,00601957
11,0337411	2941,2055	1125,7064	1,44797969	0,01158384	358,8	2415	0,00456333
14,9530071	2668,82104	1415,34349	1,2753088	0,00946534	360,6	2415	0,00372877
15,9853211	2609,03736	1493,89194	1,25165679	0,00917214	367,7	2415	0,00361327
17,2192661	2548,96462	1586,3709	1,27971965	0,00924469	387,7	2415	0,00364185
18,0673802	2511,11669	1649,2984	1,29567821	0,00927446	401,9	2415	0,00365358
19,7349643	2442,20355	1770,31712	1,35799398	0,00955213	439,6	2415	0,00376296
20,9183486	2396,20253	1856,19749	1,25937031	0,0087627	419,6	2415	0,00345197

Tabla 3.4. Parámetros del hidrotransporte de las pulpas de colas, en diferentes regímenes de flujo, para las concentraciones 40-50% (plásticos Bingham5), obtenidos en la instalación experimental (Muestra R-1).

i (Pa/m)	V (m/s)	T (°C)	D (mm)	C (%)	R_{crL}	$R_{crTurb.}$	α_C	He	Fr_{critL}	$Fr_{critTurb.}$	φ_{Lam}	$\varphi_{Turb.}$	τ_0 (Pa)	μ_p (Pa/s)
563 ÷ 962,5	0,6 ÷ 1,02	28	100	40	4504,6	7700	0,28405	$4,4 \times 10^4$					0,755	0,016
762 ÷ 1141,5	0,78 ÷ 1,16	28	100	45	5145,7	7700	0,3203	$4,4 \times 10^4$					1,239	0,0215
1520 ÷ 2029,3	1,12 ÷ 1,49	28	100	50	5771,3	7700	0,3527	$4,4 \times 10^4$	1,32	1,7	4,685	3,8	1,815	0,0268
442,2 ÷ 823,7	0,48 ÷ 0,89	60	100	40	3489,6	6500	0,19686	$4,4 \times 10^4$					0,67	0,01465
5844,2 ÷ 940,2	0,59 ÷ 0,95	60	100	45	4040,5	6500	0,24732	$4,4 \times 10^4$					1,142	0,0192
1476 ÷ 1712,9	0,83 ÷ 1,15	60	100	50	4722,13	6500	0,7786	$4,4 \times 10^4$	0,85	1,4	7723	4,8	1,556	0,234
829,6 ÷ 1422,5	0,7 ÷ 0,97	90	100	50	3817,5	6200	0,2291	$4,4 \times 10^4$	0,68	1,35	8,676	5,1	1,30	0,0209
502,9 ÷ 713,6	0,61 ÷ 0,87	28	150	40	6905,6	9800	0,4059	$9,9 \times 10^4$					0,755	0,016
8898 ÷ 1140	0,72 ÷ 0,92	28	150	45	7800,6	10000	0,4293	$9,9 \times 10^4$	0,545	0,95	9,99	7,9	1,239	0,0215
1683,8 ÷ 1781	1,06 ÷ 1,23	28	150	50	8981,5	9500	0,4608	$9,9 \times 10^4$	1,5	1,3	8,15	8,1	1,815	0,0268
195,3 ÷ 372,5	0,43 ÷ 0,83	60	150	40	4717,8	9000	0,2978	$9,9 \times 10^4$					0,67	0,01465
417,3 ÷ 677,7	0,56 ÷ 0,9	60	150	45	5788,3	9400	0,3527	$9,9 \times 10^4$	0,6	0,9	10,2	9,95	1,142	0,0192
1155,2 ÷ 1473	0,80 ÷ 1,06	60	150	50	7057,5	9000	0,4055	$9,9 \times 10^4$	0,748	1,2	11,26	10,5	1,556	0,234
799,4 ÷ 1331,3	0,61 ÷ 0,93	90	150	50	4984,4	8300	0,3527	$9,9 \times 10^4$	0,35	1,11	15,6	8,1	1,30	0,0209

Tabla 3.6. Mediciones de la cola a 50% en peso de sólido en la tubería de 100 mm.

dP (kgf/cm ²)	dP (Pa)	Q (m ³ /h)	iexp (Pa/m)	v (m/s)	Re	fexp	ft	Fr
0,19999963	19619,964	20,3472	1335,6	0,72	4701,49254	0,07361111	0,00720208	0,52844037
0,23599987	23151,5869	29,3904	1576,01	1,04	6791,04478	0,04163171	0,00670866	1,10254842
0,25999952	25505,9532	36,1728	1736,28	1,28	8358,20896	0,03027832	0,00644513	1,67013252
0,27999949	27467,9496	46,629	1869,84	1,65	10774,2537	0,01962314	0,00613689	2,77522936
0,30799884	30214,6858	53,1288	2056,82	1,88	12276,1194	0,01662695	0,00598426	3,60285423
0,35999934	35315,9352	57,3678	2404,08	2,03	13255,597	0,0166682	0,00589626	4,20071356
0,39199988	38455,1882	60,1938	2617,78	2,13	13908,5821	0,01648564	0,00584179	4,62477064
0,41999923	41201,9244	64,1502	2804,76	2,27	14822,7612	0,01555163	0,00577046	5,25270133
0,46799854	45910,657	68,3892	3125,3	2,42	15802,2388	0,0152473	0,00569963	5,96982671
0,51999905	51011,9064	72,6282	3472,56	2,57	16781,7164	0,01502157	0,00563386	6,73282365
0,55999897	54935,8992	76,8672	3739,68	2,72	17761,194	0,01444204	0,00557252	7,54169215
0,5999989	58859,892	82,5192	4006,8	2,92	19067,1642	0,01342653	0,00549673	8,69153925
0,63999883	62783,8848	86,7582	4273,92	3,07	20046,6418	0,01295632	0,00544384	9,60744139
0,68799964	67492,7643	90,9972	4594,47	3,22	21026,1194	0,01266064	0,00539395	10,5692151
0,71999868	70631,8704	97,7796	4808,16	3,46	22593,2836	0,01147516	0,00531963	12,2034659

Re /Fr	ical (Pa/m)	phi	He	iadm1	c	iadm2	Recr
8896,92164	130,674531	10,2208134	44222,6832	0,14722222	-1,43380059	692,164179	5166,44
6159,40729	253,962956	6,20566884	44222,6832	0,08326342	-1,43380059	565,445608	5166,44
5004,51842	369,589432	4,6978616	44222,6832	0,06055664	-1,43380059	506,145056	5166,44
3882,29308	584,76937	3,1975683	44222,6832	0,03924628	-1,43380059	422,849389	5166,44
3407,33169	740,277181	2,77844577	44222,6832	0,0332539	-1,43380059	408,228803	5166,44
3155,55841	850,425883	2,82691302	44222,6832	0,03333641	-1,43380059	441,893978	5166,44
3007,41013	927,626341	2,82201991	44222,6832	0,03297129	-1,43380059	458,583841	5166,44
2821,93109	1040,7103	2,69504395	44222,6832	0,03110326	-1,43380059	461,036229	5166,44
2647,01801	1168,27611	2,67513816	44222,6832	0,0304946	-1,43380059	481,882941	5166,44
2492,52279	1302,38769	2,66630284	44222,6832	0,03004315	-1,43380059	504,17562	5166,44
2355,06749	1442,96946	2,59165569	44222,6832	0,02888408	-1,43380059	513,015803	5166,44
2193,7615	1640,35536	2,44264146	44222,6832	0,02685307	-1,43380059	512,011859	5166,44
2086,57446	1795,76777	2,37999594	44222,6832	0,02591264	-1,43380059	519,461325	5166,44
1989,37378	1957,43202	2,34719262	44222,6832	0,02532128	-1,43380059	532,408223	5166,44
1851,38254	2228,95674	2,15713473	44222,6832	0,02295032	-1,43380059	518,522992	5166,44

Tabla 3.10. Mediciones para la Cola 40%, tubería de 100 mm T=60 grados

dP (kgf/cm ²)	dP (Pa)	Q (m ³ /h)	iexp (Pa/m)	v (m/s)	Re	fexp	ft	Fr
0,16819572	16500	33,912	1100	1,2	11672,3549	0,02680312	0,00604869	1,46788991
0,18730887	18375	39,564	1225	1,4	13617,7474	0,02192982	0,00587138	1,99796126
0,2	19620	47,4768	1308	1,68	16341,2969	0,01626089	0,00566837	2,87706422
0,21100917	20700	54,5418	1380	1,93	18773,0375	0,01299929	0,00551862	3,79704383
0,22553517	22125	61,3242	1475	2,17	21107,5085	0,01099076	0,00539518	4,80010194
0,24082569	23625	64,998	1575	2,3	22372,0137	0,01044672	0,00533494	5,39245668
0,26146789	25650	73,476	1710	2,6	25290,1024	0,00887574	0,00521018	6,89092762
0,26605505	26100	79,128	1740	2,8	27235,4949	0,00778733	0,00513619	7,99184506
0,2706422	26550	84,78	1770	3	29180,8874	0,00690058	0,00506826	9,17431193
0,2940367	28845	93,258	1923	3,3	32098,9761	0,00619593	0,00497588	11,1009174
0,32125382	31515	98,91	2101	3,5	34044,3686	0,0060179	0,00491969	12,4872579
0,33525994	32889	103,7142	2192,6	3,67	35697,9522	0,00571192	0,00487486	13,7297655
0,34862385	34200	115,866	2280	4,1	39880,5461	0,00475907	0,00477173	17,1355759
0,3632263	35632,5	124,344	2375,5	4,4	42798,6348	0,00430531	0,00470713	19,7349643
0,43593272	42765	129,996	2851	4,6	44744,0273	0,00472756	0,00466692	21,5698267

