

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
" DR. ANTONIO NUÑEZ JIMÉNEZ
FACULTAD DE METALURGÍA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

Simulación del comportamiento de los parámetros de flujo en el impelente de una bomba de los espesadores de la empresa Pedro Sotto Alba.

Autor: Rainelki Veranes García

Tutor(es): MSc. Roilber Lambert Sánchez

MSc. Benigno Leyva de la Cruz

Ing. Yordan Rosa De Armas

Curso 2014-2015

"Año 57 de la Revolución

DEDICATORIA

A mis padres, Ramón Veranes Jardines y Mirtha García Pérez.

A mis hijas. Riamna Veranes Goulet y Katherine Veranes Monjes.

En especial a mi hermano mayor Orlanqui Quintana García y a mi esposa Dunia Monjes Merencio.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a mis tutores: MSc Roilber Lambert Sánchez., Ing. Yordan Rosa De Armas, MSc: Benigno Leyva de la Cruz a los profesores del Departamento de Mecánica, a Ing. Olga Pérez Maliuk, por las ayudas prestadas en los diferentes momentos, también agradezco a todos los que contribuyeron a este éxito.

A mis padres, esposa y familia en general, por el apoyo brindado y por siempre estar dispuestos a ayudarme.

A mis amistades y compañeros de trabajo que con su apoyo desinteresado han contribuido a que alcanzara esta meta.

A todos muchas gracias.

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo: **Rainelki Veranes García**, autor de este trabajo y los tutores MSc. Roilber Lambert Sánchez, MSc: Benigno Leyva de la Cruz, Ing. Yordan Rosa De Armas, declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico y la empresa Pedro Sotto, para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.

X

Rainelki Veranes García

X

MSc: Roilber Lambert Sánchez

X

MSc: Benigno Leyva de la Cruz

X

Ing. Yordan Rosa De Armas

PENSAMIENTO

“...La vida debe ser diaria, móvil, útil y el primer deber de un hombre de estos días, es ser un hombre de su tiempo. No aplicar teorías ajenas, sino descubrir las propias. No estorbar a su país con abstracciones, sino inquirir la manera de hacer prácticas las útiles. Si de algo serví antes de ahora, ya no me acuerdo: lo que quiero es servir más...”

José Martí Pérez.

Apóstol Nacional de Cuba

Resumen

El presente trabajo nace a partir de los problemas surgidos en la empresa Pedro Sotto con el insuficiente conocimiento de los parámetros de trabajo de la red hidráulica que abastece el área de los espesadores. El objetivo que se cumple con el desarrollo del contenido tratado consistió en simular el comportamiento de los parámetros de flujo en el interior de la bomba de los espesadores de pulpa con el empleo del Método de Elementos Finitos. Para cumplir con el propósito planteado se realiza una indagación bibliográfica en correspondencia con el tema en cuestión, se confeccionó una breve descripción de la red hidráulica del área objeto de estudio antes mencionado, se caracterizan algunas de las propiedades de los fluidos y se utilizó el Software ANSYS para la evaluación de los parámetros. La comparación entre los resultados de la simulación con el empleo del método de elementos finitos y los obtenidos mediante mediciones indica que se obtiene un margen de error de 2,5 %, lo que demuestra la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante los cálculos. Se determina que la variación de la presión según simulación es de 0,77 MPa y la obtenida por mediciones es de 0,79 MPa. Además, se plantea a partir del análisis económico que si en lugar de operar con una variación de presión de 0,792 5 MPa en la bomba, se logra una variación de 0,77 MPa el costo de bombeo se reduciría en 137,49 CUC/año.

Summary

The present work is born starting from the problems arisen in the company Pedro Sotto with the insufficient knowledge of the working parameters of the hydraulic net that supplies the area of the thickeners. The objective that is fulfilled the development of the content treaty consisted on simulating the behavior of the parameters of flow inside the pump of the pulp thickeners with the employment of the Method of Finite Elements. To fulfill the outlined purpose it is carried out a bibliographical inquiry in correspondence with the topic in question, a brief description of the hydraulic net of the area object of study was made, some of the states of the fluids are characterized and the Software ANSYS was used for the evaluation of the parameters. The comparison among the results of the simulation with the employment of the method of finites elements and the obtained ones by means of mensurations indicates that one obtains a margin of error of 2, 5 %, what demonstrates the dependability of the obtained results by means of the calculations. It is determined that the variation of the pressure according to simulation is of 0,77 MPa and the obtained one for mensurations it is of 0,79 MPa. Beside, if in the economic analysis, instead of operating with a variation of pressure of 0,792 5 MPa in the pump, a variation of 0,77 MPa the cost of pumping is achieved it would decrease in 137,49 CUC/year.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
1. Método de investigación experimental.	3
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1. Introducción	4
1.2. Definiciones básicas sobre el proceso de sedimentación.....	4
1.3. Trabajos precedentes	11
1.4. Clasificación de los fluidos	14
1.4.1. Modelos reológicos	15
1.5. Principios generales del análisis de procesos mediante la simulación	18
1.5.1. Antecedentes históricos del método de elementos finitos	19
1.6. Conclusiones del capítulo 1	20
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	21
2.1. Introducción	21
2.2. Características técnicas del sistema de bombeo de la planta	21
2.2.1. Característica del conjunto motor - bomba.....	23
2.3. Propiedades de la pulpa	23
2.4. Procedimiento de cálculo del software.....	25
2.5. Simulación con el método de elemento finito.....	34
2.6. Ajuste de curva por regresión	36
2.7. Determinación del error relativo	37
2.8. Determinación de los costos	38
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	40
3.1. Introducción	40
3.2. Resultados de la caracterización reológica de la pulpa como plástico ideal	40
3.4. Ventajas y desventajas de la aplicación del método de Elementos Finitos	44

3.5. Valoración del impacto económico y medio ambiental	45
3.5.1 Cálculo económico	45
3.5.2. Impacto ambiental	48
3.6. Conclusiones del capítulo 3	51
CONCLUSIONES GENERALES	52
RECOMENDACIONES	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXOS	57



INTRODUCCIÓN

El tercer milenio ya es una realidad y brinda la perspectiva de un mundo globalizado donde cada país debe luchar por ganarse una parte del mercado. Las estrategias a consolidar deben lograr un nivel de eficiencia, eficacia y efectividad acordes con los impuestos en el ámbito internacional. Cuba no está ajena a esta situación y debe llevar a cabo acertados métodos y técnicas para lograr la competitividad de sus entidades teniendo en cuenta que el éxito empresarial es multicausal y es necesario mantener elevados niveles de satisfacción de los clientes por lo que la excelencia se perfila como el camino a seguir.

En los momentos actuales se han convertido en el mundo globalizado de hoy, en una necesidad insoslayable para permanecer en el mercado a partir del hecho de que un producto o servicio que no satisfaga los requerimientos de calidad del mercado no se logra comercializar, y si no son estables a largo plazo, las empresas llegan a perder su competitividad y prestigio por lo que no sobreviven en el mercado.

La razón de esta investigación se fundamenta en la planta de Espesadores la cual tiene como objetivo preparar una pulpa espesada de 46 a 48 % de sólido en los tanques de espesadores o sedimentadores a partir de una pulpa con 25 % de sólido recibida de la planta de Preparación de Pulpa. En cada espesador ocurre un proceso de sedimentación influenciado por las características reológicas del mineral, producto de ésta sedimentación se logra un sólido óptimo en el cono del espesador entre 46 y 48 %. Este sólido depende fundamentalmente de la alimentación y de la velocidad de sedimentación. Los espesadores cuentan con una estructura de cuatro brazos (dos largos y dos cortos), con rastrillos, los que son accionados por un mecanismo instalado en el centro de cada sedimentador, estos rastrillos arrastran la pulpa hacia el centro donde se produce la descarga hacia las bombas las que son las encargadas de transferir esta pulpa hacia Planta de Lixiviación.



Situación problemática

El sistema de bombeo de los espesadores E y F de la Planta de Espesadores, tiene deficiencia en el flujo que se necesita por diseño hacia la Planta de Lixiviación, provocado fundamentalmente por la sedimentación de gravilla en el fondo de los espesadores limitando la salida de pulpa sedimentada aproximadamente entre 35 % y 45 % de sólido. Esta gravilla que se ha agregado al proceso es mayor que en años anteriores, y por lo que se ha investigado las zonas de extracción de mineral para los años siguiente el por ciento de gravilla seguirá aumentado.

Problema a investigar

Existe insuficiente conocimiento del comportamiento de la pulpa en el interior de las bomba de la planta de espesadores, lo que imposibilita establecer adecuadamente los parámetros de trabajo de dicho sistema.

Objeto de estudio

Sistema de bombeo de la pulpa espesada hacia la Planta de Lixiviación de la Empresa “Pedro Soto Alba”

Campo de acción

Simulación del flujo de fluido

Objetivo general

Simular el comportamiento del fluido en el interior de la bomba de los espesadores de pulpa con el empleo del Método de Elementos Finitos para el establecimiento de los parámetros de trabajos del sistema.

Objetivos específicos

- Registrar parámetros de trabajo reales de la instalación para la validación de los resultados de la simulación.
- Realizar cálculos con el empleo del Método de Elementos Finitos del comportamiento del fluido en el interior de la bomba.



Hipótesis

Es posible establecer los parámetros de trabajo de las bombas tales como velocidad y presión de la planta de espesadores, si se obtiene el comportamiento del fluido en el interior de la bomba, aplicando el Método de Elementos Finitos.

Tareas de la investigación

1. Búsqueda bibliográfica para establecer el estado del arte sobre la transferencia de pulpa mineral.
2. Análisis del procedimiento de cálculo empleado por el software de Elementos Finitos.
3. Realización de la simulación por el Método de Elementos Finitos y valoración de los resultados.

Métodos empleados

1. Método de investigación experimental.
2. Técnicas computacionales para el procesamiento de los datos experimentales.
3. Métodos estadísticos matemáticos para el procesamiento de los datos.
4. Simulación por el Método de Elementos Finitos.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Las instalaciones de bombeo en la industria del níquel son muy importantes para el manejo de sustancias en el proceso de producción.

En la Planta de Espesadores de la Fábrica Pedro Soto Alba existen en la actualidad seis (6) espesadores (A, B, C, D, E, F) de los cuales se estudiarán el sistema de bombeo de los espesadores E y F, donde existen cuatro (4) bombas. Esta instalación ha presentado dificultad en este último periodo por lo que se recomienda hacer una simulación para detectar y solucionar algún problema de diseño que pueda existir.

Este capítulo tiene como objetivo establecer los fundamentos teóricos para el estudio del sistema de hidrotransporte de pulpa.

1.2. Definiciones básicas sobre el proceso de sedimentación

Pulpa de mineral

Según Romero (2004) es una muestra rica en mineral laterítico y agua, formada en planta de pulpa y espesada en esta planta. Tradicionalmente para referirnos a esta muestra decimos pulpa o mineral.

Sedimentación

Según Caballero, (2008) es la separación de las partículas sólidas contenidas en un volumen de líquido ya sea por asentamiento o decantación.

Densidad

Según Miranda (2009) es la relación de la masa de cualquier volumen de una sustancia a la masa de un volumen igual de agua, cualidad de ser denso o compacto. Espesura.

Granulometría

Según Miranda (2009) es la proporción de tamaños diferentes de partículas.



Por ciento de sólido

Según Suárez (2010) es el contenido de partículas sólidas existentes en un volumen líquido.

Transverso

Según Suárez (2010) es el muestreo que se realiza de forma transversal a los espesadores para determinar la cantidad de sólido que hay en su interior (inventario) y saber el por ciento de sólido en cada capa para orientar la operación del sedimentador.

Torque

Según Nápoles (1992) se define como momento torsor. la resistencia que le ofrece el mineral al desplazamiento de los brazos del mecanismo de los espesadores.

Sedimentación

Según el manual de operaciones de la empresa Pedro Sotto Alba (2014): una suspensión de partículas concentradas puede sedimentar en una de las dos formas siguientes. En la primera, después de un breve período de aceleración inicial, la interface entre el líquido claro y la suspensión se desplaza hacia abajo con velocidad constante, formándose una capa de sedimento en el fondo del recipiente. Cuando la interface se aproxima a la capa de sedimento, la velocidad a la que desciende disminuye hasta alcanzar el " punto crítico de sedimentación ", cuando se forma una interface directamente entre el sedimento y el líquido claro. La sedimentación posterior es consecuencia únicamente de la consolidación del sedimento, ascendiendo entonces el líquido hacia arriba alrededor de los sólidos, que forman entonces un lecho en el que las partículas están sueltas pero en contacto unas con otras.

