



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

Facultad de Ingeniería

TRABAJO DE DIPLOMA

**SIMULACIÓN Y MODELACIÓN DE LA PÉRDIDA DE CARGA DURANTE
LA TRANSPORTACIÓN POR TUBERÍAS DEL CIENO CARBONATADO.**

AUTORA: Karelia Botey Martínez.

TUTOR: Ing. Ernesto Rodríguez Machín.

Ms.C. Rodney Martínez Rojas.

HOLGUÍN

2015



OSCAR LUCERO MOYA

Dedicatoria

A mi madre por todo el amor y apoyo que me han brindado siempre. También a mi hermano y a mis abuelos, que siempre han estado presentes.

Agradecimientos

A todas las personas que me brindaron su apoyo;

*A mis padres, mi familia, mi pareja, mis amigos y un especial
agradecimiento a mis tutores Ernesto, Rodney y al profesor Borges.*

Pensamiento

“...mi propósito no es el de enseñar aquí el método que cada cual debe seguir para guiar su razón, sino solamente el de mostrar de qué manera he tratado de guiar la mía.”

Descartes

Resumen

Las pulpas de Cieno Carbonatado se utilizan en la industria cubana del níquel para la neutralización de licores derivados del proceso de lixiviación ácida de menas lateríticas ferruginosas, estas constituyen fluidos no newtonianos. En esta investigación se estableció, a partir del comportamiento reológico del Cieno, un procedimiento para la evaluación de la pérdida de carga durante el hidrot transporte de este fluido por tuberías. Se reveló que para lograr los errores en el rango adecuado con respecto a los experimentales de la simulación con el paquete Flow Simulation del software Solid Works hay que tener en cuenta la viscosidad de remolino al editar las características del fluido. El procedimiento confeccionado ha sido validado con los datos recogidos en los experimentos realizados en la instalación del Instituto Minero Metalúrgico de Moa para las mismas propiedades de la mezcla y los parámetros de la instalación.

Summary

Carbonated Cien's pulps utilize at the industry derived Cuban of the nickel for the neutralization of liquors of the process of acid lixiviation of ores themselves lateríticas ferruginous, these constitute fluids not newtonianos. A procedure for the evaluation of the loss of load during the hidrotransporte of this fluid for pipes became established, as from the rheological behavior of the mud, in this investigation. Revealed him that to for to achieve the errors in the range made suitable regarding the experimental ones belonging to the simulation with the parcel Flow Simulation of the software Solid Works has somebody take into account the viscosity of whirl when editing the characteristics of the fluent. The manufactured procedure has been validated with the data picked up in the experiments accomplished in the installation of Moa's Mining Metallurgic Institute for mixture's same properties and the parameters of the installation.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Marco Teórico	5
1.1 Trabajos precedentes sobre el Cieno Carbonatado	5
1.2 Fundamentos de los fluidos no newtonianos.....	7
1.3 Viscosidad de remolino.....	13
1.4 Cieno Carbonatado.....	15
1.4.1 Procesamiento del Cieno Carbonatado.....	16
1.4.2 Composición química.....	17
1.4.3 Composición granulométrica.....	18
1.4.4 Densidad del sólido y la pulpa.....	19
1.4.5 Comportamiento reológico de las pulpas de Cieno Carbonatado.....	19
1.5 Descripción de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.....	22
1.6 Análisis de fluidos utilizando la simulación a través del CAE (Ingeniería Asistida por Computadoras).....	24
1.6.1 Conceptos básicos.....	25
1.6.2 Aplicaciones.....	26
1.6.3 Ventajas y Desventajas del CFD.....	27
1.6.4 Metodología de trabajo del CFD.....	28
1.6.5 Simulaciones vs. Experimentos – Validación.....	29
1.7 Método de elementos finitos.....	31
1.8 Flow Simulation.....	31
1.8.1 Capacidades de Flow Simulation.....	32
1.8.2 Flow Simulation teoría de fondo.....	32
1.8.3 El proyecto de Flow Simulation.....	33
Capítulo 2. Procedimiento para la evaluación de la pérdida de carga durante la transportación por tuberías del Cieno Carbonatado.....	36
2.1 Selección de los parámetros reológicos del Cieno Carbonatado.....	36
2.2 Realización de las mediciones en la instalación semi-industrial del ISMMM	38