Re/Fr	ical (Pa/m)	phi	He	iadm1	c	iadm2	Recr
7951,79181	248,238033	4,43123073	44485,0843	0,053606238	-1,43337744	625,711035	5166,44
6815,82155	327,975324	3,73503709	44485,0843	0,043859649	-1,43337744	597,269625	5166,44
5679,85129	455,954684	2,86870614	44485,0843	0,032521781	-1,43337744	531,448074	5166,44
4944,11926	585,85463	2,35553314	44485,0843	0,025998579	-1,43337744	488,072291	5166,44
4397,30423	724,053319	2,03714279	44485,0843	0,021981518	-1,43337744	463,975087	5166,44
4148,76094	804,322114	1,9581707	44485,0843	0,020893443	-1,43337744	467,428402	5166,44
3670,05776	1003,79412	1,70353657	44485,0843	0,017751479	-1,43337744	448,936729	5166,44
3407,91078	1147,63127	1,51616643	44485,0843	0,015574651	-1,43337744	424,183325	5166,44
3180,71672	1300,00768	1,36153042	44485,0843	0,01380117	-1,43337744	402,730375	5166,44
2891,56066	1544,3385	1,24519333	44485,0843	0,012391861	-1,43337744	397,766056	5166,44
2726,32862	1717,58708	1,22322764	44485,0843	0,012035804	-1,43337744	409,751341	5166,44
2600,04092	1871,28264	1,17170969	44485,0843	0,011423848	-1,43337744	407,807981	5166,44
2327,3537	2286,06323	0,99734774	44485,0843	0,009518144	-1,43337744	379,588779	5166,44
2168,67049	2597,20838	0,91463589	44485,0843	0,008610628	-1,43337744	368,523115	5166,44
2074,38047	2814,43492	1,01299198	44485,0843	0,009455112	-1,43337744	423,059801	5166,44

Tabla 3.14. Mediciones para la Cola 30% en tubería de 100 mm T=90 grados.

dP (kgf/cm ²)	dP (Pa)	Q (m ³ /h)	iexp (Pa/m)	v (m/s)	Re	Lamda	ft
0,06796933	6667,791	18,0864	453,9	0,64	14010,6	0,20057091	0,00499029
0,0942496	9245,886	29,3904	629,4	1,04	25772,9	0,10532411	0,00419966
0,10557034	10356,45	32,2164	705	1,14	28917,6	0,09818545	0,00406503
0,1190474	11678,55	41,8248	795	1,48	40115,47	0,06569184	0,0037054
0,1359686	13338,52	50,868	908	1,8	51276,2	0,05072342	0,00345674
0,15299463	15008,773	56,2374	1021,7	1,99	58152,1	0,04669657	0,00333581
0,17000568	16677,557	66,411	1135,3	2,35	71634,6	0,03720854	0,00314466
0,18700175	18344,872	77,715	1248,8	2,75	87242,3	0,02988789	0,00297404
0,20747192	20352,995	93,258	1385,5	3,3	109652,9	0,02302748	0,00278771
0,22974651	22538,1325	108,801	1534,25	3,85	133036,7	0,01873451	0,0026393
0,23794506	23342,41	112,4748	1589	3,98	138693,8	0,01815622	0,00260838
0,25840024	25349,064	116,4312	1725,6	4,12	144838,8	0,01839981	0,00257657
0,27198213	26681,447	119,2572	1816,3	4,22	149260,7	0,01845994	0,00255474
0,30598926	30017,546	124,344	2043,4	4,4	157287,2	0,01910362	0,00251715
0,32298533	31684,861	128,3004	2156,9	4,54	163588,1	0,01894026	0,00248932

Fr	Re/Fr	ical (Pa/m)	phi	iadm1	iadm2	Recr	Fexp.
0,41753313	33555,6606	45,1728926	10,0480614	0,10028546	176,393899	2322	0,05014273
1,10254842	23375,7534	100,385891	6,2698054	0,05266205	150,520881	2322	0,02633103
1,32477064	21828,3823	116,752448	6,03841727	0,04909272	153,811079	2322	0,02454636
2,23282365	17966,2509	179,370648	4,43216329	0,03284592	133,60071	2322	0,01642296
3,30275229	15525,2939	247,516434	3,66844329	0,02536171	125,463297	2322	0,01268086
4,03679918	14405,4974	291,943865	3,49964539	0,02334828	127,694934	2322	0,01167414
5,62945973	12724,9511	383,796641	2,95807695	0,01860427	120,156184	2322	0,00930214
7,70897044	11316,9846	497,055434	2,51239583	0,01494394	112,9441	2322	0,00747197
11,1009174	9877,82322	670,914834	2,06509072	0,01151374	104,422946	2322	0,00575687
15,1095821	8804,7902	864,575141	1,77457103	0,00936726	99,1148561	2322	0,00468363
16,1471967	8589,3423	913,122846	1,74018206	0,00907811	99,2988405	2322	0,00453906
17,30316	8370,65598	966,56087	1,78529884	0,00919991	104,170864	2322	0,00459995
18,1533129	8222,22921	1005,45709	1,80644208	0,00922997	107,047982	2322	0,00461499
19,7349643	7969,9764	1076,97677	1,89734826	0,00955181	115,505872	2322	0,00477591
21,0108053	7785,90338	1133,92722	1,90215029	0,00947013	118,161912	2322	0,00473507

Tabla 3.15. Mediciones para la Cola 50% en tubería de 100 mm T=90 grados

dP (kgf/cm2)	dP (Pa)	Q (m3/h)	iexp (Pa/m)	v (m/s)	Re	fexp	ft	Fr
0,16996075	16673,15	20,3472	1135	0,72	5126,1244	0,07356952	0,00708452	0,52844037
0,20059861	19678,724	29,673	1339,6	1,05	7475,59809	0,04082852	0,00658698	1,12385321
0,22102385	21682,44	36,738	1476	1,3	9255,50239	0,0293472	0,00632098	1,72273191
0,2413293	23674,404	45,216	1611,6	1,6	11391,3876	0,0211536	0,00607268	2,60958206
0,26179946	25682,527	50,868	1748,3	1,8	12815,311	0,01813168	0,00593619	3,30275229
0,30600423	30019,015	57,6504	2043,5	2,04	14524,0191	0,0164999	0,00579451	4,24220183
0,33321293	32688,188	60,759	2225,2	2,15	15307,177	0,01617556	0,00573608	4,71202854
0,35711225	35032,712	64,998	2384,8	2,3	16375,1196	0,01514828	0,0056619	5,39245668
0,39779801	39023,985	69,237	2656,5	2,45	17443,0622	0,01487116	0,00559328	6,11875637
0,44198781	43359,004	73,476	2951,6	2,6	18511,0048	0,01467161	0,0055295	6,89092762
0,47599493	46695,103	76,8672	3178,7	2,72	19365,3589	0,01443706	0,00548156	7,54169215
0,50998708	50029,733	82,5192	3405,7	2,92	20789,2823	0,01342171	0,00540701	8,69153925
0,58217923	57111,782	86,7582	3887,8	3,07	21857,2249	0,01386099	0,00535498	9,60744139
0,58478479	57367,388	91,845	3905,2	3,25	23138,756	0,01242349	0,00529642	10,7670744
0,61199349	60036,561	98,0622	4086,9	3,47	24705,0718	0,01140518	0,00522988	12,2741081

Re/Fr	ical (Pa/m)	phi	He	iadm1	c	iadm2	Recr
9700,47847	109,297047	10,384544	44284,7004	0,14713905	-1,43370019	754,253057	5166,44
6651,75666	216,12135	6,19836957	44284,7004	0,08165704	-1,43370019	610,435179	5166,44
5372,57269	317,910042	4,64282283	44284,7004	0,05869441	-1,43370019	543,246227	5166,44
4365,21531	462,650906	3,48340396	44284,7004	0,04230721	-1,43370019	481,937799	5166,44
3880,19139	572,382076	3,05442828	44284,7004	0,03626336	-1,43370019	464,726209	5166,44
3423,69828	717,646087	2,84750386	44284,7004	0,03299981	-1,43370019	479,289802	5166,44
3248,53232	789,087031	2,81996778	44284,7004	0,03235111	-1,43370019	495,204184	5166,44
3036,67152	891,355212	2,67547659	44284,7004	0,03029656	-1,43370019	496,10984	5166,44
2850,75286	999,15237	2,65875364	44284,7004	0,02974231	-1,43370019	518,796992	5166,44
2686,28635	1112,41144	2,6533348	44284,7004	0,02934323	-1,43370019	543,172617	5166,44
2567,77371	1206,90926	2,63375227	44284,7004	0,02887412	-1,43370019	559,157754	5166,44
2391,8988	1372,00414	2,48228114	44284,7004	0,02684341	-1,43370019	558,055319	5166,44
2275,03078	1501,99212	2,58842903	44284,7004	0,02772198	-1,43370019	605,925533	5166,44
2149,02908	1664,87581	2,34564043	44284,7004	0,02484698	-1,43370019	574,92823	5166,44
2012,77939	1874,06206	2,18077089	44284,7004	0,02281036	-1,43370019	563,531569	5166,44

Tabla 3.18. Mediciones de la cola a 30% en peso de sólido en la tubería de 150 mm a T = 28°C.

dP (kgf/cm2)	dP (Pa)	Q (m3/h)	iexp (Pa/m)	v (m/s)	Re	Lamda	ft
0,04	3924	10,80945	261,6	0,17	7631,62	2,08890072	0,00592642
0,06	5886	23,52645	392,4	0,37	11094,8	0,6614598	0,00533094
0,07	6867	33,0642	457,8	0,52	33303	0,39070323	0,0039058
0,08	7848	40,05855	523,2	0,63	42953,19	0,30420373	0,00363442
0,09	8829	55,9548	588,6	0,88	68076,76	0,1754013	0,00319032
0,10001529	9811,5	68,03595	654,1	1,07	88823,96	0,13184222	0,00295896
0,12	11772	82,02465	784,8	1,29	114583,37	0,10883222	0,00275322
0,13	12753	94,74165	850,2	1,49	139396,04	0,0883744	0,00260465
0,14	13734	108,73035	915,6	1,71	166983,9	0,07225892	0,00247489
0,15001529	14716,5	118,90395	981,1	1,87	189855,9	0,06474526	0,0023866
0,16	15696	129,7134	1046,4	2,04	213705,95	0,05802502	0,00230799
0,17	16677	136,70775	1111,8	2,15	229353,85	0,05550443	0,0022623
0,18	17658	139,887	1177,2	2,2	236647,79	0,05612842	0,00224234
0,2	19620	139,887	1308	2,2	236647,69	0,06236491	0,00224234
0,22	21582	139,887	1438,8	2,2	236647,79	0,0686014	0,00224234