Como el área de flujo se reduce gradualmente, la velocidad disminuye gradualmente. En la Figura 1(a) se ilustra una etapa del proceso de sedimentación.

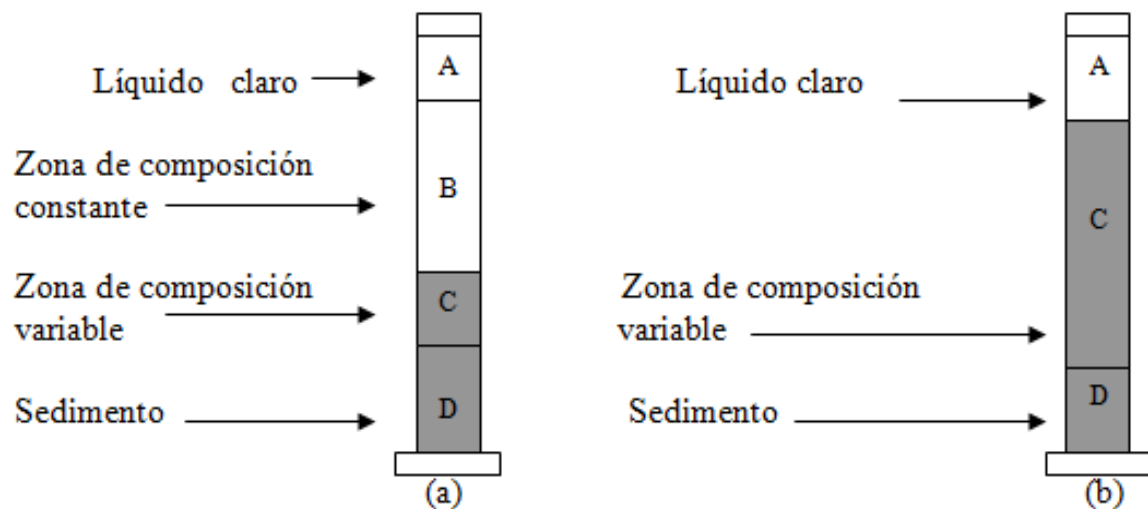


Figura 1. Sedimentación de suspensiones concentradas. (a) Sedimentación del tipo 1. (b) Sedimentación del tipo 2.

A ese líquido claro, B es suspensión a la concentración inicial, C es una capa a través de la cual disminuye progresivamente la concentración y D es el sedimento. La velocidad de sedimentación permanece constante hasta que la superficie superior coincide con la superficie de la zona C, y disminuye entonces hasta que se alcanza el punto crítico de sedimentación una vez que han desaparecido las zonas B y C. Una segunda modalidad de sedimentación (Figura 1b) es la que se obtiene cuando la gama de tamaños de partículas es muy grande. La velocidad de sedimentación disminuye progresivamente durante toda la operación, sin existir ninguna zona de composición constante y extendiéndose la zona C desde la interface superior hasta la capa de sedimento.

Las principales razones de la modificación de la velocidad de sedimentación de las partículas en una suspensión concentrada son las siguientes:

1. Las partículas grandes sedimentan con relación a una suspensión de partículas más pequeñas, por lo que la densidad efectiva y la viscosidad del fluido aumentan.



2. La velocidad ascendente del fluido desplazado durante la sedimentación es notable en una suspensión concentrada, y la velocidad aparente de sedimentación es menor que la velocidad real relativa al fluido.
3. Los gradientes de velocidad en el fluido cercano a las partículas aumentan como resultado del cambio en el área y en la forma de los espacios de flujo.
4. Las partículas más pequeñas tienden a ser arrastradas hacia abajo por el movimiento de las partículas grandes, experimentando por tanto una aceleración.
5. Como en una suspensión concentrada las partículas se encuentran más juntas, la floculación es más acentuada en un disolvente ionizado, aumentando el tamaño efectivo de las partículas pequeñas.

Si el intervalo de tamaños de partículas no es superior a 6:1, sedimenta una suspensión concentrada con una interface bien establecida y todas las partículas descienden a la misma velocidad.

Otros aspectos que influyen en la sedimentación son:

- ❖ Diámetro del recipiente.
- ❖ Concentración de la suspensión.
- ❖ Forma del recipiente
- ❖ Composición del mineral.

El espesador

Según Caballero, (2008) el espesador es una planta industrial en la que se aumenta la concentración de una suspensión por medio de la sedimentación, con la formación de un líquido claro. En la mayor parte de los casos la concentración de la suspensión es elevada y tiene lugar una sedimentación impedida. Los espesadores pueden funcionar como unidades continuas o discontinuas, y consisten en tanques relativamente poco profundos de los cuales se retira el líquido claro por la parte superior y el sedimento por el fondo.



Para obtener la mayor capacidad posible en un espesador de un tamaño dado, la velocidad de sedimentación debe ser tan elevada como sea posible. En muchos casos dicha velocidad debe aumentarse artificialmente mediante la adición de pequeñas cantidades de un electrólito, que provoca la precipitación de las partículas coloidales y la formación de flóculos. A menudo se calienta también la suspensión ya que esto disminuye la viscosidad del líquido y facilita el aumento de tamaño de las partículas grandes en suspensión a expensas de las pequeñas más solubles. Además, el espesador dispone frecuentemente de un lento agitador, que provoca una disminución de la viscosidad aparente de la suspensión y colabora también a la consolidación del sedimento.

El espesador discontinuo consiste normalmente en un depósito cilíndrico provisto de un fondo cónico. Una vez que la sedimentación se ha desarrollado durante un tiempo adecuado, se retira por el fondo el líquido espesado, separándose el líquido claro desde la parte superior a través de una tubería ajustable. Las condiciones que prevalecen en el espesador discontinuo son parecidas a las encontradas en la sedimentación corriente de laboratorio realizada en un tubo, y durante las etapas iniciales habrá generalmente una zona en la que la concentración de la suspensión es igual a la de la alimentación.

El espesador continuo, consiste en un depósito poco profundo de gran diámetro, de fondo plano. La alimentación entra por el centro, a una profundidad de treinta o noventa centímetros por debajo de la superficie del líquido, con la menor turbulencia posible.

El líquido espesado es retirado continuamente a través de una salida situada en el fondo, y los sólidos depositados en el fondo del depósito son dirigidos hacia esta salida por medio de un rastrillo provisto de raquetas que giran lentamente. El rastrillo está montado sobre bisagras, de manera que sus brazos se elevan automáticamente si el momento de torsión excede un cierto valor. Esto evita que resulte dañado si se encuentra sometido a una sobrecarga. Gracias a la acción del rastrillo, se obtiene un grado de espesamiento superior al de la instalación discontinua. El líquido clarificado se retira continuamente a través de un rebosadero que rodea completamente el borde superior del depósito. Por tanto, los sólidos se desplazan continuamente hacia abajo, y



a continuación hacia el centro dirigiéndose hacia la salida del líquido espesado. El líquido se desplaza hacia arriba y radialmente hacia el rebosadero. En general no hay ninguna región de concentración constante en el espesador continuo.

El espesador tiene una doble función. Una función es producir un líquido claro, y por tanto la velocidad ascendente del líquido debe ser siempre menor que la velocidad de sedimentación de las partículas. Así, para una capacidad, la capacidad de clarificación está determinada por el diámetro del depósito. La otra función del espesador es proporcionar un grado determinado de espesamiento de la suspensión. Esto está controlado por el tiempo de residencia de las partículas en el depósito, o sea por la profundidad existente por debajo de la entrada de la alimentación.

El funcionamiento satisfactorio del espesador como clarificador depende de la existencia en la parte superior de una zona de contenido de sólidos despreciable. En esta zona debe tenderse a alcanzar unas condiciones tales que se desarrolle una sedimentación libre, de manera que la velocidad de sedimentación de cualquier partícula que haya sido transportada hasta esta altura sea suficiente para conseguir de nuevo su sedimentación frente a la corriente ascendente de líquido. Si esta zona superior no es suficientemente profunda, parte de las partículas más pequeñas pueden escapar con el líquido que rebosa. La velocidad volumétrica de flujo del líquido que asciende a través de la zona de clarificación es igual a la diferencia entre la velocidad de alimentación de líquido en la suspensión y la velocidad de separación por el drenaje inferior. Por tanto, las condiciones existentes en la zona de clarificación están determinadas por la concentración de sólidos en el líquido espesado y por la cantidad total del mismo.

Espesamiento

El proceso de eliminación del agua de los productos se llama el espesamiento.

Se puede espesar los productos:

- 1) Por derrame libre (se utiliza para el material grueso granulado que se almacena amontonado, apilado, en elevadores o zarandas especiales).



- 2) Por el espesamiento (se utiliza para el material fino y de lodos).
- 3) Por filtración (a cuenta de la creación del vacío el agua se absorbe por el filtro).
- 4) Por secado (el material se calienta y se evapora el agua).

El proceso del espesamiento de pulpa en la fábrica Pedro Sotro Alba se efectúa por varias etapas, e independiente, precipitándose en todos los casos, bajo la acción de la fuerza de gravedad.

Reología:

Según Betancourt (2012) es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos.

Viscosidad: Se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido. Dicho concepto se introdujo anteriormente en la Ley de Newton, que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (gradiente de velocidad).

$$\tau = -\mu \cdot \frac{dU}{dr} \quad 1.1$$

τ - esfuerzo cortante

μ - viscosidad del fluido

$\frac{dU}{dr}$ - gradiente de velocidad.

Densidad de una mezcla de pulpa:

La densidad de una mezcla de pulpa está en función de:

- La densidad del fluido transportador.
- La densidad de la partícula del sólido.
- La concentración por volumen de la fase sólida.

La densidad de una mezcla de pulpa está expresada por:

$$\rho_m = \frac{100}{C_w / \rho_s + (100 - C_w) / \rho_L} \quad 1.2$$

C_w – concentración por peso.

ρ_m – densidad de la fase mezcla.

ρ_L – densidad de la fase líquida.

ρ_s – densidad de la fase sólida.

1.3. Trabajos precedentes

En la actualidad es muy necesaria herramienta computacional para el cálculo de las pérdidas de presión que ocurran en las bombas que trabaje con fluidos no newtonianos,

Un importante aporte fue dado por Welty (1976) y Bandala (2001), al efectuar una evaluación del flujo es del tipo laminar o viscoso, donde plantean que la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes y entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades y además en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento. Tanto las láminas como las partículas en movimiento en la tubería, están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye y la aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la succión, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas.

Según Betancourt(2012) Aportaron considerablemente los trabajos de Nekrasov (1986), que aborda la temática relacionada con la teoría general de la hidráulica, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con el transporte hidráulico y constituyen un pilar fundamental para la comprensión de la misma en sus más diversas formas, en este trabajo se exponen diferentes situaciones prácticas donde se vinculan los fenómenos de movimientos hidráulicos con los equipos e instalaciones existentes en las industrias metalúrgicas, así como, en otras empresas donde se aplica este método de transporte.



Con frecuencia se requiere la transportación de flujos con propiedades no newtonianas, con un comportamiento pseudoplástico o características plásticas con la aparición de esfuerzos cortantes iniciales, en su movimiento por los dispositivos de transporte. En dependencia de las condiciones de operación, dichos flujos pueden ser laminares o turbulentos con diferentes influencias de las características reológicas según Darby (2002).

De tal manera para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados y diferentes factores han sido analizados. La caída de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama *et al.*(1980).

Adhikari *et al.*(2002); incorporaron el concepto de redes neuronales, como una nueva herramienta computacional, en el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías, para lo cual manejaron fluidos de comportamiento no newtoniano, obteniendo errores de predicción menores a un 5,4 % con respecto a los valores experimentales.

Pérez, R. (2000), analiza procedimientos que permiten valorar y consecuentemente elegir las bombas centrífugas a partir de los datos técnicos aportados por el fabricante. La cavitación es un fenómeno frecuente en el trabajo de estas máquinas, influye considerablemente en los indicadores técnicos - económicos y depende no sólo del sistema, sino también de la calidad del diseño y construcción del equipo.

En el trabajo de Iakovlev *et al.* (1961), 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.