2.3	Determinación del coeficiente de viscosidad de remolino.	39
2.4	Simulación del hidrot transporte por tuberías del Cieno Carbonatado.....	41
2.4.1	Modelación geométrica de la instalación o la tubería	42
2.4.2	Editar el fluido en la base de datos de ingeniería del Flow Simulation	43
2.4.3	Pasos para la creación de un nuevo proyecto en Flow Simulation.....	46
2.4.4	Determinación de las condiciones de frontera.....	50
2.4.5	Selección de las metas de ingeniería	51
2.4.6	Obtención de los resultados	52
2.5	Análisis de los resultados de la simulación.....	53
2.6	Obtención de las ecuaciones de caída de presión del Cieno Carbonatado. .	56
2.7	Procedimiento para la evaluación de la pérdida de carga en el hidrot transporte del Cieno Carbonatado por tuberías.....	58
2.8	Evaluación económica.....	60
2.9	Evaluación medioambiental.....	62
	Conclusiones.....	64
	Recomendaciones.....	65
	Bibliografía	66
	Anexos	69

Introducción

El transporte hidráulico por tubería juega un rol fundamental en el traslado de pulpas, debido a su efectividad económica y medioambiental respecto a los demás tipos. El consumo energético depende en gran medida de las pérdidas de carga a lo largo de la tubería y esta, a su vez, depende de la velocidad, el régimen de trabajo de la instalación y de las propiedades físico mecánicas del fluido y su concentración. La pérdida de presión durante la transportación de fluidos, en las instalaciones industriales es un factor fundamental en los que se enfocan numerosos estudios. Desde hace muchos años grandes científicos han determinado las ecuaciones y los métodos para su determinación, estos han sido empleados en fluidos con comportamientos newtonianos pero para los no newtonianos por la variabilidad de sus propiedades y de las condiciones de hidrotransportación se limita el campo de aplicación de las fórmulas de cálculo, y no resulta posible determinar los parámetros de transportación con la precisión necesaria para aplicaciones prácticas.

En la empresa mixta cubana canadiense, Comandante “Pedro Sotto Alba” Moa Nickel SA, se utiliza un proceso hidrometalúrgico, mediante la lixiviación ácida a presión, única en su tipo en la nación cubana y líder en cuanto a su rendimiento en el mundo. Donde además del mineral laterítico, la utilización del Carbonato de Calcio, (CaCO_3) contenido en los Cienos Carbonatados, constituye una materia prima imprescindible para la producción, el cual es empleado en la Planta de Neutralización para lograr el pH óptimo del licor lixiviado obtenido a partir de la lixiviación del mineral níquelífero con vista a su posterior procesamiento en el área de precipitación de sulfuros.

La pulpa de Cieno Carbonatado es un material de color gris y es extraído de una de las minas más grandes del mundo, situada al oeste de Cayo Grande de Moa, la cual es sometida a un proceso de beneficio, en la planta de preparación de pulpa de coral en la zona portuaria, las partículas mayores que 20 mesh (0.85mm) forman el rechazo, las de menor diámetro son enviadas a los sedimentadores con el objetivo de incrementar el porcentaje sólido hasta el valor de diseño de 40 - 45 % bajo condiciones idóneas, esta pulpa es enviada a la planta de neutralización por medio de un sistema de transporte hidráulico por tuberías para ser almacenada en los

tanques de dicha planta. Estas pulpas constituyen suspensiones minerales con particularidades no newtonianas poco conocidas que influyen en el proceso de transportación.