Fr	Re/Fr	ical (Pa/m)	phi	iadm1	iadm2	Recr	Fexp.
0,01963982	388578,852	2,96874114	88,1181578	1,04445036	746	2415	0,52222518
0,09303432	119254,917	12,6499748	31,0198246	0,3307299	680,2	2415	0,16536495
0,18375807	181232,857	18,3062303	25,0078794	0,19535162	638,2	2415	0,09767581
0,26972477	159248,221	25,0033626	20,9251855	0,15210187	645,2	2415	0,07605093
0,52626572	129358,151	42,8234533	13,7448046	0,08770065	586,02	2415	0,04385033
0,77804961	114162,335	58,7203388	11,1392409	0,06592111	574,8	2415	0,03296055
1,13088685	101321,693	79,4150904	9,8822528	0,05441611	611,9	2415	0,02720805
1,50873259	92392,8079	100,231606	8,48235438	0,0441872	604,4	2415	0,0220936
1,98715596	84031,6025	125,43835	7,29920314	0,03612946	596,11	2415	0,01806473
2,37641862	79891,606	144,658587	6,78217603	0,03237263	622,28	2415	0,01618631
2,82813456	75564,2795	166,485823	6,28521985	0,02901251	620,16	2415	0,01450625
3,14135236	73011,1823	181,262822	6,13363507	0,02775222	630,3	2415	0,01387611
3,28916072	71947,7733	188,117584	6,25778822	0,02806421	652,2	2415	0,0140321
3,28916072	71947,7429	188,117606	6,95309719	0,03118245	652,2	2415	0,01559123
3,28916072	71947,7733	188,117584	7,64840783	0,0343007	652,2	2415	0,01715035

Tabla 3.21. Mediciones de la cola a 50% en peso de sólido en la tubería de 150 mm a T = 27°C.

dP (kgf/cm2)	dP (Pa)	Q (m3/h)	iexp (Pa/m)	v (m/s)	Re	fexp	ft	Fr
--------------	---------	----------	-------------	---------	----	------	----	----

Anexo III

0,1146789	11250	23,52645	750	0,37	3624,06716	0,23479078	0,00839158	0,09303432
0,14525994	14250	36,24345	950	0,57	5583,02239	0,12531328	0,00791562	0,22079511
0,17584098	17250	49,5963	1150	0,78	7639,92537	0,08100873	0,00745065	0,41345566
0,18042813	17700	55,9548	1180	0,88	8619,40299	0,06530401	0,0072792	0,52626572
0,20948012	20550	61,0416	1370	0,96	9402,98507	0,06370908	0,00715797	0,62629969
0,22324159	21900	66,76425	1460	1,05	10284,5149	0,05675413	0,00703524	0,74923547
0,25229358	24750	72,4869	1650	1,14	11166,0448	0,05441235	0,00692446	0,88318043
0,28	27468	78,20955	1831,2	1,23	12047,5746	0,05187388	0,00682365	1,02813456
0,3	29430	82,02465	1962	1,29	12635,2612	0,05052924	0,00676121	1,13088685
0,33	32373	82,6605	2158,2	1,3	12733,209	0,05473035	0,00675115	1,14848794
0,35	34335	92,19825	2289	1,45	14202,4254	0,04665874	0,00661035	1,42881414
0,3853211	37800	96,01335	2520	1,51	14790,1119	0,04736634	0,00655882	1,54950731
0,4266055	41850	101,736	2790	1,6	15671,6418	0,04670759	0,00648595	1,73972137
0,48165138	47250	108,73035	3150	1,71	16749,0672	0,04616805	0,00640325	1,98715596
0,5351682	52500	113,1813	3500	1,78	17434,7015	0,04734251	0,00635386	2,15317703

Re/Fr	ical (Pa/m)	phi	He	iadm1	c	iadm2	Recr
38954,0894	26,8055055	27,9793269	99501,0373	0,46958155	-1,38923136	1701,79508	10268,3
25285,9878	60,0082794	15,8311488	99501,0373	0,25062657	-1,37836953	1399,25373	10268,3
18478,2219	105,769453	10,8727044	99501,0373	0,16201747	-1,37836953	1237,80138	10268,3
16378,4239	131,530206	8,97132331	99501,0373	0,13060803	-1,37836953	1125,76323	10268,3
15013,5553	153,925094	8,90043307	99501,0373	0,12741815	-1,37836953	1198,11101	10268,3
13726,6791	180,981579	8,06711934	99501,0373	0,11350826	-1,37836953	1167,3774	10268,3
12642,9939	209,977314	7,85799173	99501,0373	0,10882469	-1,37836953	1215,1414	10268,3
11717,8968	240,881722	7,6020712	99501,0373	0,10374777	-1,37836953	1249,90899	10268,3
11172,8783	262,531196	7,47339756	99501,0373	0,10105849	-1,37836953	1276,90038	10268,3
11086,9331	266,220165	8,10682392	99501,0373	0,10946069	-1,37836953	1393,78588	10268,3
9940,00901	324,292788	7,05843634	99501,0373	0,09331748	-1,37836953	1325,33453	10268,3
9545,04176	348,944738	7,22177389	99501,0373	0,09473269	-1,37836953	1401,10705	10268,3
9008,13316	387,42721	7,20135274	99501,0373	0,09341518	-1,37836953	1463,96922	10268,3
8428,66261	436,887161	7,21009973	99501,0373	0,0923361	-1,37836953	1546,5436	10268,3
8097,19835	469,736443	7,45098673	99501,0373	0,09468501	-1,37836953	1650,80496	10268,3

Tabla 3.27. Mediciones para la Cola 50% en tubería de 150 mm T=60 grados

dP (kgf/cm2)	dP (Pa)	Q (m3/h)	iexp (Pa/m)	v (m/s)	Re	fexp	ft	Fr
0,11391437	11175	23,52645	745	0,37	3944,29487	0,24542672	0,00825553	0,09303432
0,13299694	13047	36,24345	869,8	0,57	6076,34615	0,12073653	0,00759493	0,22079511
0,15478593	15184,5	49,5963	1012,3	0,78	8315	0,07503935	0,00714881	0,41345566
0,18623853	18270	55,9548	1218	0,88	9381,02564	0,07093343	0,0069843	0,52626572
0,20542813	20152,5	61,0416	1343,5	0,96	10233,8462	0,06574523	0,00686799	0,62629969
0,2293578	22500	66,76425	1500	1,05	11193,2692	0,06135948	0,00675022	0,74923547
0,25428135	24945	72,4869	1663	1,14	12152,6923	0,05771006	0,00664393	0,88318043
0,28120795	27586,5	78,20955	1839,1	1,23	13112,1154	0,05482317	0,00654721	1,02813456
0,31559633	30960	82,02465	2064	1,29	13751,7308	0,05593701	0,0064873	1,13088685
0,31345566	30750	87,7473	2050	1,38	14711,1538	0,04854726	0,00640341	1,2941896
0,33256881	32625	92,19825	2175	1,45	15457,3718	0,04665436	0,00634255	1,42881414
0,36085627	35400	96,01335	2360	1,51	16096,9872	0,0466796	0,00629311	1,54950731
0,39892966	39135	101,736	2609	1,6	17056,4103	0,04596245	0,00622318	1,73972137
0,4559633	44730	108,73035	2982	1,71	18229,0385	0,04599223	0,00614383	1,98715596
0,49399083	48460,5	113,1813	3230,7	1,78	18975,2564	0,045986	0,00609645	2,15317703

Re/Fr	ical (Pa/m)	phi	He	iadm1	c	iadm2	Recr
42396,1279	25,0598955	29,7287752	99495,7265	0,49085343	-1,38923309	1936,07069	10268,3
27520,2935	54,7147734	15,8969862	99495,7265	0,24147307	-1,38923309	1467,27395	10268,3
20110,9837	96,4392198	10,4967668	99495,7265	0,15007869	-1,38923309	1247,90434	10268,3
17825,6447	119,927541	10,1561325	99495,7265	0,14186686	-1,38923309	1330,85664	10268,3
16340,1743	140,346911	9,572708	99495,7265	0,13149045	-1,38923309	1345,65304	10268,3
14939,5879	165,016665	9,08999103	99495,7265	0,12271896	-1,38923309	1373,62637	10268,3
13760,1468	191,454601	8,68613234	99495,7265	0,11542013	-1,38923309	1402,66532	10268,3
12753,3068	219,63284	8,3735201	99495,7265	0,10964634	-1,38923309	1437,69543	10268,3
12160,1297	239,372551	8,62254254	99495,7265	0,11187403	-1,38923309	1538,46154	10268,3
11367,0778	270,395992	7,58147332	99495,7265	0,09709452	-1,38923309	1428,37235	10268,3
10818,3223	295,685972	7,35577676	99495,7265	0,09330873	-1,38923309	1442,30769	10268,3
10388,4552	318,163302	7,41757452	99495,7265	0,0933592	-1,38923309	1502,80183	10268,3
9804,10457	353,251122	7,38568072	99495,7265	0,09192489	-1,38923309	1567,90865	10268,3
9173,43117	398,348066	7,4859156	99495,7265	0,09198445	-1,38923309	1676,78812	10268,3
8812,67826	428,299616	7,54308404	99495,7265	0,091972	-1,38923309	1745,19231	10268,3

Anexo III

Tabla 3.37 Mediciones de la cola a 50% en peso de sólido en la tubería de 150 mm. Muestra R-3 28 °C.

dP (kgf/cm2)	dP (Pa)	Q (m3/h)	iexp (Pa/m)	v (m/s)	Re	fexp	ft	Fr
0,13819981	13557,401	23,53644	922,9	0,37	3133,06452	0,33978917	0,00862846	0,09303432
0,16307248	15997,41	36,25884	1089	0,57	4826,6129	0,16894156	0,00793802	0,22079511
0,17964927	17623,593	50,25348	1199,7	0,79	6689,51613	0,09688952	0,00745339	0,42412504
0,19348572	18980,949	56,61468	1292,1	0,89	7536,29032	0,08221943	0,0072839	0,53829426
0,21281782	20877,428	61,70364	1421,2	0,97	8213,70968	0,07613249	0,00716389	0,63941556
0,24875666	24403,028	66,7926	1661,2	1,05	8891,12903	0,07594543	0,00705515	0,74923547
0,26245834	25747,163	73,1538	1752,7	1,15	9737,90323	0,06679904	0,00693236	0,89874278
0,29020612	28469,22	78,24276	1938	1,23	10415,3226	0,0645657	0,00684297	1,02813456
0,32337467	31723,055	82,6956	2159,5	1,3	11008,0645	0,06440578	0,00677025	1,14848794
0,35931351	35248,655	89,0568	2399,5	1,4	11854,8387	0,06170538	0,00667411	1,33197418
0,38694149	37958,96	92,87352	2584	1,46	12362,9032	0,06110055	0,00662027	1,44858987
0,41456947	40669,265	96,05412	2768,5	1,51	12786,2903	0,06119965	0,00657739	1,54950731
0,44224238	43383,977	101,7792	2953,3	1,6	13548,3871	0,05814682	0,00650431	1,73972137
0,47541093	46637,812	108,77652	3174,8	1,71	14479,8387	0,05472459	0,00642137	1,98715596
0,49752829	48807,525	113,22936	3322,5	1,78	15072,5806	0,05285466	0,00637184	2,15317703