En técnicas de reforzamiento de conductos hidráulicos para el transporte de sólidos, Durand (1966) se refiere a la relación existente entre la dureza del sólido en suspensión y la del material del conducto, descartando la relación que debe existir entre ambas. Nedved (1966) presentó el informe final de los trabajos de búsqueda de fangos coralinos, donde se tomaron diferentes muestras para evaluar el contenido de



carbonato de calcio (CaCO_3), y granulométricamente por las mallas 20, 48, 100 y 200mesh.

Transporte hidráulico por tuberías para hidromezclas concentradas (Smoldiev, 1968) profundiza sobre aspectos que influyen en la destrucción de las tuberías y sus accesorios, entre los cuales se encuentra el pH, el proceso de elongación de las tuberías producto de la dilatación térmica de las mismas y la influencia que tienen la granulometría, la concentración de sólidos en la hidromezcla y la velocidad del fluido en la durabilidad.

Barreto (1979) Izquierdo (1989) Suárez (1998) y Turro (2002) han estudiado sistemas de hidrotransporte de materiales concentrados que se comportan como suspensiones no newtonianas similares al de las pulpas de cieno carbonatado. En los trabajos donde abordan estas temáticas se obtienen modelos físico –matemáticos del movimiento de suspensiones minerales y su comportamiento en el movimiento de estas por tuberías, a partir del análisis experimental de las propiedades físicas, químicas y mecánicas, composición granulométrica y mineralógica, comportamiento reológico y factores que influyen sobre este. Nakayama (1980) realizó un estudio de las caídas de presión en una tubería para el transporte de pasta de pescado estableciendo valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham.

Fomenko (1986) muestra los métodos para determinar la velocidad de sedimentación de cualquier hidromezcla en función de la granulometría, demostrando que puede existir una variación considerable de la misma si no se determina correctamente la función adecuada. Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal.

Turro (2002) efectúa la caracterización granulométrica, química, mineralógica y magnética de la fase sólida de muestras industriales de la cola producida, mediante el proceso CARON, en la Empresa Niquelífera "Comandante Ernesto Che Guevara" de Moa, así como la caracterización reológica, de sedimentación y de estabilidad de las hidromezclas en medio amoniacal.



Hernández (2003) contribuye a realizar el gráfico que relaciona el factor de fricción en función del número de Reynolds y Hedstron.

Jiménez (2005) enfoca su trabajo relacionado con el tema al caracterizar el cieno carbonatado con muestras industriales tomadas a la entrada de los reactores en la Planta de Neutralización. Las muestras fueron caracterizadas químicamente, mostrando una composición química media del 89,32% de carbonato de calcio.

Laurencio et ál. (2004) calcula y proyecta el esquema del transporte de hidromezclas de alta densidad (cola) en el proceso de carbonato amoniacal atendiendo a sus propiedades físico-mecánicas y de composición.

Martínez (2004) realiza un estudio sobre el estado actual del hidrotransporte de fluidos. Analiza, además, las propiedades físico mecánicas de las colas, se propone una metodología que permite determinar el régimen de trabajo del sistema actual de transporte de cola, así como el cálculo y proyección de las nuevas variantes determinadas para la hidrotransportación.

De la revisión bibliográfica efectuada de los trabajos precedentes anteriormente se determina que en ninguno de ellos se efectúa, una simulación de los álabes de la bomba del sistema de bombeo de la pulpa laterita que va desde la planta espesadores a la planta de lixiviación de la Empresa Pedro Soto Alba

1.4. Clasificación de los fluidos

Desde el punto de vista reológico, los fluidos se clasifican en Newtonianos y no Newtonianos (Figura 1.2). Los fluidos Newtonianos son aquellos que siguen la ley de Newton de la viscosidad. Los fluidos no Newtonianos presentan como característica fundamental el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad y, por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aun cuando se mantenga la temperatura y otras condiciones constantes; estos se clasifican en tres grupos: Fluidos de viscosidad independiente del tiempo, fluidos de viscosidad dependiente del tiempo y fluidos viscoelásticos.

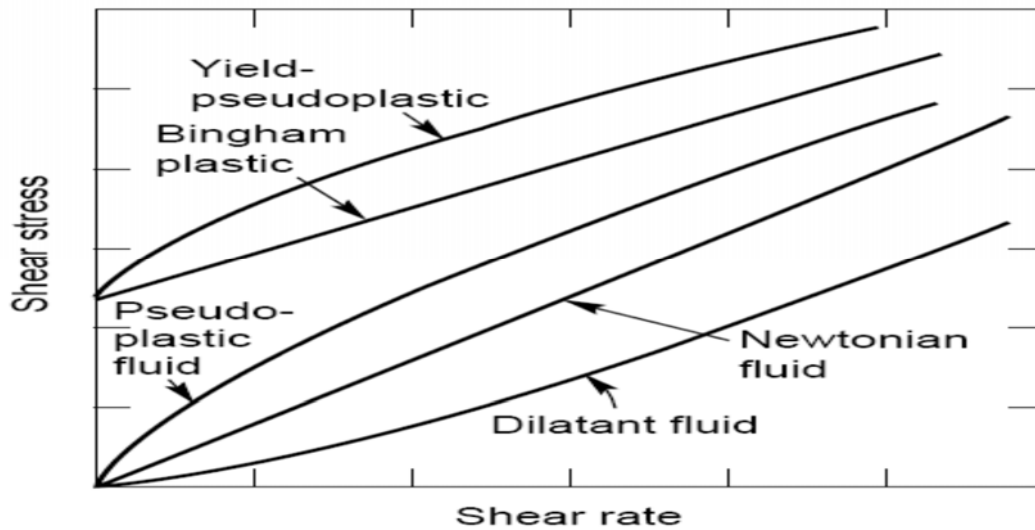


Figura 1.2. Comportamiento de los tipos de flujos independiente del tiempo.

1.4.1. Modelos reológicos

Para expresar la relación existente en estado estacionario entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad se han propuesto algunas expresiones matemáticas, existentes en algunas literaturas relacionadas con los fluidos no Newtonianos tales como Welty (1976) y Bandala (2001).

- Modelo de Oswald de Waele o Ley de potencia:

$$\tau_{yx} = m(\gamma_{yx})^n \quad (1.3)$$

Se utiliza mucho para describir el comportamiento reológico de los fluidos pseudoplásticos y dilatantes.

También puede expresarse por la viscosidad aparente

$$\mu = \frac{\tau_{yx}}{\gamma_{yx}} = m(\gamma_{yx})^{n-1} \quad (1.4)$$

En la Figura 1.3 se muestra el comportamiento de los fluidos pseudoplásticos.

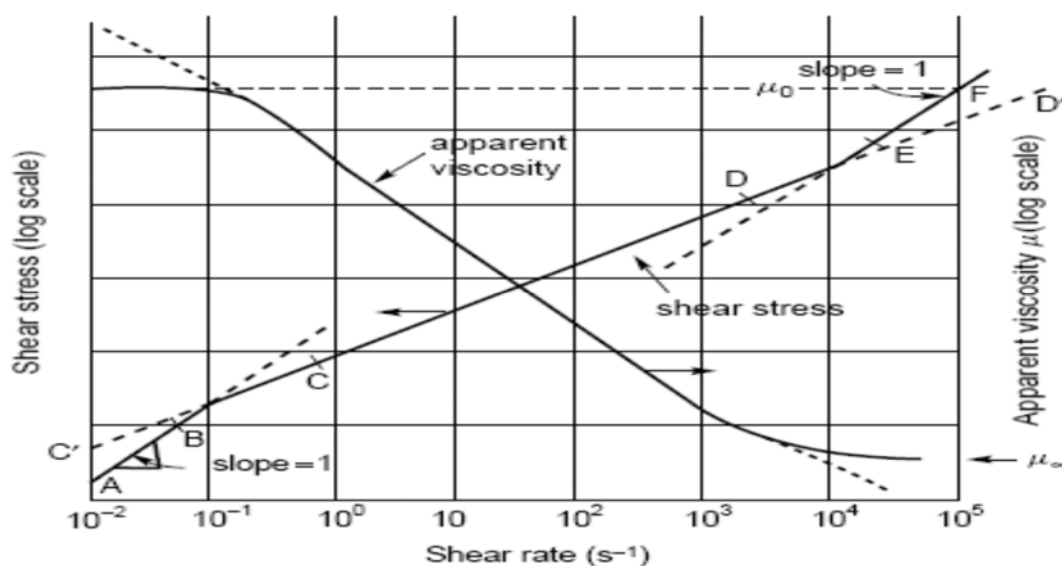


Figura 1.3. Representación esquemática del comportamiento de la seudoplasticidad.

Para $n < 1$, el fluido presenta propiedades pseudoplásticos; $n = 1$, el fluido muestra comportamiento Newtoniano; $n > 1$, el fluido muestra comportamiento dilatante.

En la ecuación 1.4, m y n son dos parámetros empíricos de las curvas de los accesorios y son conocidos como coeficiente de consistencia del fluido e índice del comportamiento del fluido, respectivamente. Para un fluido dilatante, el índice puede tener algunos valores entre 0 y 1. El valor más pequeño de n , el más grande es el grado de pseudoplasticidad. Para un fluido dilatante, el índice n será más grande que la unidad. Cuando $n=1$, las ecuaciones 1.3 y 1.4 se reduce la a ecuación 1.1, el cual, describe el comportamiento de los fluidos Newtonianos.

- Ecuación de viscosidad de Carreau.

Carreu (1972), basado en consideraciones de las redes moleculares, plantea el siguiente modelo de viscosidad, en el cual incorpora ambos límites de viscosidad μ_0 y

 $\mu_\infty:$

$$\frac{\mu - \mu^\infty}{\mu_0 - \mu^\infty} = \{1 \pm m(\gamma_{yx})^2\}^{n-1/2} \quad (1.5)$$

Donde $n(<1)$ y λ son dos parámetros de la curva de los accesorios. Este modelo puede describir el comportamiento pseudoplástico sobre rangos anchos de velocidad de deformación (s^{-1}) pero solo a expensa de la complejidad añadida de cuatro parámetros. Este modelo predice el comportamiento de fluido Newtoniano $\mu = \mu_0$, cuando $n=1$, o $\lambda=0$, o ambos.

- Modelo del fluido Ellis.

El modelo de Ellis es apropiado cuando las desviaciones del modelo de la ley de potencia son significantes solo a baja velocidad de deformación.

La viscosidad aparente de un fluido del modelo de Ellis es dada por:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + (\tau_{yx}/\tau_{1/2})^{\alpha-1}} \quad (1.6)$$

En esta ecuación, μ_0 es el cero de la viscosidad cortante y las dos constantes $\alpha(>1)$ y $\tau_{1/2}$ son parámetros ajustables. Mientras el índice α es una medida del grado de comportamiento pseudoplástico (entre más grande el valor de α , más grande es la tendencia a pseudoplástico), $\tau_{1/2}$ representa el valor de velocidad de deformación para el cual la viscosidad aparente tiene caída a media su valor cortante cero. La ecuación predice el comportamiento de fluido Newtoniano en el límite de $\tau_{1/2} \rightarrow \infty$. Esta forma de la ecuación tiene ventajas que permite cálculos fáciles del perfil de velocidad de una distribución cortante conocida, pero la operación inversa resulta tediosa y pesada.

- Modelo de Bingham.

Esta es la ecuación más simple que describe el comportamiento del flujo de un líquido con una tensión de deformación y, en un esfuerzo cortante unidimensional constante, se escribe como sigue:

$$\tau_{yx} = \tau_0^B + \mu\beta(\gamma_{xy}) \quad \tau_{yx} > \tau_0^B \quad (1.7)$$

Por tanto

$$\gamma_{xy}=0 \qquad \tau_{yx} < \tau_0^B$$

Los dos parámetros del modelo O, B son de la curva. Las constantes independientes del fluido poseen una verdadera tensión de rendimiento

Modelo de Herschel-Bulkley.

$$\tau_{yx} = \tau_0^H + m(\gamma_{xy})^n \qquad (1.8)$$

Siendo

$$\tau_{yx} > \tau_0^H$$

Por tanto

$$\gamma_{xy} = 0$$

$$\tau_{yx} < \tau_0^H$$

Modelo de Casson.

$$(\tau_{xy})^{\frac{1}{2}} = \tau_0^c)^{\frac{1}{2}} + \mu_c \gamma_{xy})^{\frac{1}{2}} \qquad (1.9)$$

Porque $\tau_{xy} > \tau_0^c$

1.5. Principios generales del análisis de procesos mediante la simulación

La combinación de la computadora y los software profesionales conforman la simulación digital, que es una herramienta capaz de solucionar sistemas compuestos por numerosas variables, ecuaciones y parámetros de equipos. Actualmente se han obtenido experiencias útiles en la aplicación de estas técnicas con programas tales como: Ansys, Cosmos DesignStar y Matlab. La simulación presupone el conocimiento del comportamiento de los elementos del sistema y se utiliza cuando no es posible, o al menos no es económico, estudiar el sistema real directamente.