Re /Fr	ical (Pa/m)	phi	He	iadm1	c	iadm2	Recr
33676,4385	27,5621671	33,4843046	99154,5265	0,57783575	-1,38934479	1810,39669	10268,3
21860,1443	60,1781332	18,0962742	99154,5265	0,28729719	-1,38934479	1386,67233	10268,3
15772,5092	108,538796	11,0531906	99154,5265	0,16476755	-1,38934479	1102,21519	10268,3
14000,3171	134,623411	9,59788491	99154,5265	0,13982001	-1,38934479	1053,72418	10268,3
12845,6518	157,278504	9,03619987	99154,5265	0,12946875	-1,38934479	1063,41869	10268,3
11866,9355	181,493849	9,15292729	99154,5265	0,12915063	-1,38934479	1148,29493	10268,3
10835,0281	213,921209	8,19320351	99154,5265	0,11359654	-1,38934479	1106,19215	10268,3
10130,3108	241,563539	8,02273394	99154,5265	0,10979859	-1,38934479	1143,58773	10268,3
9584,83251	266,973702	8,08881167	99154,5265	0,10952663	-1,38934479	1205,67618	10268,3
8900,20161	305,229291	7,86130321	99154,5265	0,1049344	-1,38934479	1243,98041	10268,3
8534,4399	329,274772	7,84754929	99154,5265	0,10390585	-1,38934479	1284,57799	10268,3
8251,84256	349,932428	7,91152742	99154,5265	0,10407438	-1,38934479	1330,72527	10268,3
7787,67641	388,523825	7,60133565	99154,5265	0,09888281	-1,38934479	1339,70262	10268,3
7286,71477	438,123772	7,24635412	99154,5265	0,09306307	-1,38934479	1347,5382	10268,3
7000,15857	471,066034	7,05315128	99154,5265	0,08988313	-1,38934479	1354,77075	10268,3

Tabla 3.38 Mediciones de la cola a 50% en peso de sólido en la tubería de 150 mm. Muestra R-3 90 °C.

dP (kgf/cm ²)	dP (Pa)	Q (m ³ /h)	iexp (Pa/m)	v (m/s)	Re	fexp	ft	Fr
0,11749005	11525,774	23,53644	784,6	0,37	3441	0,2888705	0,00847527	0,09303432
0,13863407	13600,002	36,25884	925,8	0,57	5301	0,1436236	0,00779709	0,22079511
0,15272509	14982,331	50,25348	1019,9	0,79	7347	0,08236861	0,00732107	0,42412504
0,16449506	16136,965	56,61468	1098,5	0,89	8277	0,06990019	0,00715458	0,53829426
0,18093707	17749,927	61,70364	1208,3	0,97	9021	0,06472762	0,00703671	0,63941556
0,21148509	20746,687	66,7926	1412,3	1,05	9765	0,06456642	0,0069299	0,74923547
0,22313526	21889,569	73,1538	1490,1	1,15	10695	0,05679081	0,00680929	0,89874278
0,24672012	24203,244	78,24276	1647,6	1,23	11439	0,05489084	0,00672148	1,02813456
0,27491714	26969,371	82,6956	1835,9	1,3	12090	0,0547546	0,00665006	1,14848794
0,30548012	29967,6	89,0568	2040	1,4	13020	0,0524605	0,00655562	1,33197418
0,32896016	32270,992	92,87352	2196,8	1,46	13578	0,05194493	0,00650274	1,44858987
0,35248513	34578,791	96,05412	2353,9	1,51	14043	0,05203463	0,00646062	1,54950731
0,37595019	36880,714	101,7792	2510,6	1,6	14880	0,0494306	0,00638883	1,73972137
0,40419213	39651,248	108,77652	2699,2	1,71	15903	0,04652658	0,00630737	1,98715596
0,42298515	41494,843	113,22936	2824,7	1,78	16554	0,04493561	0,00625872	2,15317703

Re /Fr	ical (Pa/m)	phi	He	iadm1	c	iadm2	Recr
36986,3514	23,0196447	34,0839317	99393,75	0,57774099	-1,38926636	1988,00676	10268,3
24008,6842	50,2601715	18,420152	99393,75	0,28724719	-1,38926636	1522,69737	10268,3
17322,7215	90,6505108	11,2509019	99393,75	0,16473722	-1,38926636	1210,32437	10268,3
15376,3483	112,436118	9,76999222	99393,75	0,13980039	-1,38926636	1157,12781	10268,3
14108,1959	131,357425	9,19856645	99393,75	0,12945524	-1,38926636	1167,81572	10268,3
13033,2857	151,581837	9,31707935	99393,75	0,12913284	-1,38926636	1260,98214	10268,3
11899,9565	178,664842	8,34019713	99393,75	0,11358162	-1,38926636	1214,75543	10268,3
11125,9756	201,751438	8,16648456	99393,75	0,10978168	-1,38926636	1255,79268	10268,3
10526,8846	222,973751	8,23370462	99393,75	0,10950921	-1,38926636	1323,96635	10268,3
9774,96429	254,924433	8,00237143	99393,75	0,104921	-1,38926636	1366,07143	10268,3
9373,25342	275,006977	7,98816097	99393,75	0,10388985	-1,38926636	1410,61644	10268,3
9062,88079	292,260044	8,05412867	99393,75	0,10406925	-1,38926636	1461,44454	10268,3
8553,09375	324,49119	7,73703594	99393,75	0,0988612	-1,38926636	1471,05469	10268,3
8002,89474	365,916567	7,37654493	99393,75	0,09305317	-1,38926636	1479,82456	10268,3
7688,17416	393,429613	7,17968324	99393,75	0,07641622	-1,38926636	1487,72823	10268,3

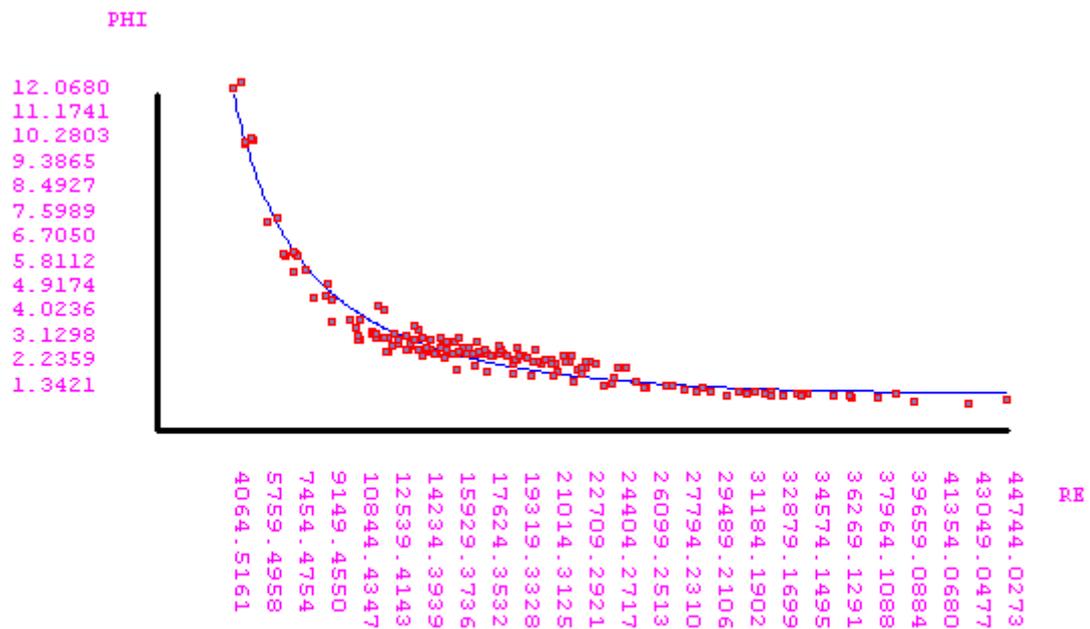


Fig.- Coeficiente de corrección para las pérdidas hidráulicas en función de los número de Re y de He en tubería D = 100mm.

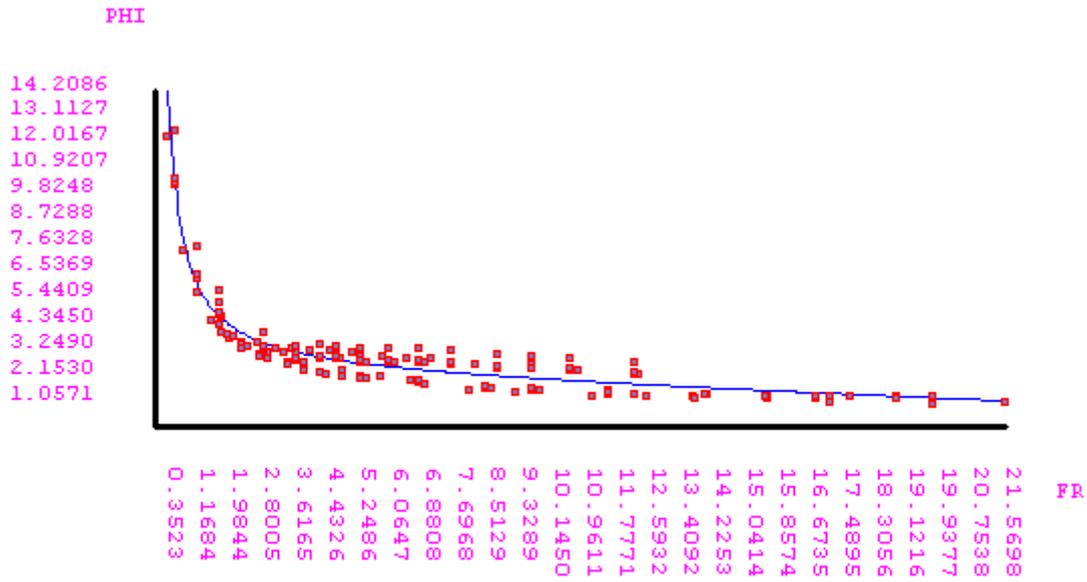


Fig.- Coeficiente de corrección para las pérdidas hidráulicas en función de Fr y del He en tubería D = 100mm.

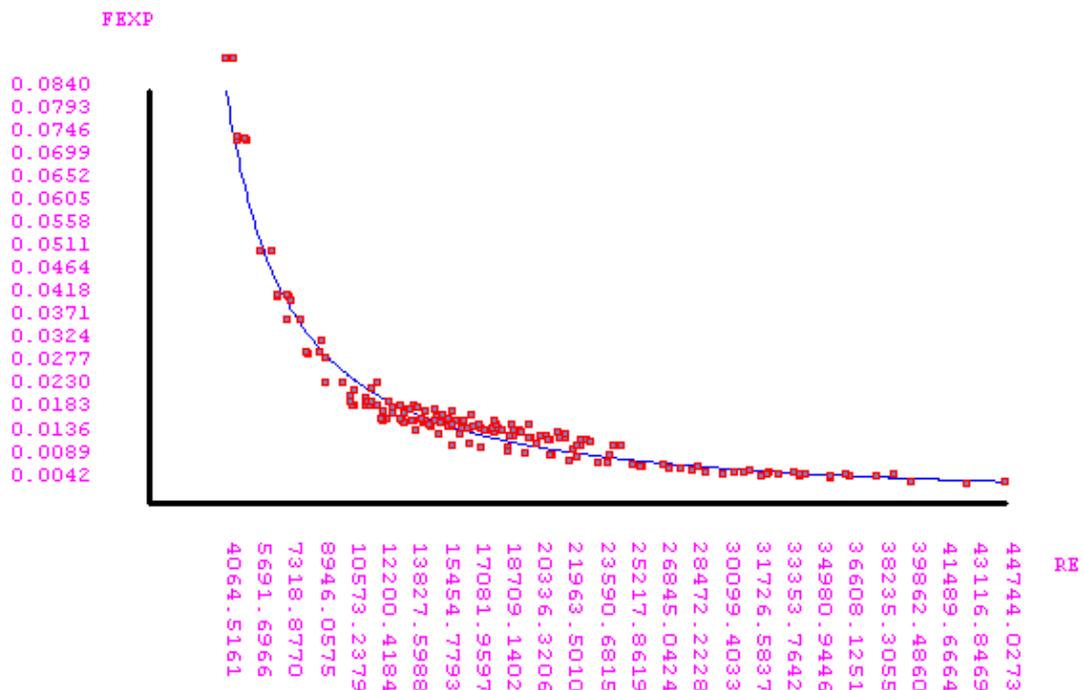


Fig.- Factor de fricción en función de los números Re y de He para la pulpa de cola del proceso CARON en tubería D = 100mm.

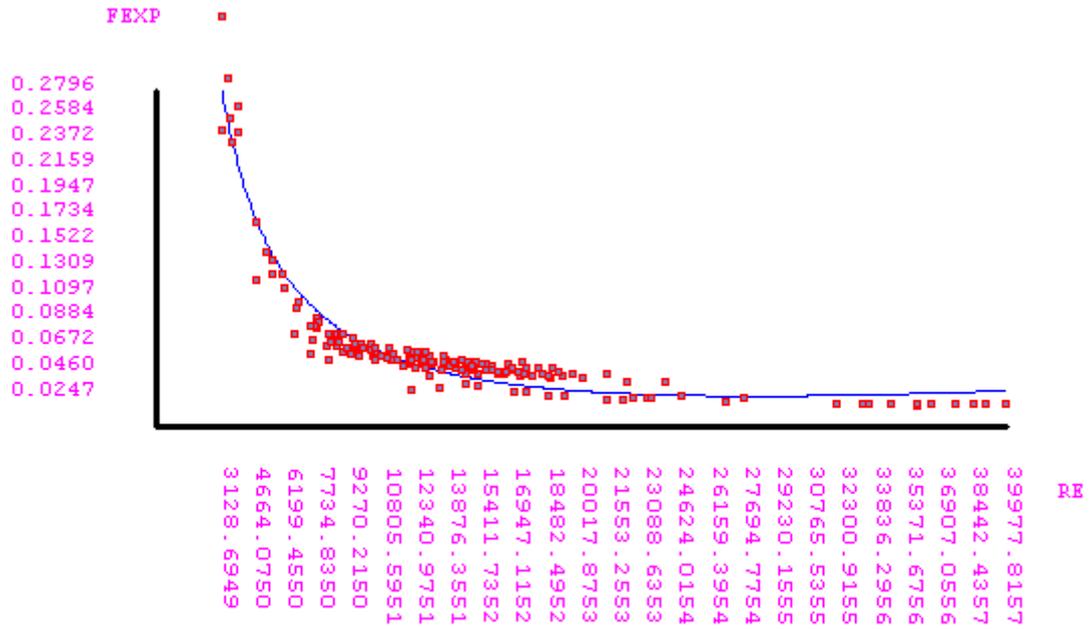


Fig.-Factor de fricción en función de los números de Re y He para pulpa de colas del proceso CARON en tubería D = 150mm.

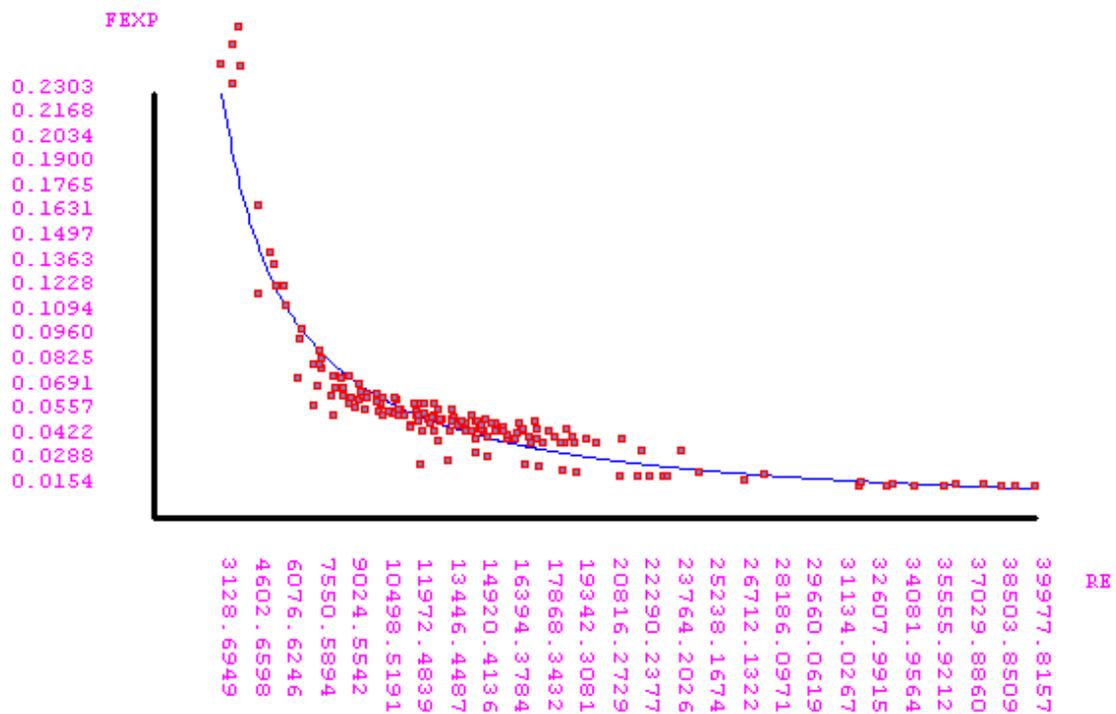


Fig.- Factor de fricción en función de los números Re y de He para la pulpa de cola en tuberías de D = 150mm.

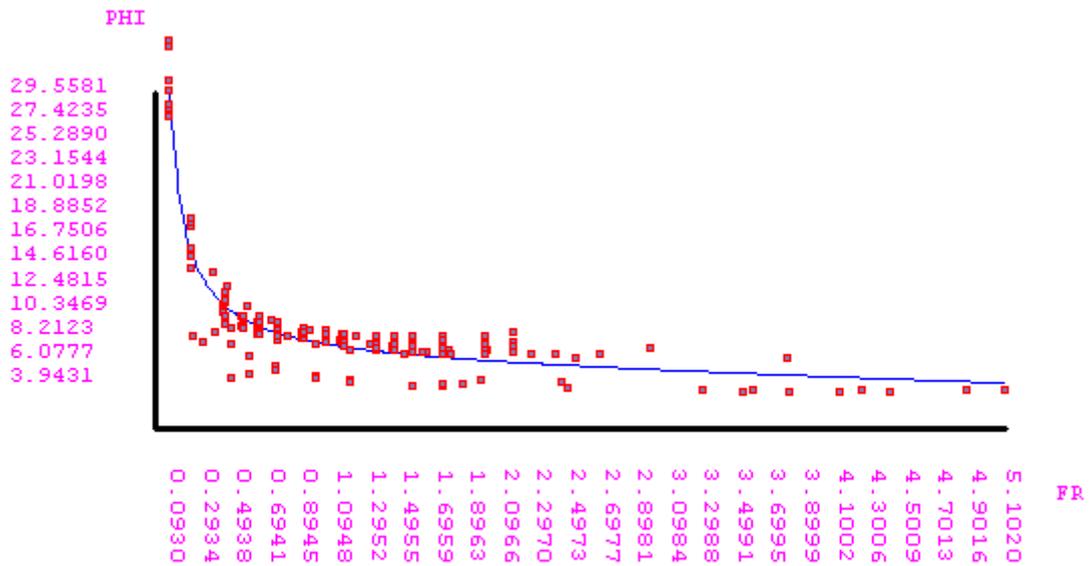


Fig.- Coeficiente de corrección para pérdidas hidráulicas en función de Fr y del He en tubería de D = 150mm

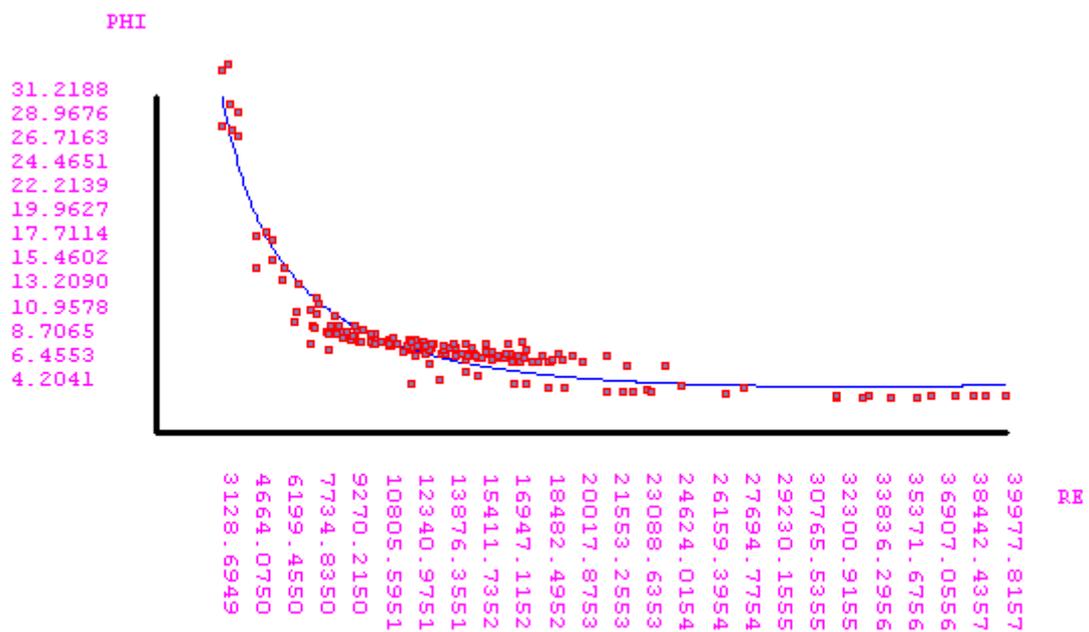


Fig.- Coeficiente de corrección para las pérdidas hidráulicas en función de los números de Re y de He en tuberías de D = 150mm.