Simulación: es el estudio de un sistema mediante un modelo. Si se refiere a un modelo

matemático en general, es el estudio de un sistema, o parte de dicho sistema, mediante el trabajo del modelo matemático o del modelo físico.

Modelo matemático: es una representación simplificada de los aspectos del proceso real que está siendo investigado en términos de ecuaciones matemáticas u otras formulaciones de esta naturaleza que permiten llegar a resultados cuantitativos precisos.

Para construir un modelo matemático que represente el proceso bajo estudio se hace uso de los principios físicos y químicos así como de otras relaciones no fundamentales basadas en la experimentación para obtener las ecuaciones que constituyen el modelo. Estas ecuaciones son luego trabajadas para predecir qué efecto se logrará sobre el proceso al tomar los valores deseados en las variables de interés.

Para obtener el modelo matemático que represente el proceso que está siendo investigado es necesario seguir una trayectoria bien definida y desglosada en diferentes pasos adecuadamente ordenados los cuales constituyan un enfoque lógico y consistente. El tipo de estructura matemática se utilizará acorde al nivel de detalles del proceso que se representa, y debe ser el resultado de un compromiso entre la complejidad que tenga dicha descripción matemática al abarcar numerosos detalles del proceso y la simplicidad matemática requerida para un fácil y adecuado trabajo del modelo en su aplicación.

1.5.1. Antecedentes históricos del método de elementos finitos

El desarrollo y éxito del método de Elementos Finitos se expande con el creciente desempeño de las computadoras digitales. En la antigüedad ya se habían empleado los “Elementos Finitos” para determinar un valor aproximado de π . Arquímedes usó ideas similares para determinar el área de figuras planas. Este hecho dio una premisa para el desarrollo del cálculo integral por Newton y Leibniz dos mil años después. Walter Ritz (1878–1909), físico suizo fue el primero en formalizar el método de Elementos Finitos. Él propuso que las frecuencias de las líneas espectrales de los átomos podían ser expresadas por diferencias entre un relativamente pequeño número



de “elementos”. Ritz desarrolló la formulación matemática del método de Elementos Finitos, con base en el cálculo variacional. El método de Ritz es también conocido como variacional o formulación clásica. La incorporación del cálculo matricial al método de Elementos Finitos fue propuesta por el ingeniero ruso Boris G. Galerkin (1871-1945). Galerkin publicó sus primeros trabajos en base al método clásico durante su prisión en 1906 por orden del zar en la Rusia prerrevolucionaria. En muchos textos rusos el método de Elementos Finitos de Galerkin se conoce como método de Bubnov-Galerkin. Él publicó un trabajo usando esta idea en 1915. El método también fue atribuido a Bubnov en 1913. La aplicabilidad del método de Elementos Finitos fue detenida por lo extenso de los cálculos necesarios para resolver un sistema de un considerable número de elementos finitos. El desarrollo de los ordenadores digitales durante la década de 1950, permitió la aplicación del método de elementos finitos a la solución de ecuaciones diferenciales.

1.6. Conclusiones del capítulo 1

- 1 Las fuentes bibliográficas abordan lo relacionado con el sistema de bombeo y el comportamiento de los fluidos a transportar pero en ninguna de ellas se efectúa la simulación del fluido en el interior de la bomba que envía la pulpa laterítica de la planta espesadores a la planta de lixiviación de la empresa PSA.
- 2 Se exponen fundamentos teóricos referidos a la simulación y al fenómeno de transporte de fluidos que sirven de base al análisis, explicación y proyección de la simulación del transporte de fluido para la instalación objeto de estudio.



CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Para lograr el establecimiento y la aplicabilidad de un procedimiento general, no solo basta con la elección del material y su valoración física, química y estructural. También se requiere tener en cuenta las teorías de la toma de decisiones y el flujo de información asociado a los cálculos ingenieriles teniendo como premisa los criterios tecnológicos. Como toda investigación científica este capítulo está avalado por ecuaciones que demuestren la veracidad del trabajo. Al mismo tiempo se fundamentan las propiedades a investigar y se establecen los parámetros que caracterizan la simulación del proceso teniendo en cuenta el material seleccionado para el trabajo.

Este capítulo tiene como objetivo establecer métodos y procedimientos de cálculo para predecir el comportamiento de la pulpa laterítica objeto de estudio, por el interior de la tubería.

2.2. Características técnicas del sistema de bombeo de la planta

Operación de llenado de un espesador

Para el llenado de un espesador es necesario lograr una alimentación fija y estable, esto estará en correspondencia con las capacidades de producción de las plantas de preparación de pulpa y lixiviación.

El tiempo de duración estará entre 10 y 15 días, debido a la formación de la cama y el perfil del tanque, éste perfil debe tener la siguiente formación (valores óptimos), lo cual se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Altura en función de la concentración de sólido en volumen (Manual de operaciones, 2014).

Altura(m)	% de sólido
0	47 – 48 %
2,164	45 – 46 %
3,200	43 – 45 %
3,505	42 – 43 %
5,029	36 – 38 %
6,550	31 – 33 %

Operación de vaciado de un espesador

Para esta operación planta de pulpa debe ajustar capacidad según el inventario de mineral en los Espesadores que quedan en operación y la capacidad de lixiviación.

Etapas de vaciado:

- Se mantiene en operación el mecanismo.
- Se le corta la alimentación al espesador.
- Se alimenta directo a lixiviación del espesador que se va a vaciar hasta que el sólido en el cono esté por debajo de 43 %.
- Cuando el sólido baje de 43 % se comienza la transferencia hacia los Espesadores en operación.
- La transferencia se mantendrá hasta que el espesador quede vacío. En estas condiciones se detiene el mecanismo en la posición deseada



2.2.1. Característica del conjunto motor - bomba

La característica del conjunto motor - bomba del sistema de distribución de la pulpa a la planta se muestra en la tabla 2.1

Tabla 2.1. Datos de la bomba(Manual de operaciones, 2014)..

Bomba centrífuga warman			
	Parámetro	Valor	Unidad de medida
Caudal nominal	Q	456	m ³ /hr
Potencia nominal	N	95,1	kW
Rendimiento	η	54,9	%
Revoluciones	n	903	rev/min
altura	H	19,2	m
Corriente	i	12,5	A
Voltaje.	E	480	V
Diámetro de succión	D _s	0,254	m
Diámetro de descarga	D _d	0,203	m
Caída de presión	ΔP	0,79	Pa

2.3. Propiedades de la pulpa

Según R. Ramos (2015) es un fluido no newtoniano, plástico real y las propiedades de la pulpa son las que se muestran en la tabla 2.3

Tabla 2.3. Propiedades de la pulpa (R. Ramos, 2015).

	Parámetro	Valor	Unidad de medida
Coeficiente de viscosidad dinámico, 35 %	μ	0,094	Pa*s
Coeficiente de viscosidad dinámico, 40 %	μ	0,15	Pa*s
Coeficiente de viscosidad dinámico, 45 %	μ	0,61	Pa*s
Densidad del sólido	$\rho_{\text{sólido}}$	3 585	kg/m ³
Diámetro de la partícula	$D_{\text{partícula}}$	0,007	mm
Densidad de la mezcla 35 %	ρ_{mezcla}	1 343	kg/m ³
Densidad de la mezcla 40 %	ρ_{mezcla}	1 400	kg/m ³
Densidad de la mezcla 45 %	ρ_{mezcla}	1 483	kg/m ³

La simulación con el empleo del método de elementos finitos se realizó sobre la base de considerar el comportamiento reológico de la pulpa como plástico ideal, para lo cual fue necesario determinar el esfuerzo de corte y la viscosidad plástica. En la tabla 2.4 se muestra el resultado de las mediciones realizadas por R. Ramos (2015) para la caracterización reológica de la pulpa objeto de estudio, con un 45 % de sólido.

Tabla 2.4. Gradiente de velocidad en función del esfuerzo cortante.

Ds(S-1)	$\tau(\text{Pa})$
0,00	175,714
200,00	250,00
300,00	300,00
500,00	370,00

2.4. Procedimiento de cálculo del software

El software Ansys emplea un conjunto de ecuaciones diferenciales que le permiten determinar los parámetros de flujo en cada nodo o elemento generado en la geometría analizada. A continuación se describen las principales ecuaciones.

Ecuación de conservación de masa

La ecuación para la conservación de masa, o ecuación de continuidad, puede escribirse como sigue:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad 2.1$$

S_m - es la masa agregada a la fase continua

Pv- variación de presión y velocidad

∇ -gradiente de velocidad

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$ - Derivada parcial de la presión en función del tiempo.

Para geometrías 2D simétricas, la ecuación de continuidad se da por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad 2.2$$



Donde:

x: es la coordenada axial

r: es la coordenada radial

v_x : es la velocidad axial

v_r : es la velocidad radial

Las ecuaciones de conservación de velocidad adquirida

La conservación de velocidad adquirida es inercial (no acelerado) el marco de la referencia se describe por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad 2.3$$

Donde:

p: es la presión estática-Pa

T: es el tensor de tensión-Pa

ρg y F : son la fuerza gravitatoria y las fuerzas externas (del cuerpo)

El tensor de tensión se da por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[\left(\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{v} I \right] \quad 2.4$$

Donde:

μ : es la viscosidad molecular-Pa*s

I: es el tensor de la unidad-m

Para geometrías simétricas en 2D, las ecuaciones de conservación de velocidad adquirida axiales y radiales se dan por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = & -\frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad 2.5$$

y

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = & -\frac{\partial p}{\partial r} \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ & - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2 \mu}{3 r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_r^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad 2.6$$

La información en esta sección es organizada en lo siguiente subdivisiones:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad 2.7$$

Donde:

v_r es la velocidad radial-m/s

r es la coordenada radial-m

Flujo monofásico

Para un escalar arbitrario, θ_k ANSYS resuelve la ecuación

$$\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_k} \quad k=1, \dots, N \quad 2.8$$



Donde:

I_k y S_{0k} es el coeficiente de difusión y término de la fuente que se proporcionó para cada uno de las ecuaciones del escalar.

I_k está definido como un tensor-Pa

$\nabla \cdot (\Gamma_k \phi_k)$
el término de difusión -adimensional

Flujo multifase

Para los flujos multifases, ANSYS resuelve las ecuaciones de transporte para dos tipos de escalares: por la fase y mezcla. Para un arbitrario k

$$\frac{\partial \alpha_l \rho_l \phi_l^k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \bar{u}_l \phi_l^k - \alpha_l \Gamma_l^k \nabla \phi_l^k) = S_l^k \quad k=1, \dots, N$$

2.9

Donde:

α_l, ρ_l y $\bar{u}_l$ es el fragmento de volumen, densidad física, y velocidad de fase-l, respectivamente

ϕ_l^k
Sólo es asociado con una fase (fase-1) y es considerado un campo individual inconstante de fase-1

Los flujos periódicos

Se asume que el flujo de masa definido por el usuario es

$$F = \int_S \rho \bar{u} \cdot d\bar{S}$$

2.10

Donde:

dS es el área de vector de cara. m^2

El flujo de masa para fase-1 está definido como

$$F_l = \int_S \alpha_l \rho_l \bar{u}_l \cdot d\bar{S} \quad 2.11$$

Donde:

U_l -velocidad de fase-l-m/s

dS - es el área de vector de cara-.m²

α_l -fragmento de volumen

ρ_l -densidad física

La ecuación de fragmento de volumen

El interface(s) entre las fases es cumplido por la solución de una ecuación de continuidad de fragmento de volumen de uno (o más) de las fases. tiene la ecuación siguiente:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad 2.12$$

Donde:

m_{qp} -es el traslado de masa de la fase escalonar de q y p

m_{pq} -es el traslado de masa de la fase escalonar p y q

S_{α_q} -es el cero, puede especificar una constante o la fuente de masa definida por el usuario para cada fase.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad 2.13$$

La ecuación de fragmento de volumen puede resolverse a través del discretización de tiempo implícito o explícito.