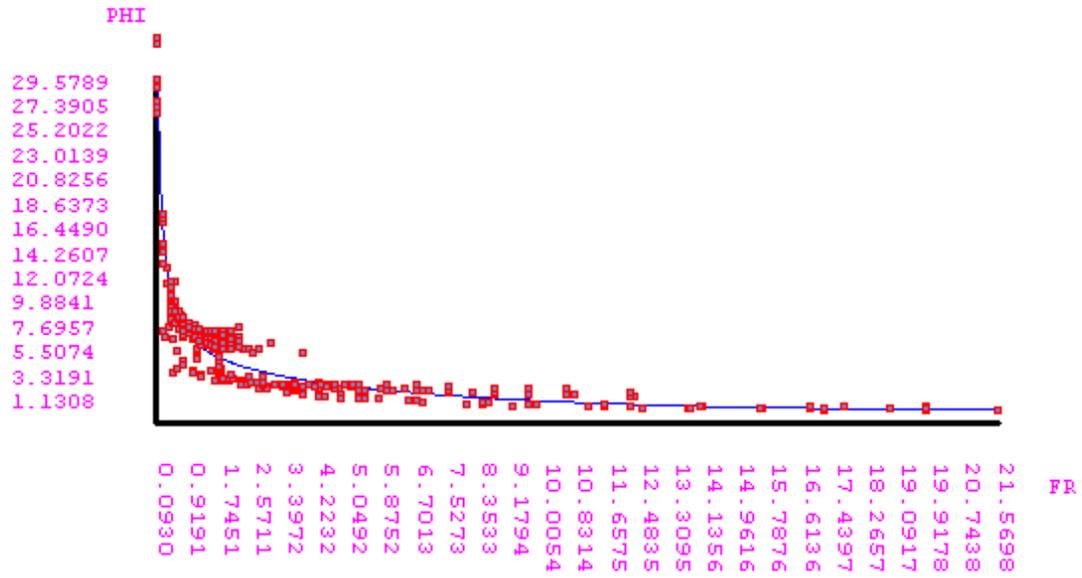


Fig.- Coeficiente de corrección para las pérdidas hidráulicas en función del Fr y del He en tuberías de D = 100mm y D = 150mm.

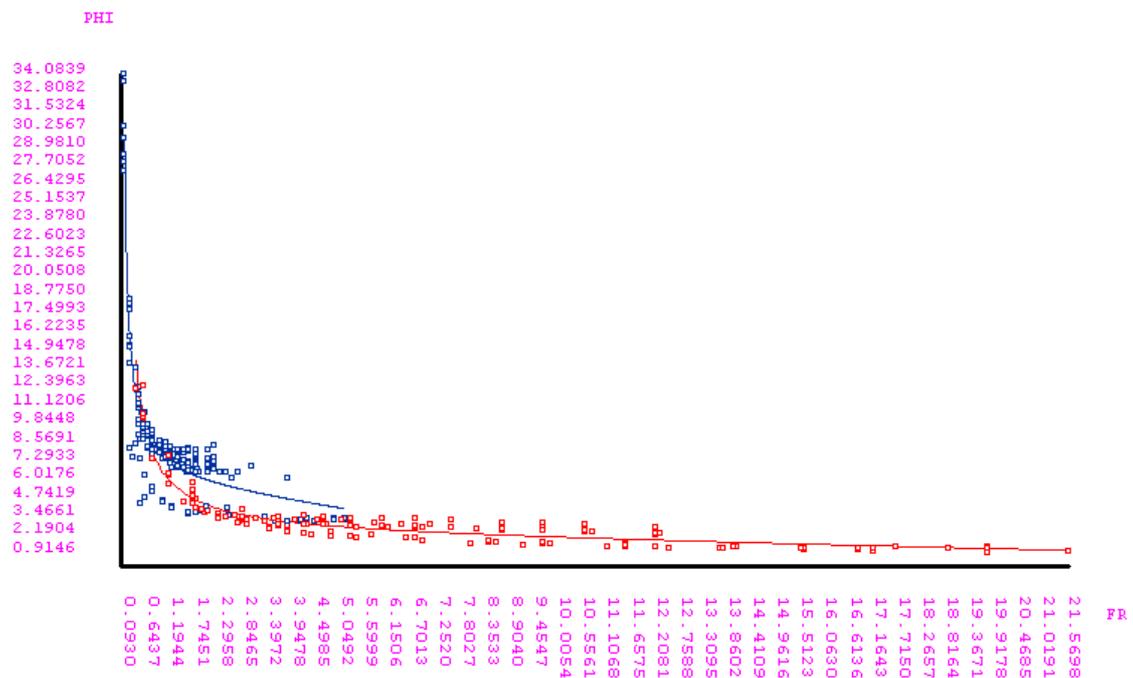


Fig.- Coeficiente de corrección para las pérdidas hidráulicas en función del Fr y del He en tubería D = 100mm (Rojo) y D = 150mm (Azul).

100 mm

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$$PHI = (2.14978579452149)*(1) + (-0.0598060840105121)*(FR) + (4.25567285274943)*(1/FR)$$

Determinante de la matriz del sistema:12709702.0268345

Determinante normalizado del sistema:0.00538631573913062

Error máximo al resolver el sistema:8.32667268468867E-17

Variación explicada:652.465230843049 Grados de libertad: 2

Variación residual:42.1010718563293 Grados de libertad: 162

Variación total:694.56630269938 Grados de libertad: 164

Error estándar de una estimación:0.511368106868763

Error probable de una observación:0.343851579077342

Coefficiente de correlación, $r = 0.969218805524049$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.95834787, 0.97728541]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 1255.3049

Valor de F_t por la tabla : 2.6609

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

-0.42446879

0.94631472

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.65566$

$t_2 = -5.96681209$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 37.26138314$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$$PHI = (-1.11299285060411)*(1) + (2.83754256911439E-5)*(RE) + (53105.3917275308)*(1/RE)$$

Determinante de la matriz del sistema:202655.016369767

Determinante normalizado del sistema:5.9830004165405E-15

Error máximo al resolver el sistema:7.27595761418343E-12

Variación explicada:664.767553272741 Grados de libertad: 2

Variación residual:29.7987492508075 Grados de libertad: 162

Variación total:694.566302523547 Grados de libertad: 164

Error estándar de una estimación:0.430215526304361
 Error probable de una observación:0.289283367649107

Coefficiente de correlación, $r = 0.978313512863923$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
 Intervalo de confianza de r : [0.97060659, 0.98401608]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:
 Valor de F_c para el ajuste : 1806.9944
 Valor de F_t por la tabla : 2.6609
 El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:
 0.32463571
 0.95226340

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)
 Valor teórico (t de Student), $t = 1.65566$
 $t_2 = 4.36854200$
 El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.
 $t_3 = 39.70266325$
 El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$FEXP = (-0.0172955829742343) \cdot (1) + (3.48576399471428E-7) \cdot (RE) + (420.932157108046) \cdot (1/RE)$

Determinante de la matriz del sistema:202655.016369767
 Determinante normalizado del sistema:5.9830004165405E-15
 Error máximo al resolver el sistema:5.6843418860808E-14

Variación explicada:0.0377998330477443 Grados de libertad: 2
 Variación residual:0.00141276292607753 Grados de libertad: 162
 Variación total:0.0392125959738214 Grados de libertad: 164

Error estándar de una estimación:0.00296224999058026
 Error probable de una observación:0.00199186128974654

Coefficiente de correlación, $r = 0.981820607982629$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
 Intervalo de confianza de r : [0.97534450, 0.98660721]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:
 Valor de F_c para el ajuste : 2167.2330
 Valor de F_t por la tabla : 2.6609

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

0.52221840

0.96334230

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.65566$

$t_2 = 7.79392967$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 45.70434627$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$

Otra forma

$$\text{LN(FEXP)} = (7.88775142665484) \cdot (1) + (-1.2472640090502) \cdot (\text{LN(RE)})$$

Determinante de la matriz del sistema: 6700.13704600312

Determinante normalizado del sistema: 0.000265668438176546

Error máximo al resolver el sistema: 0

Variación explicada: 63.1708212334096 Grados de libertad: 1

Variación residual: 3.30058434475009 Grados de libertad: 163

Variación total: 66.4714055780879 Grados de libertad: 164

Error estándar de una estimación: 0.142737442308348

Error probable de una observación: 0.0959806240923995

Coefficiente de correlación, $r = 0.974856810940992$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.96594260, 0.98145981]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 3119.7033

Valor de F_t por la tabla : 3.0519

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

-0.97485681

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.65559$

$t_2 = -55.85430419$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

150 mm

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$$PHI = (5.64280138442511)*(1) + (-0.418752094542252)*(FR) + (2.22857009813584)*(1/FR)$$

Determinante de la matriz del sistema: 17190384.7725561
 Determinante normalizado del sistema: 0.0643456871026736
 Error máximo al resolver el sistema: 4.44089209850063E-16

Variación explicada: 4209.31756980229 Grados de libertad: 2
 Variación residual: 454.820896897133 Grados de libertad: 162
 Variación total: 4664.13846669943 Grados de libertad: 164

Error estándar de una estimación: 1.68076605001679
 Error probable de una observación: 1.13017228214856

Coefficiente de correlación, $r = 0.949992394752315$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
 Intervalo de confianza de r : [0.93256384, 0.96300286]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:
 Valor de F_c para el ajuste : 749.6461
 Valor de F_t por la tabla : 2.6609
 El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:
 -0.22293834
 0.92750471

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)
 Valor teórico (t de Student), $t = 1.65566$
 $t_2 = -2.91079927$
 El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_2)$.
 $t_3 = 31.58064521$
 El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_3)$.

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$$PHI = (-2.10963933955578)*(1) + (9.64457505079318E-5)*(RE) + (103330.406429266)*(1/RE)$$

Determinante de la matriz del sistema: 355779.349216844
 Determinante normalizado del sistema: 2.02127241583753E-14
 Error máximo al resolver el sistema: 1.45519152283669E-11

Variación explicada: 4279.10639053897 Grados de libertad: 2
 Variación residual: 385.032051067278 Grados de libertad: 162

Variación total:4664.1384416063 Grados de libertad: 164

Error estándar de una estimación:1.54644864860691
 Error probable de una observación:1.03985524838758

Coefficiente de correlación, $r = 0.957835272140527$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
 Intervalo de confianza de r : [0.94306028, 0.96883786]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:
 Valor de F_c para el ajuste : 900.2046
 Valor de F_t por la tabla : 2.6609
 El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:
 0.31082817
 0.92746308

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)
 Valor teórico (t de Student), $t = 1.65566$
 $t_2 = 4.16237537$
 El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.
 $t_3 = 31.57050554$
 El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$FEXP = (-0.0470407096075058) \cdot (1) + (1.27494427285519E-6) \cdot (RE) + (1009.60911804834) \cdot (1/RE)$

Determinante de la matriz del sistema:355779.349216844
 Determinante normalizado del sistema:2.02127241583753E-14
 Error máximo al resolver el sistema:6.93889390390723E-18

Variación explicada:0.381581316191436 Grados de libertad: 2
 Variación residual:0.03037490841784 Grados de libertad: 162
 Variación total:0.411956224609283 Grados de libertad: 164

Error estándar de una estimación:0.0137355024458518
 Error probable de una observación:0.00923595770245977

Coefficiente de correlación, $r = 0.962427482927483$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:
 Intervalo de confianza de r : [0.94921992, 0.97224875]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:
 Valor de F_c para el ajuste : 1017.5532
 Valor de F_t por la tabla : 2.6609

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

0.43763843

0.93893049

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.65566$

$t_2 = 6.19498560$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 34.72942682$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

Otra Forma

$$\text{LN(FEXP)} = (7.0800300678866) \cdot (1) + (-1.06214975811003) \cdot (\text{LN(RE)})$$

Nota:

$$\ln(y) = A + B \ln(x)$$

$$y = 10^{(A/\ln(10))} / X^{(-B)}, \text{ donde } c = A/\ln(10).$$

Determinante de la matriz del sistema: 7226.8703472136

Determinante normalizado del sistema: 0.00030965935196941

Error máximo al resolver el sistema: 8.88178419700125E-16

Variación explicada: 49.4126138786117 Grados de libertad: 1

Variación residual: 5.0570204701612 Grados de libertad: 163

Variación total: 54.4696343487851 Grados de libertad: 164

Error estándar de una estimación: 0.176680999945483

Error probable de una observación: 0.118805215826996

Coefficiente de correlación, $r = 0.952448899152079$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.93584831, 0.96483178]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste: 1592.6880

Valor de F_t por la tabla: 3.0519

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

-0.95244890

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.65559$

$t_2 = -39.90849594$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

Tabla 3.8. Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado :

$$\phi = (7.621)*(1) + (0.314)*(Fr) + (2.122)*(1/Fr) + (-2.877)*(\sqrt{Fr})$$

Determinante de la matriz del sistema: 18178176949.2741

Determinante normalizado del sistema: 0.000171342661441841

Error máximo al resolver el sistema: 1.77635683940025E-15

Variación explicada: 7217.22514342882 Grados de libertad: 3

Variación residual: 626.28901372635 Grados de libertad: 326

Variación total: 7843.5141571552 Grados de libertad: 329

Error estándar de una estimación: 1.3881797863238

Error probable de una observación: 0.934890078127453

Coefficiente de correlación, $r = 0.959245530533808$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.94962870, 0.96705735]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 1252.2522

Valor de F_t por la tabla : 2.3995

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

0.19593804

0.87167984

-0.35298891

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.6509$

$t_2 = 3.60768382$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 32.11460373$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_3)$.

$t_4 = -6.81187835$

El coeficiente 4 es estadísticamente significativo ya que $t <= \text{abs}(t_4)$.

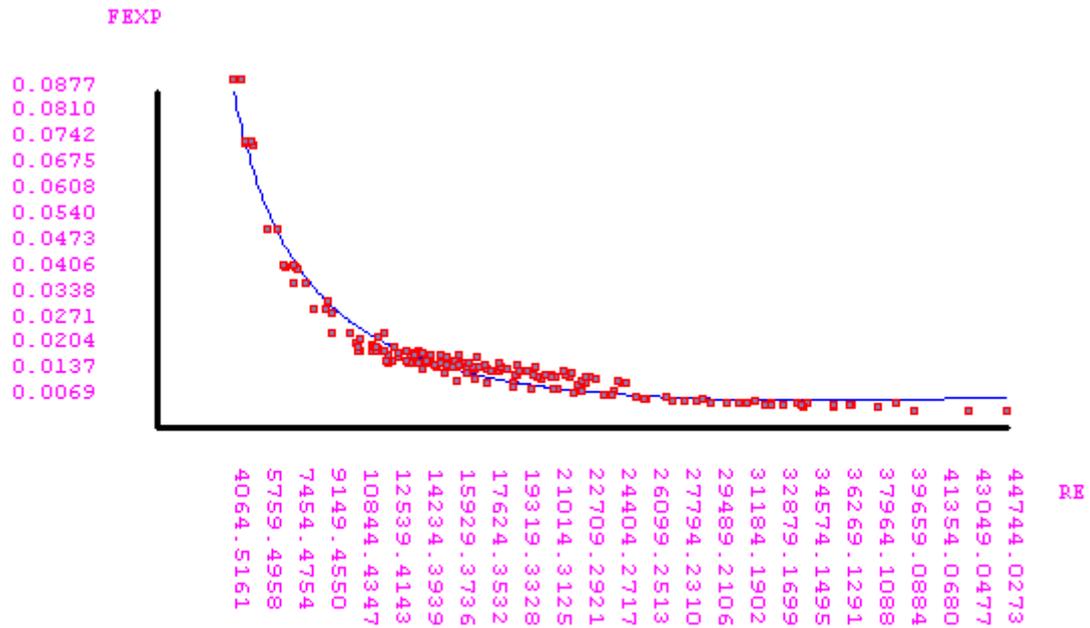


Fig.- Factor de fricción en función de Re y de He para pulpas de cola del proceso CARON en tubería de D = 100mm.

Tabla 3.9. Ecuaciones y otros resultados del ajuste mínimo cuadrado.

$$f_{\text{exp}} = \frac{10^C}{\text{Re}^{1,0621}}$$

Determinante de la matriz del sistema:355779.349216844

Determinante normalizado del sistema:2.02127241583753E-14

Error máximo al resolver el sistema:6.93889390390723E-18

Variación explicada:0.381581316191436 Grados de libertad: 2

Variación residual:0.03037490841784 Grados de libertad: 162

Variación total:0.411956224609283 Grados de libertad: 164

Error estándar de una estimación:0.0137355024458518

Error probable de una observación:0.00923595770245977

Coefficiente de correlación, $r = 0.962427482927483$

Para una prueba con nivel de confianza 0.95:

Intervalo de confianza de r : [0.94921992, 0.97224875]

Para una prueba F de Fisher con nivel de confianza 0.95:

Valor de F_c para el ajuste : 1017.5532

Valor de F_t por la tabla : 2.6609

El ajuste es estadísticamente significativo ya que $F_c > F_t$.

Coefficientes de correlación parcial:

0.43763843

0.93893049

Prueba para los Coeficientes del Modelo (0.95)

Valor teórico (t de Student), $t = 1.65566$

$t_2 = 6.19498560$

El coeficiente 2 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_2)$.

$t_3 = 34.72942682$

El coeficiente 3 es estadísticamente significativo ya que $t \leq \text{abs}(t_3)$.

Estudio de factibilidad para el mejoramiento de la eficiencia de la instalación de colas de la Empresa Ernesto Ché Guevara.

Tabla 4.1. Flujo de Efectivo

UM: Miles de USD							
Flujo de Efectivo	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Indicadores							
Utilidad Neta	13.939	28.827	32.004	35.441	39.158	43.622	45.600
(+) Reserva para Contingencias	1.384	2.768	2.768	2.768	2.768	2.768	2.768
(+) Depreciación	854	1.709	1.709	1.709	1.709	1.709	1.709
(+) Valor Residual del Activo Fijo Neto	7.533						4.737
(+) Inversión para renovar la instalación actual		177.186					
(-) Gastos de Inversión	223.449						
(-) Gastos Preoperativos	-						
(+/-)Variaciones en el Capital de Trabajo	11.680	(5.013)	55	58	55	59	56
Flujo Neto de Efectivo	(211.418)	215.502	36.426	39.860	43.580	48.040	54.758
Flujo Neto Acumulado	(211.418)	4.084	40.510	80.370	123.950	171.990	226.748
Indicadores Económico- Financieros							
Valor Actualizado Neto del Proyecto (VAN) @ 15% (MUSD)			102.202				
Tasa Interna de Retorno (TIR) (%)			41%				
Período de Recuperación (Años)							

Tabla 4.2. Estado de Origen y Aplicación de Fondos

UM: Miles de USD							
Indicadores	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Fuentes							
Valor Residual del activo fijo	7.533	-	-	-	-	-	4.737
Capital Prestado	190.000						
Total de Ingresos	37.602	75.204	77.444	79.767	82.177	84.677	87.273
	235.135	75.204	77.444	79.767	82.177	84.677	92.010
Destinos							
Gastos de Inversión	223.449	-	-	-	-	-	-
Repago de Principal		31600	35200	38800	43.000	41.400	
Intereses	10.925	20.033	16.192	11.937	7.234	1.190	
Impuestos	11.404	23.585	26.185	28.997	32.038	35.691	37.309
	234.853	75.218	77.577	79.734	82.272	78.281	37.309
Superavit o Déficit	282	(15)	(133)	32	(95)	6.396	54.701
Saldo Acumulado	282	267	134	166	71	6.468	61.169

Estudio de factibilidad para el mejoramiento de la eficiencia de la instalación de colas de la Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara.