En el acercamiento explícito, el ANSYS aplica los esquemas de interpolación finito- de

diferentes fluentes, teniendo en cuenta valores de fragmento de volumen que se computaron al paso de tiempo anterior.

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f \left(\rho_q U_f^n \alpha_q^n \right) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha_q} \right] V \quad 2.14$$

Donde:

n+1-índice nuevo (actual) el paso de tiempo-adimensional

n -índice para el paso de tiempo anterior -adimensional

α_{qf} - el valor nominal del fragmento de volumen-adimensional

q^{th} -del segundo-orden, HRIC rápido, modificado-adimensional

V-el volumen de célula -m³

U_f - el flujo de volumen a través de la cara, basado en la velocidad normal

Esta formulación no requiere solución reiterativa de la ecuación de transporte durante cada paso de tiempo, como se necesita para el esquema implícito.

Importante: Cuando se usa el esquema explícito, se debe emplear una solución transitoria (dependiente del tiempo).

Ecuación de energía

La ecuación de energía, también compartida entre las fases, se muestra debajo

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad 2.15$$

E- la energía de los obsequios -J

T -temperatura: K

k_{eff} - la conductibilidad termal eficaz kg/Km⁴

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q}$$

2.16

Donde:

E_q - para cada fase es basado en el calor específico de esa fase ya la temperatura

k_{eff} - (la conductibilidad termal eficaz)

sh- término de la fuente que contiene la radiación, así como otra fuente de calor volumétrica.

Modelo de tensión de superficie continuo

El método de Tensión de Superficie Continuo (CSS) es una manera alternativa para modelar tensión superficial de una manera conservativa, a diferencia de la formulación no conservativa del método de Fuerza de Superficie Continua (CSF). CSS evita el cálculo explícito de curvatura, y podría representarse como una variante anisotrópica de modelación de las fuerzas capilares basada en las tensiones de superficie.

En el método de CSS, el tensor de tensión de superficie se representa como

$$T = \sigma \left(I - \hat{n} \otimes \hat{n} \right) |\vec{n}|$$

2.17

Donde,

I-el tensor de la unidad m

σ - el coeficiente de tensión de superficie Pa

$\otimes$ - el producto del tensor de dos vectores: el normal original y el normal transformado

α - el fragmento de volumen-adimensional

n- la pendiente de fragmento de volumen- adimensional

Las propiedades de los materiales

Las propiedades que aparecen en las ecuaciones de transporte son determinadas por

la presencia del componente que escalona en cada volumen del mando. En un sistema bifásico, por ejemplo, si las fases se representan por los subíndices 1 y 2, y si el fragmento de volumen del segundo de éstos está rastreándose, la densidad en cada célula se da por

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad 2.18$$

Donde:

ρ - densidad kg/m^3

α_2 -angulo entre fase- adimensional

ρ_1 y ρ_2 son representaciones de la densidad con los subíndices de volumen

En general el sistema de fase, la densidad, el volumen de fragmento, esta-promediada el siguiente formulario,:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad 2.19$$

La ecuación de velocidad adquirida

Una sola ecuación de velocidad adquirida se resuelve a lo largo del dominio, y el campo de velocidad resultante es compartido entre las fases. La ecuación de velocidad adquirida, mostrada debajo, es dependiente del volumen fraccionado en toda la fase a través de las propiedades

La fuerza de superficie de continuo (CSF) modelo propuesto por el Brackbill et al. se ha llevado a cabo tal que la suma de tensión de la superficie al cálculo de VOF resulta en un término de la fuente en la ecuación de velocidad adquirida. Para entender el origen del término de la fuente, considere el juicio incidental dónde la tensión de la superficie es constante a lo largo de la superficie, y donde sólo las fuerzas normales a la interfaz son consideradas. Puede mostrarse que la gota de presión por la superficie depende en el coeficiente de tensión de superficie, y la curvatura de la superficie como medido por

dos radios en las direcciones ortogonales

$$P_2 - P_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad 2.20$$

Donde:

P1 y P2 son presiones en los dos fluidos en cualquier lateral de la interfaz.-Pa

σ -esfuerzo de corte (Pa)

En ANSYS Fluent, hace una formulación del modelo de CSF, donde se puede decir

la curvatura de la superficie se computa a través de pendientes locales en la superficie normal a la interfaz. Permitiendo que la superficie normal este definido como la pendiente de fragmento de volumen en la fase.

$$n = \nabla \alpha_q \quad 2.21$$

Donde:

Estos términos han sido argumentados

La curvatura, κ , está definido en términos de la divergencia de la unidad normal.

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{n} \quad 2.22$$

Donde:

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|}$$

La tensión de la superficie puede escribirse mediante el salto de presión por la superficie puede expresarse la fuerza a la superficie como una fuerza de volumen que usa el teorema de divergencia. Es esta fuerza de volumen el término de la fuente que se agrega a la ecuación de velocidad adquirida. Tiene lo siguiente

$$F_{vol} = \sum_{pairs\ i,j, i < j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i \kappa_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad 2.23$$

Esta expresión permite una superposición lisa de fuerzas cerca de células dónde más de dos fases están presentes. Si sólo dos fases están presentes en una célula, entonces

$$F_{vol} = \sigma_{ij} \frac{\rho \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad 2.24$$

Es la densidad y el volumen-promediados por el computó usados en la ecuación. La superficie de tensión de la fuente es el término para una célula siendo proporcional a la media densidad en la célula.

El método de CSS proporciona ventajas por encima del método de CSF, sobre todo para casos que involucren la tensión de la superficie inconstante. Los métodos CSS y CSF introducen las corrientes parásitas a la interfaz debido al desequilibrio de la pendiente de presión y fuerza de tensión de superficie.

En el método de (CSF), es la fuerza de tensión de superficie y se representa de la manera siguiente:

$$F_{CSF} = \sigma k \nabla \alpha \quad 2.25$$

Donde:

K-es un factor de fricción

2.5. Simulación con el método de elemento finito

Condiciones de fronteras

Tan importantes como las ecuaciones de gobierno son las condiciones de contorno y las condiciones iniciales. En casi toda la literatura especializada en técnicas numéricas se concede gran importancia a las discusiones sobre las posibles condiciones de



contorno e iniciales

Las condiciones de contorno pueden ser de varios tipos. Los más comunes en la práctica son:

Condiciones de contorno tipo Dirichlet: La variable dependiente es conocida en la frontera física del problema.

- Condiciones de contorno tipo Neumann: Se conoce en la frontera física del problema el valor del gradiente normal de la variable dependiente.
- Condiciones de contorno tipo Robin: La condición conocida constituye una combinación lineal de los tipos anteriores.
- Condiciones de contorno mixtas. En unas zonas de la frontera física se tienen condiciones de contorno Dirichlet y en otras zonas condiciones del tipo Neumann.
- La correcta definición de las condiciones de contorno constituye una parte fundamental en la definición de un problema numérico.

Mallado del modelo

La resolución de cualquier problema, ya sea mecánico o de cualquier otro tipo, mediante el método de los elementos finitos requiere definir previamente el mallado de elementos (i.e. discretizar el problema). El modelado mediante elementos finitos (FEM) involucra, además, la elección del tipo de elementos (i.e. las funciones de forma), del modelo constitutivo correspondiente a cada elemento y del tipo de algoritmo numérico (solver) que se utilizará para resolver el sistema de ecuaciones.

Para la simulación se utilizaron los siguientes pasos:

1. Elaboración del modelo geométrico del impelente auxiliándose del componente Blade Gen.
2. Generación de las mallas empleando el componente TurboGrid.
3. Aplicación de las condiciones de frontera y cargas del modelo con el componente CFX Pre.
4. Ejecución de la solución y obtención de los resultados empleando el componente CFX Solver.
5. Análisis de los resultados empleando el componente CFX Post.

2.6. Ajuste de curva por regresión

El ajuste de curva por regresión se basó en el método de mínimo cuadrado, el cual se basa en el ajuste de una curva al conjunto de puntos ordenados, tal que se logra minimizar la distancia existente entre los puntos definidos por la recta ajustada y los puntos correspondientes. El método de mínimo cuadrado se expresa por un sistema de ecuaciones normales (Miller *et al.* 2005).

$$\sum_{i=1}^n Y_i = a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad 2.27$$

$$\sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i = a \cdot \sum_{i=1}^n X_i + b \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad 2.28$$

Donde:

X_i -es la variable que adquiere los valores de la axisa.

Y_i -es la variable que adquiere los valores de ordenada.

En este conjunto de ecuaciones lineales a y b son las incógnitas, y dan los valores de la a y b para la línea con el mejor ajuste a un conjunto de datos apareados de acuerdo con el criterio de mínimos cuadrados.

Este sistema de ecuaciones tiene como solución las siguientes expresiones para el cálculo de a y b.

$$a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X} \quad 2.29$$

Donde:

$\bar{Y}$ -es el promedio aritmético de las observaciones referidas a la ordenada.

$$b = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad 2.30$$

Notaciones especiales

$$S_{XX} = \sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}]^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{[\sum_{i=1}^n X_i]^2}{n} \quad 2.31$$

$$S_{XY} = \sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}] \cdot [Y_i - \bar{Y}] = \sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i - \frac{[\sum_{i=1}^n X_i] \cdot [\sum_{i=1}^n Y_i]}{n} \quad 2.32$$

La bondad del ajuste realizado con el método de mínimo cuadrado se verificó utilizando tres criterios: el criterio de Student, el de Fischer y el del coeficiente de correlación. Se consideró que el ajuste es significativo: según el criterio de Student, cuando se cumple que p-valor es inferior al nivel de significancia adoptado en la prueba; según el criterio de Fisher, cuando el Fisher de cálculo es mayor que el Fisher critico o tabulado y según el criterio del coeficiente de correlación, cuando el valor de este está próximo a 1 ó -1.

En el Software Excel se encontró la herramienta para análisis de datos que contiene programado la opción regresión. La instrucción regresión permitió realizar el ajuste de curva con el método de mínimo cuadrado y chequear los tres criterios de bondad del ajuste.

2.7. Determinación del error relativo

Esto se aplica para comparar los valores de los parámetros de la simulación con los que posee la instalación objeto de estudio, se expresa como la diferencia porcentual entre el valor obtenido y el “valor correcto” (Hernández, 1986).

El error relativo puntual se calculó a través de la siguiente expresión, la cual fue tomada de Hernández (1986).

$$E_{rel} = \left| \frac{X_1 - X_2}{X_2} \right| \cdot 100\% \quad 2.33$$

Dónde:

X_1 - es el valor obtenido.

X_2 - es el valor correcto.

E_{rel} - es el error relativo puntual, %.

2.8. Determinación de los costos

Son característicos en la formulación del problema de racionalización del transporte de fluidos, el costo atribuible a las tuberías (costos fijos) y el costo energético en cuanto a costos de explotación (costos variables) (Aguirre et al., 1996; Martínez et al., 2007; Echavarría, 2009). El costo de bombeo en que se incurre al transportar el fluido se expresa mediante la siguiente ecuación (Laurencio 2010):

$$c_{bom} = \frac{t_{el} \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \cdot N_h \cdot 10^{-3} \quad 2.34$$

Donde:

C_{bom} - costo de bombeo de la instalación; (CUC/año).

N_h - potencia hidráulica;(W).

t_{el} - tarifa eléctrica; (CUC/ KW·h).

t_t - tiempo de trabajo del equipo; (h/año).

η_b - rendimiento de la bomba; (adimensional).

η_m - rendimiento del motor eléctrico; (adimensional).

Para el análisis del impacto económico del proceso de simulación se precedió a la comparación entre los valores del costo de bombeo, considerando la potencia hidráulica que se demanda actualmente en la instalación y la potencia hidráulica que se predice por medio de la simulación. La potencia hidráulica referidas anteriormente se determinan a través de las siguientes expresiones de cálculo.



$$N_{h1} = \Delta P_1 \cdot Q \quad (2.35)$$

$$N_{h2} = \Delta P_2 \cdot Q \quad (2.36)$$

Donde:

N_{h1} - Potencia hidráulica de la bomba instalada, W.

N_{h2} - Potencia hidráulica de la simulación, W.

ΔP_1 - variación de la presión en la bomba instalada, Pa

ΔP_2 - Variación de la presión en la simulación, Pa

Q- Gasto, m³/s

2.9. Conclusión del capítulo 2

- 1) Se efectuó una caracterización de los materiales y procedimientos a emplear para la simulación del transporte de la pulpa laterita objeto de estudio, definiendo los parámetros fundamentales de cada componente de la instalación, de la pulpa, así como los fundamentos de la simulación con el empleo del software ANSYS 15.0.
- 2) Se expone los fundamentos a tener en cuenta para la validación de los resultados que se obtienen cuando se lleva a cabo la simulación, lo cual se basa en la comparación de los resultados de la simulación con los resultados que se obtienen en la fábrica mediante controles.
- 3) Se define las expresiones de cálculo para efectuar el estimado de la implicación económica de la simulación del proceso de transporte de la pulpa laterita objeto de estudio.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados del estudio realizado y a partir del mismo las expresiones matemáticas que describen las regularidades del comportamiento del trasiego de pulpa laterita a través del impelente. También se relacionan los impactos económicos y ambientales.

En tal sentido el objetivo de este capítulo es realizar el análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación, la valoración económica y el impacto ambiental que tiene el proceso de transporte de fluido.

3.2. Resultados de la caracterización reológica de la pulpa como plástico ideal

En la tabla 3.1 se muestran los resultados del ajuste de la relación entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad para la pulpa objeto de estudio a un modelo plástico ideal. Estos se obtienen al aplicar las expresiones 2.27 a la 2.33 a los valores contenidos en la tabla 2.4.

Tabla 3.1. Datos que se utilizaron en la simulación.

Modelo plástico ideal	Parámetros	Criterio de idoneidad
$\tau = 175,71 + 0,39 \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right)$	$\tau_0 = 175,71 \cdot Pa$ $\mu_p = 0,39 \cdot Pa \cdot s$	$R^2 = 0,997$ $F_{cál.} = 624,21 \cdot 10^{-4}$ $F_{crít.} = 1,60 \cdot 10^{-3}$ $P. = 7,60 \cdot 10^{-4}$ $P2 = 1,60 \cdot 10^{-3}$

Del resultado mostrado en la tabla anterior se infiere que la curva de flujo para la pulpa objeto de estudio puede ser representada significativamente por un modelo plástico ideal, puesto que el coeficiente de determinación indica que el 99,7 por ciento de las variaciones del esfuerzo de corte se explica por medio de la variaciones del gradiente velocidad; el criterio de Fisher refiere que el modelo sigue la tendencia de los datos

obtenidos ya que el Fisher calculado es mayor que el Fisher crítico, y la probabilidad para ambos coeficiente es menor que el nivel significancia adoptado (0,05).

Utilizando el software Excel se obtiene la Gráfica 3.1, que permite visualizar el comportamiento del esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad.

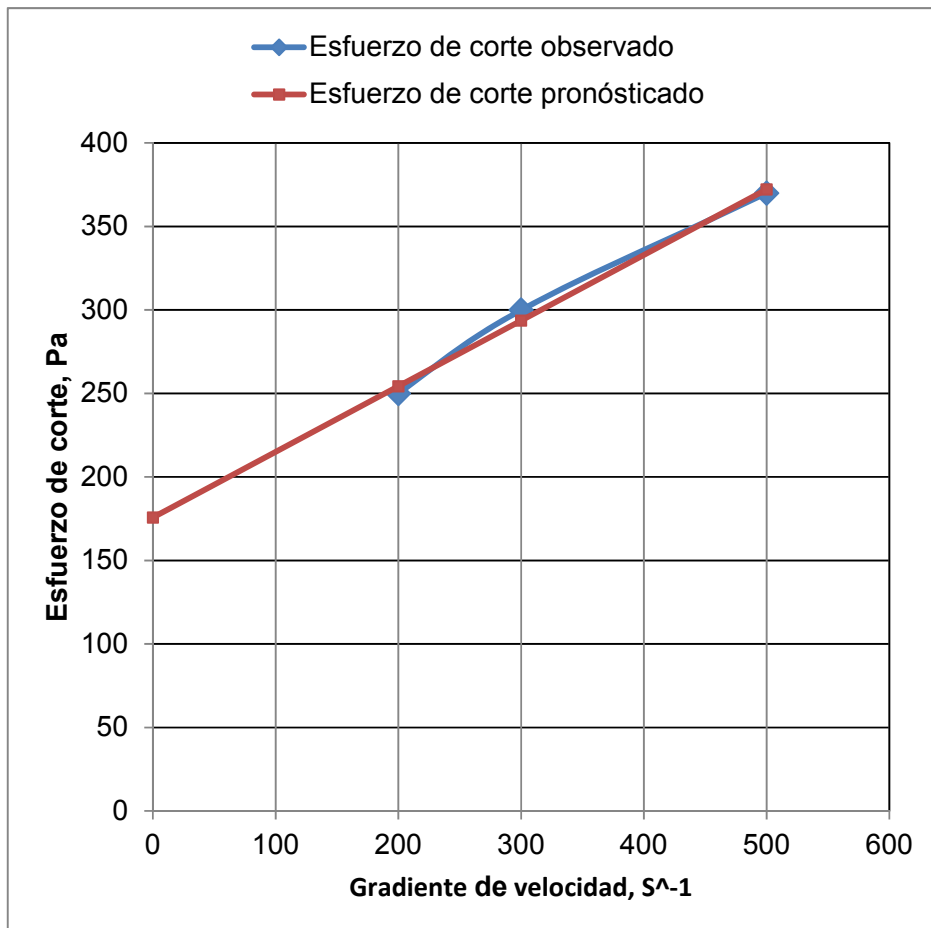


Figura 3.1. Curva de flujo de la pulpa.

3.3. Resultados fundamentales obtenidos mediante la simulación

La Figura 3.2 representa el modelo geométrico del impelente de la bomba que trasiega la pulpa desde la planta de espesadores de mineral hasta la de lixiviación en la empresa Pedro Sotro Alba. Este presenta un diámetro de succión y descarga 0,254 y 0,203 m respectivamente y cinco álabes.

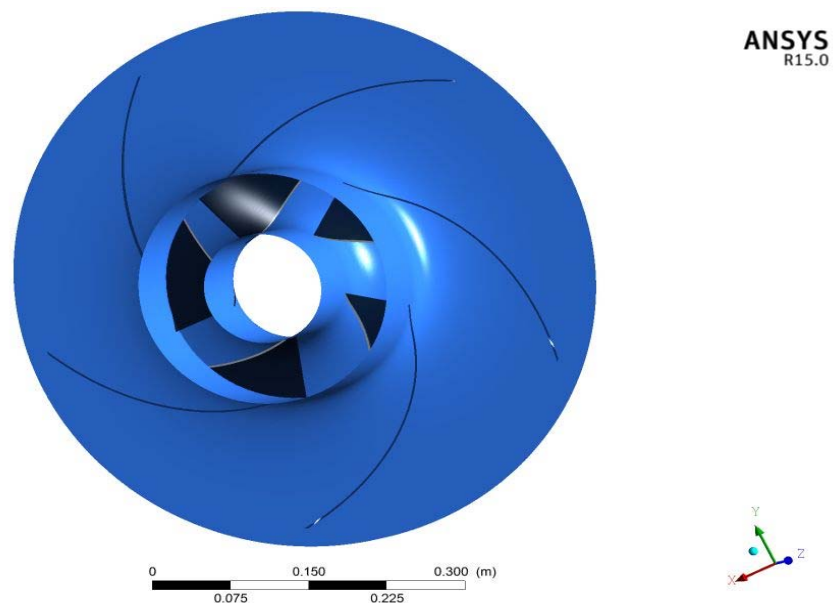


Figura 3.2. Modelo geométrico en 3D de la instalación.

La Figura 3.3 representa el enmallado de uno de los álabes. Se utiliza un mallado tipo H-GRID, donde la mayoría de las mallas son ortogonales. Se generaron un total de 108031 nodos y 98164 elementos.

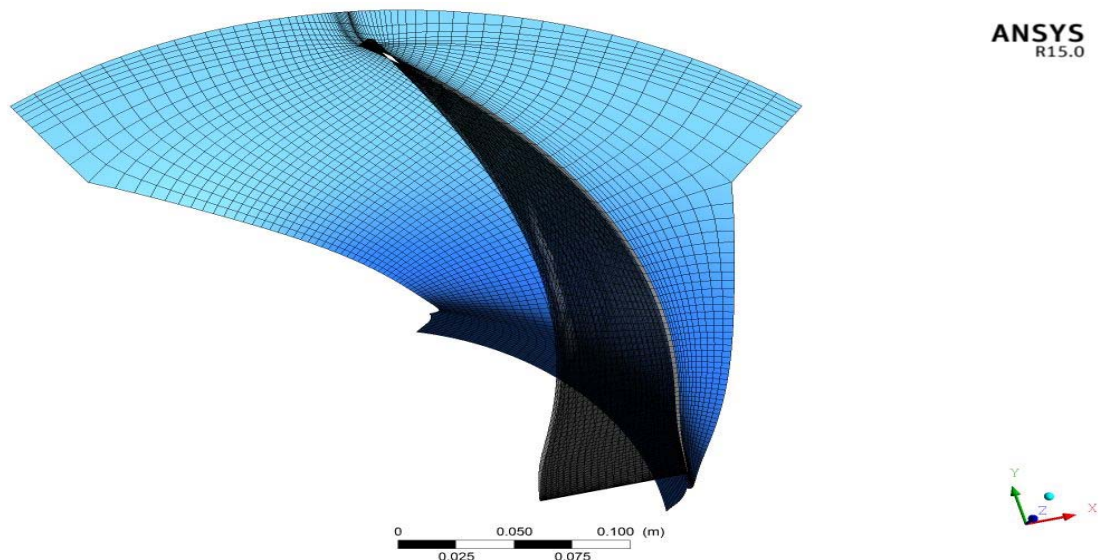


Figura 3.3. Mallado de un álabe del impelente.

Solución e Interpretación de los resultados

La Figura 3.4 representa, en tres dimensiones, la variación de velocidad obtenidos mediante la simulación de los álabes de la bomba objeto de estudio, donde se aprecia la tendencia de la distribución de la velocidad de forma descendente, desde el exterior del impelente hacia el interior o centro en la parte delantera de los álabes de la bomba que está ubicada en la planta Espesadores de pulpa de la empresa Pedro Soto Alba, donde se experimenta una variación de velocidad en el rango de 15,7 a 63,15 m/s.

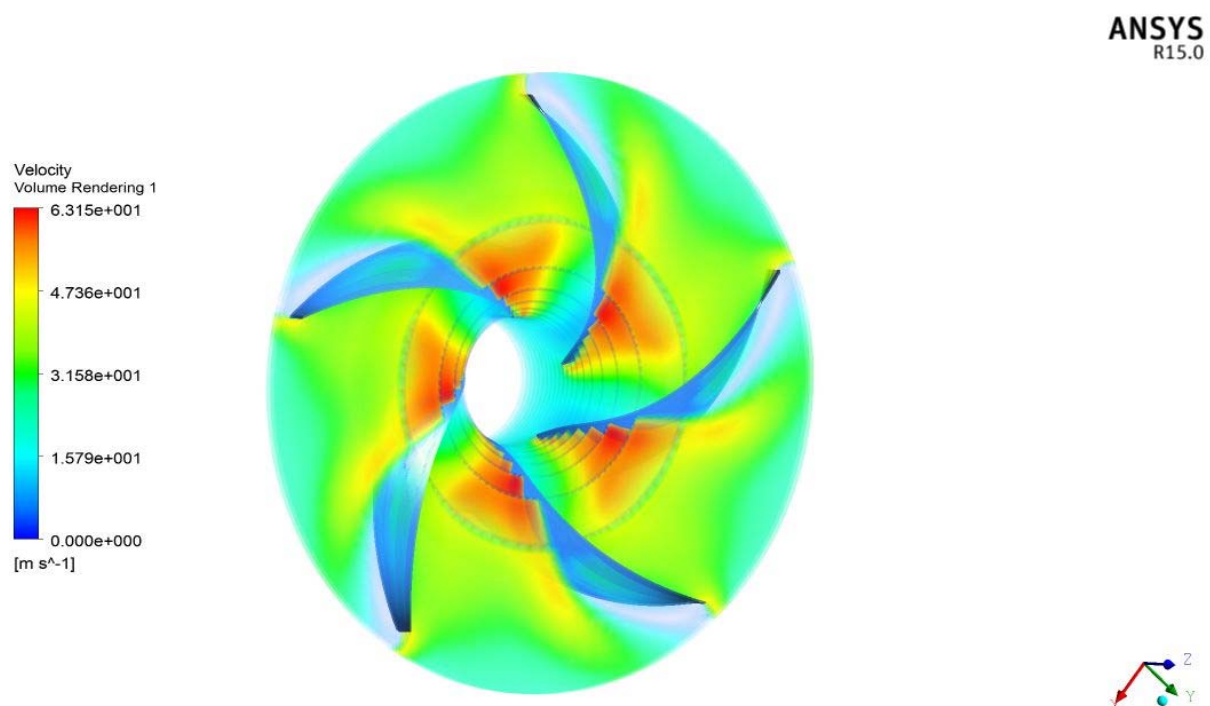


Figura 3.4. Velocidad del fluido en el interior de la bomba.