Tabla 4.3. Gastos de Inversión y Preoperativos.

UM: Miles de USD				
Año 2003	U/M	Unidad	Precio/U	Total
Construcción y Montaje				68.420
Equipos				121.079
Bombas	uno	3	8.908	26.723
Tuberías acero D-250	m	3.500	27	93.100
Instrumentación				
Otros				
Flete y Seguro				1.256
Otros				33.950
Proyecto de Investigación				10.000
Proyecto de Ingeniería para Montaje				17.450
Licencia Ambiental				1.500
Contingencia				5.000
TOTAL		-	-	223.449

Estudio de factibilidad para el mejoramiento de la eficiencia de la instalación de colas de la Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara.

4.4. Gastos de Inversión y Preoperativos

Capital de Trabajo	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Materiales Auxiliares	(63)	(63)	(69)	(69)	(76)	(77)
Productos en Proceso						
Efectivo en Caja	9.310	(7.383)				
Cuentas por Cobrar						
Cuentas por Pagar	2.433	2.433	124	127	131	136
Variaciones en el Capital de Trabajo	11.680	(5.013)	55	58	55	59
Depreciación	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Inversión						
Terreno						
Edificaciones						
Maquinaria y Equipos	14.212	28.425	28.425	28.425	28.425	28.425
Equipos de Transporte						
Equipos de Computación						
Otros Equipos						
Depreciación Total Anual	14.212	28.425	28.425	28.425	28.425	28.425
Depreciación Acumulada	14.212	42.637	71.062	99.487	127.912	156.337
Instalación Actual	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Terreno						
Edificaciones						
Maquinaria y Equipos	15.067	30.134	30.134	30.134	30.134	30.134
Equipos de Transporte						
Equipos de Computación						
Otros Equipos						
Depreciación Total Anual	15.067	30.134	30.134	30.134	30.134	30.134
Depreciación Acumulada	105.468	135.601	165.735	195.868	226.002	256.136
		120.534				241068,82
Variación de la Depreciación	(854)	(1.709)	(1.709)	(1.709)	(1.709)	(1.709)
Existentes						
Bombas	5		7.800		39.000	
Tuberías acero D-200	3.500		23,30		81.534	
Gasto para renovar la instalación actual					177.186	
Bombas	5		7.800		39.000	
Tuberías acero D-200	3.500		23,30		81.534	
Desmontaje					14464	
Construcción y Montaje					42187	

Estudio de factibilidad para el mejoramiento de la eficiencia de la instalación de colas de la Empresa Comandante Ernesto Ché Guevara.

Tabla 4.5. Financiamiento del Capital prestado

UM: MUSD Año 2003 Capital a financiar (MP)		Años 2003	Semestres I	Capital 190000	Principal	Intereses	Total (Ppal+Int.)
Tasa de Interés:	11,50%		II	190000		10.925	10.925
		2004	I		15.800	10.471	26.271
			II		15.800	9.562	25.362
		2005	I		17.600	8.602	26.202
			II		17.600	7.590	25.190
Condiciones:		2006	I		19.400	6.526	25.926
6 meses de gracia			II		19.400	5.411	24.811
		2007	I		21.500	4.235	25.735
			II		21.500	2.999	24.499
		2008	I		41.400	1.190	42.590
				190.000	190.000	67.511	- 257.511

Tabla 4.1 Costo de Transportación de un m³ de Cola, \$ USD.

INDICADORES	1	2
Gastos de salario del personal de operación.	17769.7	17769.7
Gastos por consumo de agua para disminuirle la temperatura a la cola.	32850	32850
Gastos de energía eléctrica.	143848.4	182208
Gastos por iluminación.	78.84	78.84
Gastos imprevistos.	14	14
Gastos por mantenimiento.	3772	4883
Gastos de amortización de las bombas.	2672.307	2672.307
Gastos de amortización de las tuberías y soportes.	4892.065	4892.065
Gasto del salario del personal indirecto	813	813
Total (G_b)	205943.112	246180.912
Gasto para transportar un m ³ de cola en 3.5 Km (USD)	1.3	4.50

NOMENCLATURA FUNDAMENTAL UTILIZADA

SIMBOLO	DENOMINACIÓN	UNIDADES
D	Diámetro interior de tubos	m (pie)
d	Diámetro de la partícula	m (pie)
d_{et}	Diámetro equivalente según tamaño de partícula.	m (pie)
d_{em}	Diámetro equivalente según masa de partícula.	m (pie)
e_v	Factor de pérdidas por fricción.	(adimensional)
E_c	Energía Cinética por unidad de masa.	J/kg (lbf.pie/lb)
f, f'	Factor de fricción de Fanning.	(adimensional)
F	Fuerza resultante en un punto.	N (lbf)
ΣF	Pérdidas por fricción por unidad de masa.	J/Kg (lbf.pie/lb)
g	Aceleración de la gravedad.	m/s^2 (pie/s ²)
gc	Constante adimensional.	(lb.pie/lbf.s ²)
He	Número de Hedstrom.	(adimensional)
K	Índice de consistencia.	Pa.S ⁿ (lb.s ⁿ⁻² /Pie)
Kc	Coefficiente de resistencia en accesorios y válvulas.	(adimensional)
L	Longitud de tubos rectos.	m(pie)
n	Índice de flujo.	(adimensional)
N; N'; Ni	Potencia consumida por el fluido; motor impulsor y motor en una bomba.	W (lbf.pie/s)
P_d ; P_s	Presión de descarga y de succión, respectivamente, en una bomba.	Pa(lbf /pie)
ΔP_f	Caída de presión en una tubería.	Pa(lbf/pie ²)
ΔP_b	Incremento de presión en una bomba.	Pa(lbf/pie ²)
P_1	Número de plasticidad.	(adimensional)
Q	Flujo volumétrico.	m^3/s (pie ³ /s)
Qm	Flujo másico.	Kg/s(lb/s)
R_e	Número de Reynolds.	(adimensional)
R_{ecr}	Número de Reynolds crítico.	(adimensional)
t	Tiempo.	s(s)
Ws	Trabajo por unidad de masa en una bomba.	J/kg (lbf.pie /lb)
Z	Altura de un punto con relación a un plano de referencia.	m(pie)
V	Velocidad del flujo.	m/s (pie/s)
V _{máx.}	Velocidad máxima del flujo.	m/s (pie/s)
V _m	Velocidad media del flujo.	m/s (pie/s)
V _{cr}	Velocidad crítica del flujo.	m/s (pie/s)
V _p	Velocidad límite de caída de las partículas.	m/s (pie/s)
KT ₁	Coefficiente de consistencia conocido a una temperatura dada.	Pa.S ⁿ
KT _i	Coefficiente de consistencia a una temperatura dada.	Pa.S ⁿ
H _t	Tensión de vapor del fluido.	° C
H _s	Altura de succión.	m
(NPSH) _A	Altura positiva neta de carga de succión admisible.	m
(NPSH) _R	Altura positiva neta de carga de succión requerida.	m
Σh	Pérdidas hidráulicas en la línea de succión.	m
i.e.p	Punto izoeléctrico.	(adimensional)

P.Z.C	Punto de carga cero.	(adimensional)
T	Temperatura.	° C
W	Área de la sección transversal del conducto.	m ² (pie ²)
S	Concentración másica.	%
Cw	Concentración volumétrica.	%
Vs	Volumen de sólido.	m ³ (pie ³)
V _l	Volumen de líquido.	m ³ (pie ³)
m _s	Masa de sólido.	Kg(lb)
m _s	Masa de líquido.	Kg(lb)
i	Pérdidas específicas de presión.	P _{a/m} (lbf/pie)
H _{máx.}	Intensidad de campo máxima efectiva aplicada la muestra	k A/m (Oe)
H _{d máx.}	Intensidad del campo de desmagnetización máxima sobre la muestra.	k A/m (Oe)
M _{máx.}	Magnetización máxima en la muestra.	k A/m (Oe)
B _{máx.}	Inducción máxima en la muestra.	k A/m (Oe)
p _{máx.}	Momento magnético máximo en la muestra.	k A/m (Oe)
Mr.	Magnetización remanente en la muestra.	k A/m (Oe)
Br.	Inducción remanente en la muestra .	T (Gauss)
Pr.	Momento magnético remanente en la muestra.	-
H _{cm.}	Campo coercitivo de inducción (H para M=0).	k A/m (Oe)
H _{cb.}	Campo coercitivo de inducción (H para B= 0)	k A/m (Oe)
BH _{máx.}	Producto BH máximo.	T . A/m (M gauss Oe)
K _{rec.}	Permeabilidad magnética recoil relativa.	-
K _{máx.}	Permeabilidad magnética relativa máxima.	-
U _{cpí.}	Energía de primera imanación	Joule(erg)
U _{mag.}	Energía de magnetización en un ciclo.	Joule(erg)
Símbolos Griegos		
α	Parámetros de corrección de energía cinética en el modelo reológico.	(adimensional)
α _c	Parámetro que define el Reynolds crítico en plástico Bingham.	(adimensional)
β	Parámetro para el coeficiente Fanning	(adimensional)
β _i	Coeficiente de corrección de sobrecargas (incremento de potencia requerida) en bombas.	(adimensional)
γ	Velocidad de deformación (gradiente de velocidad).	1/s (1/s)
ξ	Potencial Zeta.	(mV)
μ	Viscosidad dinámica.	Pas. (lb/ Pie.s)
μ _a	Viscosidad aparente con fluidos no newtonianos	Pas. (lb/ Pie.s)
π	Constante matemática.	(π = 3,1416)
e	Constante matemática	(e =2,7118)
ρ _s	Densidad del sólido.	Kg/ m ³ (lb/Pie ³)
ρ _o	Densidad del agua.	Kg/ m ³ (lb/Pie ³)

ρ_p	Densidad de la pulpa.	Kg/ m ³ (lbf/Pie ³)
τ_B	Esfuerzo inicial de Bingham.	Pa(lbf/pie ²)
τ_{ij}	Esfuerzo cortante (de cizalla).	Pa(lbf/pie ²)
τ_{ii}	Esfuerzo normal.	Pa(lbf/pie ²)
τ_w	Esfuerzo cortante evaluado en la pared del tubo.	Pa(lbf/pie ²)
τ_o	Esfuerzo cortante inicial físico del modelo de Bingham.	Pa(lbf/pie ²)
G_0	Densidad de carga superficial.	C/m ² o mol/L
ϕ	Coefficiente de corrección de las pérdidas hidráulicas en flujo trifásico.	(adimensional)