La Figura 3.5 representa, en tres dimensiones, la variación de presión en el interior de la bomba objeto de estudio, donde se aprecia la tendencia de la distribución de la presión de forma descendente desde la zona de succión hacia la punta de los álabes de. Se experimenta una variación de presión que puede llegar hasta 0,77 MPa, la obtenida mediante mediciones es de 0,79 MPa (Manual operaciones, 2014), obteniendo un margen de error de 2,5 % con arreglo a la ecuación 2.33, demostrándose la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante la simulación por el método de

elementos finitos e indicando que se predice un valor de la diferencia de presión inferior al real.

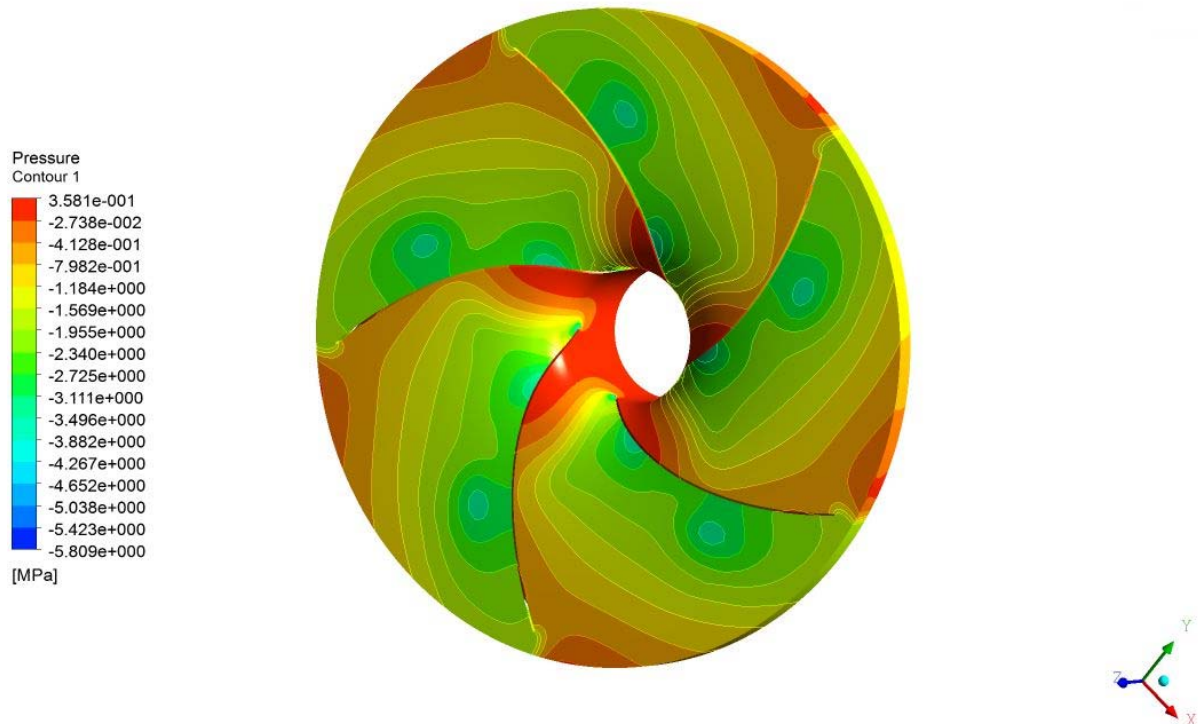


Figura 3.5. Representa la presión en los álabes de la bomba.

3.4. Ventajas y desventajas de la aplicación del método de Elementos Finitos

Según Betancourt (2012) el método de Elementos Finitos permite a los ingenieros obtener información de objetos de formas complicadas bajo casi cualquier carga imaginable (cargas puntuales, de presión, velocidades, entre otras,

Permite resolver problemas en estado estacionario o dependientes del tiempo, lineales o no lineales: Se pueden manejar materiales especiales: no homogéneos ortotrópicos, anisotrópicos. Se pueden además considerar efectos especiales sobre los materiales: plasticidad, propiedades dependientes de la temperatura.

A nivel empresarial las ventajas del método son notorias: la etapa de desarrollo de un producto se acorta, se pueden identificar problemas de diseño antes de fabricar un



producto, se reducen las etapas de prueba y error en el diseño de un nuevo producto, entre otras.

La principal limitación del método de Elementos Finitos radica en que la precisión de los resultados depende de la densidad de elementos utilizados. En análisis estructurales, cualquier región con alta concentración de esfuerzos debe ser cuidadosamente analizada mediante un enmallado suficientemente fino para obtener resultados confiables.

3.5. Valoración del impacto económico y medio ambiental

En este epígrafe determinamos el costo económico de la inversión que se realizó en la instalación, al cambiar las partes más afectadas del sistema y el gasto económico que se produce por concepto de la pérdida por avería del fuelle. Además como afecta al medio ambiente al producirse la rotura.

3.5.1 Cálculo económico

En la tabla 3.2 se muestran los resultados del cálculo efectuado para la valoración económica de la simulación. La determinación de los parámetros involucrados se efectúa aplicando desde la ecuación 2.35 a la 2.36.

Tabla 3.2. Resultados del cálculo económico.

Parámetros	Resultados	UM	Ec.
Potencia hidráulica de instalación	95,1	kW	2.35
Potencia hidráulica de simulación	92,4	kW	2.36.
Costo del bombeo hidráulico de instalación	4 842,6	(CUC/año)	2.34
Costo del bombeo hidráulico según simulación	4 705,1	(CUC/año)	2.34

Para obtener los resultados mostrados en la tabla anterior se define una tarifa eléctrica de 0,09 CUC/Kwh, un tiempo de trabajo para la bomba de 8 760 h/año, rendimiento del motor de 0,85, rendimiento de la bomba de 54,9 y una potencia de la bomba de 95,1 kW.

En la Figura 3.6. se ilustra los resultados del cálculo de los costos de bombeo, sobre la base de la información mostrada en la tabla 3.2. Se aprecia que el costo de bombeo correspondiente a la instalación es superior al que se predice sobre la base de la simulación.

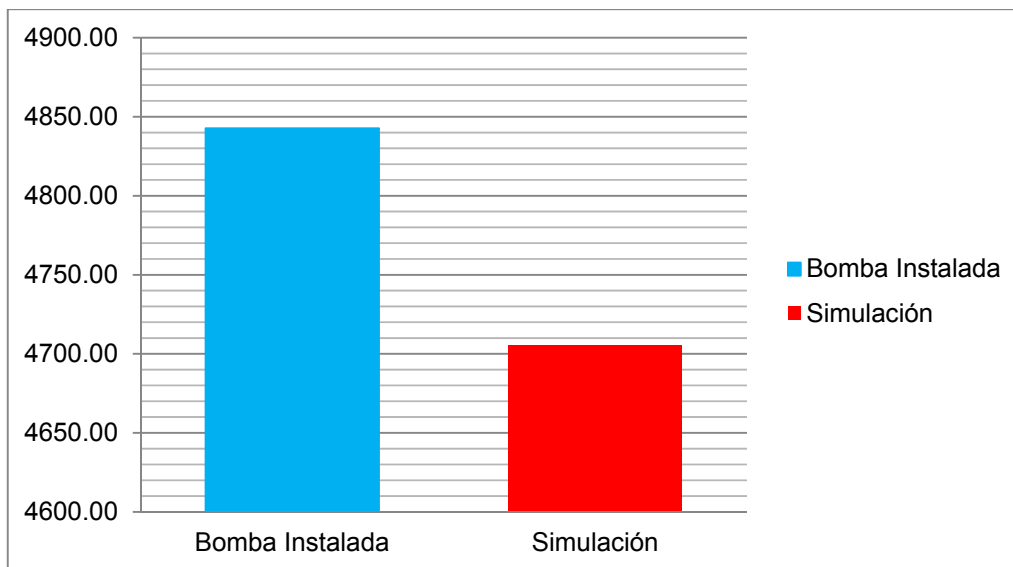


Figura 3.6. Comportamiento de los costos de bombeo.

La Figura 3.7 presenta el ahorro en el que se incurre por concepto de la implementación del resultado obtenido en la simulación. Esto indica que si en lugar de operar con una variación de presión de 0,7925 MPa en la bomba, se logra una variación de 0,77 MPa el costo de bombeo se reduciría en 137,49 (CUC/año)

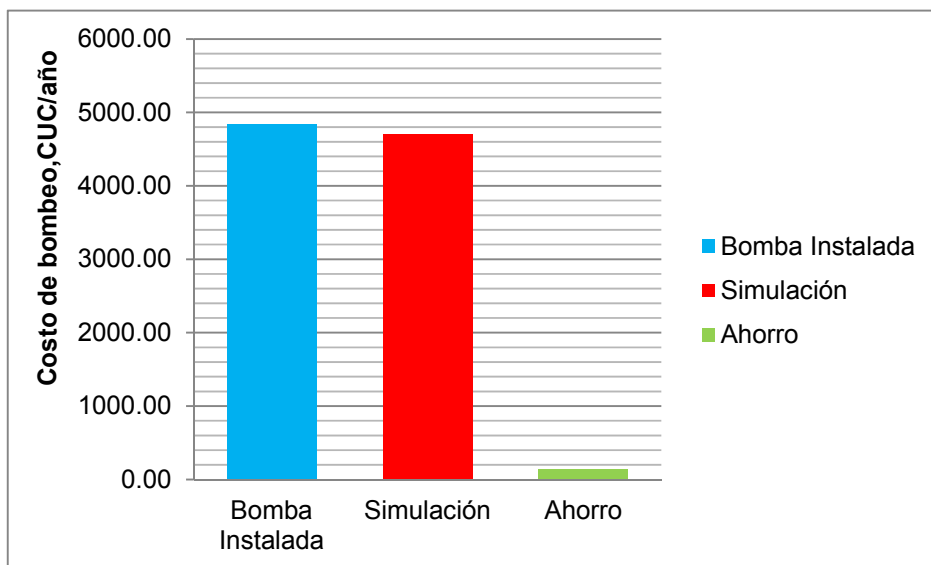


Figura 3.7. Ahorro en costo de bombeo.

Sobre la base de los resultados obtenidos se sugiere considerar las siguientes apreciaciones:

1. Realizar una evaluación integral del sentido de la variación observada en los costos de bombeo, para decidir si es factible la instalación de una nueva bomba.
2. Tener en cuenta en el proceso de simulación la afectación que produce en la variación de la presión y la velocidad el rendimiento mecánico, rendimiento volumétrico y rendimiento hidráulico.

3.5.2. Impacto ambiental

La protección del medio ambiente, es uno de los problemas científico - técnico más complejo que enfrenta la humanidad. El desarrollo vertiginoso de la industria en los últimos años, ha llevado a niveles sin precedentes la contaminación de la atmósfera producto a la expulsión de gases de efecto invernadero, el deterioro de la capa de ozono, las contaminación de las aguas de ríos, mares y subterráneos como consecuencia del mal manejo de los desechos tóxicos, unido a ellos, la pérdida de la biodiversidad en las áreas cuyo desarrollo industrial requiera del manejo de portadores energéticos altamente contaminantes como el petróleo.

Influencia del polvo en el medio ambiente

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues es en este medio donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentra el polvo industrial y ruido por solo citar algunos.

Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad; además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetro



comprendido entre 0,1 a 1 μm . Entre los efectos que pueden tener sobre los materiales están:

Abrasión: realizadas por aquellas partículas de mayor tamaño y dotadas de elevada velocidad (efecto de pequeña incidencia).

Ataque químico: puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente, tras el efecto de abrasión realizado por las partículas.

Los efectos que produce sobre la vegetación pueden considerarse como muy pequeños y prácticamente inexistentes. Solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas en grandes cantidades. Las partículas solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro notable para la salud.

Sin embargo cuando se habla del organismo humano, la situación se torna aún más preocupante, ya que lo afecta directamente en mayor o menor medida. Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por dos vía:

- Inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias.
- Absorción de polvos a través de la piel.

Las partículas entran al cuerpo humano a través del sistema respiratorio y el efecto que se produce depende de su tamaño, la composición química y mineralógica, densidad, superficie específica y otras.

Las partículas de tamaño superior a 5 μm de diámetro quedan retenidas en los bellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0,5 y 5 μm son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí a que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

La situación más preocupante corresponde las partículas menores de 0,5 μm , ya que se ha estimado que más del 50 % de las partículas de 0,01 a 0,1 μm que penetran en



los alvéolos se depositan allí, donde es difícil eliminarlos por carecer de cilios y mucosas, pudiendo permanecer durante meses e incluso durante años degradando la salud del hombre.

Influencia del ruido en el medio ambiente

Las emisiones continuas de ruido es uno de los impactos directos que afecta al hombre en su medio laboral. El origen del mismo es el funcionamiento continuo de equipos de grandes dimensiones, que como resultado de su operación emiten determinados niveles de ruido que alcanzan valores muy intensos en algunas zonas de la instalación.

La presencia del ruido es uno de los elementos que más afectan las condiciones de trabajo en el ambiente laboral incidiendo directamente sobre la salud física y mental de los trabajadores y tributa a la aparición de las enfermedades profesionales asociadas a este fenómeno fundamentalmente cuando no se cuenta con los medios de protección individuales.

La afectación directa de este impacto produce lesiones en el oído interno destruyendo las células ciliadas del órgano de corti, dando lugar a la hipoacusia neurosensorial pura de percepción, con la disminución de los niveles de audición tanto por vía ósea como aérea, la cual además es una lesión irreversible y progresiva dependiendo especialmente de la intensidad y el tiempo de exposición.

Estas afectaciones producen efectos indirecto y negativos como el incremento de la presión sanguínea, la aceleración del ritmo cardiaco, la contracción de los capilares de la piel, el incremento del metabolismo, la lentitud de la digestión, las afectaciones al sueño y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental fundamentalmente.

3.6. Conclusiones del capítulo 3

1. Se efectúa el ajuste de la curva de flujo de la pulpa objeto de estudio a un modelo reológico plástico ideal significativamente, puesto que el coeficiente de determinación indica que el 99,7 por ciento de las variaciones del esfuerzo de corte se explica por medio de la variaciones del gradiente velocidad; el Fisher calculado es mayor que el Fisher crítico, y la probabilidad para ambos coeficiente es menor que el nivel significancia adoptado (0,05).
2. Los resultados de la simulación con el empleo del método de elemento finito indican que se experimenta una variación de presión de 0,77 MPa, la que al compararse con la obtenida mediante mediciones, la cual es de 0,79 MPa (Manual operaciones, 2014), se obtiene un margen de error de solo 2,5 %, demostrándose la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante los cálculos.
3. La valoración económica de los resultados de simulación refiere que si en lugar de operar con una variación de presión de 0,7925 MPa en la bomba, se logra una variación de 0,77 MPa el costo de bombeo se reduciría en 137,49 CUC/año.



CONCLUSIONES GENERALES

1. Se determina sobre la base de las fuentes bibliográfica encontradas que varios autores abordan lo relacionado con el sistema de bombeo y el comportamiento de los fluidos a transportar pero ninguno de ellos efectúan la simulación del fluido en el interior de la bomba que transporta la pulpa laterítica de la planta espesadores a la planta de lixiviación de la empresa PSA.
2. La comparación entre los resultados de la simulación con el empleo del método de elementos finitos y los obtenidos mediante mediciones indica que se obtiene un margen de error de 2,5 %, lo que demuestra la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante los cálculos. La variación de la presión según simulación es de 0,77 MPa y la obtenida por mediciones es de 0,79 MPa.
3. Se determinó a partir del análisis económico que si en lugar de operar con una variación de presión de 0,792 5 MPa en la bomba, se logra una variación de 0,77 MPa el costo de bombeo se reduciría en 137,49 CUC/año.



RECOMENDACIONES

- Realizar una evaluación de la variación observada en los costos de bombeo, para decidir si es factible la instalación de una nueva bomba.
- Tener en cuenta en el proceso de simulación la afectación que produce en la variación de la presión y la velocidad asociado al rendimiento mecánico, rendimiento volumétrico y rendimiento hidráulico.
- Implementar el uso de variadores de velocidad para el logro de una mayor coordinación entre los parámetros de explotación de la bomba.
- Realizar una correcta selección de completamiento de compensadores que absorban en conjunto con los restantes todas las dilataciones que genera el sistema en estudio.
- Aplicar los requerimientos técnicos establecidos para los sistemas de transporte de la pulpa
- Mantener la utilización de los equipos que permiten la estabilidad de la presión que se requiere en este tipo de instalación para fluido viscoso.
- Crear un sistema efectivo de sincronización entre el tiempo de apagado de la bomba y el cierre de la válvula de descarga.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS CFX Solver theory Guide. ANSYS CFX Release 11, 2015

ANSYS TurboGrid User's Guide. ANSYS Turbo Grid Release 11.0, 2015 Quintana,

Bandala, M.:“Pérdidas por fricción en fluidos no newtonianos “Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.

Betancourt Análisis del comportamiento de proceso de secado mineral por el método de Elementos Finitos utilizando las herramientas del ansys12.1 Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 2012.

Bienvenido, J. “Modelo de un sistema de bomba, tanque y red”. Voluntad Hidráulica, No 28. (1973)

Darby R, Laminar and Turbulent Pipe Flows of Non Newtonian Fluids, in Flow Dynamics and Transport Phenomena.

Hernández, L. R. Calculo verificativo y propuesta de modificación para la ampliación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 2003.

Iakovlev, S.V y Dalkov Y.M., Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales. Moscú: Gosstroishdat, 1961. 232 p

Izquierdo P. R., Turro B. A., Nikolaev A., Hidrotransporte del mineral laterítico en régimen estructural. Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez, Revista Minería y Geología Vol. XVII I, No. 2, 2001, ISSN 0258 5979 pág. 53 59

Izquierdo, P.R. Estudio de la instalación de hidrotransporte a presión de la pulpa laterítica de la Empresa. Comandante Pedro Soto Alba. Revista Minería y Geología, 1989, (3): 16-22.

Izquierdo, P.R. Investigación de los parámetros y elaboración de los regímenes racionales del transporte hidráulico de lateritas utilizadas en las condiciones de la Empresa “Comandante Pedro Soto Alba”. Tesis de Doctorado. Leningrado, 1989.



- Jiménez. D.Y. calculo verificativo y propuesta de modificación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado desde el puerto hasta la planta de neutralización de la Empresa “Pedro Sotto Alba”. Tesis de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2005.
- Manual de operaciones de los espesadores de la empresa Pedro Sotto Alba. Moa. 2012
- Martínez y Barreto “Diseño de un Sistema contra Incendio para una Empresa productora de Cereales”. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Guayaquil, Ecuador. (2007)
- Martínez, L.; Monteagudo, J. y Jáuregui, S. “Mecánica de los Fluidos y Máquinas de Flujo”, Editorial Universo Sur, Universidad de Cienfuegos, Cuba. (2007)
- Martínez, R.R. Cálculo y proyección de las variantes alternativas de los esquemas del transporte de hidromezcla de alta densidad en el proceso carbonato amoniacal. Tesis de diploma. ISMM. 2004.
- Nekrasov, B. “Hidráulica”, editorial PAZ, Moscú. (1986)
- Pérez, R. “Equipos de bombeo” 3ra Edición, Tercera Reimpresión, editorial Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana. (2000)
- R. Conferencia Sobre la Industria Cubana del Níquel. II Seminario de Perfeccionamiento de Cuadros, ISMM, Octubre 1999.
- Suárez F.M. Determinación de los parámetros del hidrotransporte de las pulpas del mineral serpentinito. Tesis de doctorado. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998.
- SUÁREZ, J. 2006. Prueba industrial de dosificación de aditivo CIPIMM a la pulpa cruda alimentada al sedimentador – C. Julio. Departamento de Tecnología, División Técnica, Moa Nickel.
- TURRO BREFF, A.; GARCELL PUYANS, L.R.; IZQUIERDO PUPO, R. 2003. Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (colas) del proceso CARON, Tecnología Química 18 (2).

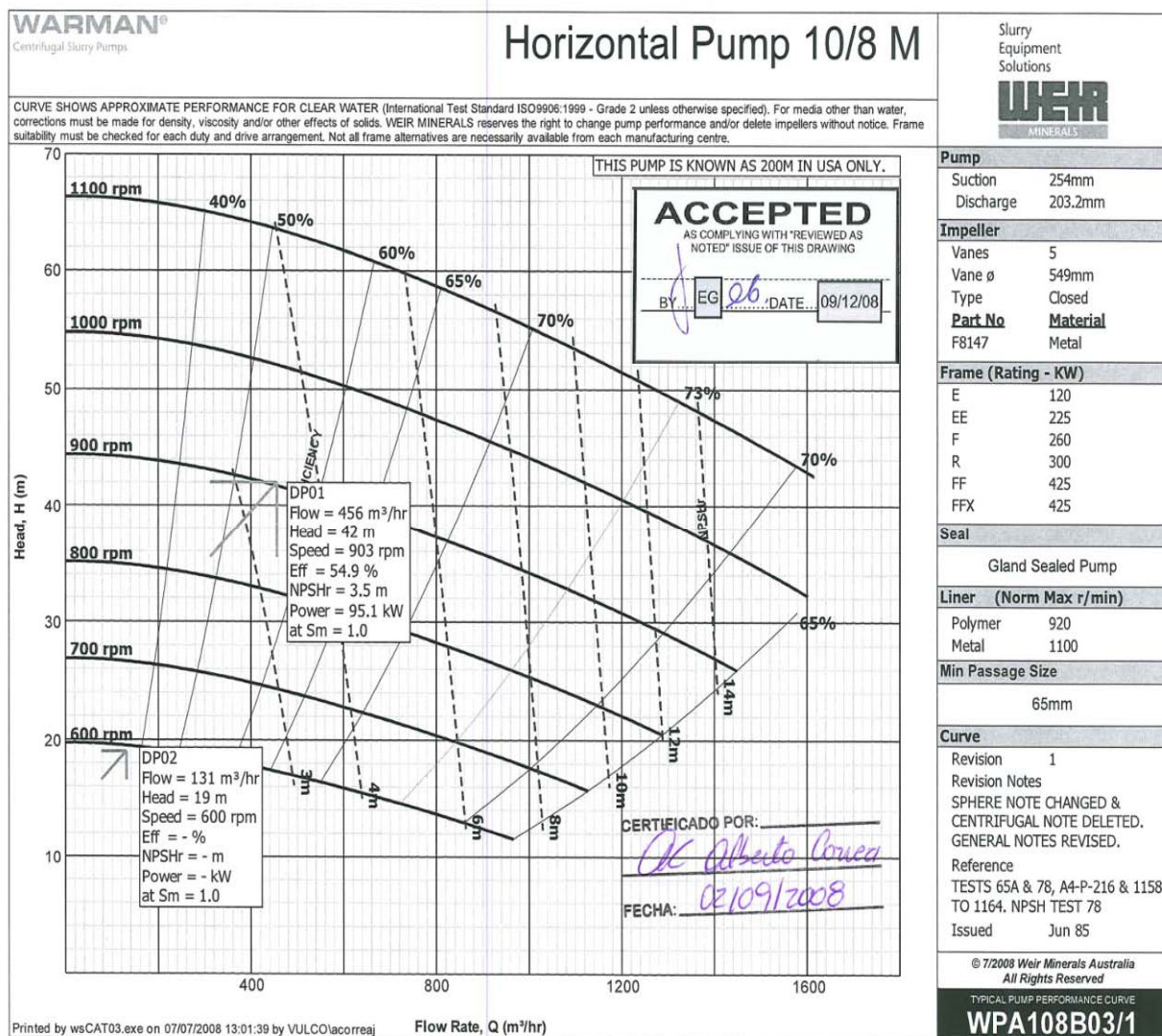


- Turro, B.A. Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa. 2002.
- Welty Pérdidas por fricción en fluidos no newtonianos “Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 1976



ANEXOS

Anexo 1. Valores de trabajo de la bomba





Anexo2. Representación tridimensional de la instalación de bombeo del espesador E