En el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM), se han estado realizando desde varios años diversas investigaciones encaminadas a determinar el comportamiento de las características del Cieno Carbonatado, atendiendo a las propiedades físico – mecánicas y reológicas, así como, sus principales parámetros de transporte a partir de su naturaleza reológica, basados en la determinación de las pérdidas de presión en las líneas y accesorios, siendo este trabajo una tarea de aporte novedoso, para ello cuentan con áreas e instalaciones destinadas al estudio y comportamiento de los fluidos industriales, así como los elementos y equipos que componen dichas instalaciones. Dirigidos por profesores investigadores del área de la Mecánica de los Fluidos.

La instalación semi-industrial de hidrotransporte construida alrededor de los años 1985 y 1986 es una de estas áreas para la investigación y la docencia, la misma consta de bombas, tuberías, accesorios e instrumentación destinados al control de los parámetros de funcionamiento de estos equipos para el bombeo del fluido. Se dispone de un sistema de redes en circuito cerrado y semi-abierto por el cual se trasiegan los fluidos en estudio (agua, pulpas, combustibles, entre otros). La misma presenta las características relacionadas a continuación:

- Alto consumo de energía eléctrica.
- Necesidad de grandes volúmenes de material para la realización de los experimentos.
- Necesidad de realización de grandes inversiones en herramientas de medición.
- Limitaciones de los métodos existentes para la proyección y cálculo de los parámetros adecuados del hidrotransporte de Cieno Carbonatado.

El uso de software que permita la simulación del transporte de fluidos, ejemplo de ello el Solid Works es de gran beneficio, ya que se pueden realizar diversos tipos de estudios teniendo en cuenta las condiciones reales de las instalaciones y las

características físicas, mecánicas y reológicas de los fluidos, obteniendo grandes volúmenes de datos y soluciones rápidas. Con su ayuda se podría plantear un procedimiento que permita obtener los valores de presión en la hidrotransportación de mezclas utilizadas en la industria sin la necesidad de costosos experimentos.

Se define como **problema de investigación**: Necesidad de determinar la pérdida hidráulica por fricción durante el transporte del Cieno Carbonatado en función de los parámetros de la tubería y las propiedades de las mezclas.

Objeto de estudio:

Pérdidas hidráulicas en el transporte de fluidos no newtonianos.

Campo de acción:

La pérdida hidráulica por fricción durante el transporte del Cieno Carbonatado

Hipótesis:

Si se utiliza la herramienta Flow Simulation del software Solid Works para la simulación de la pérdidas hidráulicas durante la hidrotransportación del Cieno Carbonatado, teniendo en cuenta las propiedades reológicas y el efecto de la viscosidad de remolino; se podrá establecer un procedimiento para la evaluación de pérdida de carga minimizando los costos.

Objetivo general:

Establecer un procedimiento para la evaluación de la pérdida de carga en el hidrotransporte del Cieno Carbonatado por tuberías.

Tareas de investigación:

- Revisión de las fuentes bibliográficas relacionadas con el tema.
- Establecimiento de las propiedades y características del material a estudiar.
- Determinación de los valores de viscosidad de remolino.
- Simulación del comportamiento del Cieno Carbonatado en las tuberías de la instalación con el uso del módulo Flow Simulation del software Solid Works.
- Análisis de los resultados arrojados por la simulación con respecto a los obtenidos en los estudios experimentales.
- Conformación del procedimiento para la evaluación de pérdida de carga en el hidrotransporte del Cieno Carbonatado por tubería.

Los **métodos** utilizados con el objetivo de la interpretación de la información empírica obtenida y el análisis de las fuentes impresas para el establecimiento de generalizaciones y las regularidades fueron los siguientes:

1. Método Histórico - Lógico: Facilitó el estudio de la trayectoria y antecedentes del tema puesto que realizó una exhaustiva búsqueda de tesis y trabajos realizados anteriormente acerca de los fluidos no newtonianos y en especial del Cieno Carbonatado.
2. Método de Análisis y Síntesis: Se empleó para la determinación de los factores fundamentales a tener en cuenta para la simulación del transporte del Cieno Carbonatado.
3. Método de Consulta a expertos: se realizaron varias visitas al ISMMM donde se consultaron a varios profesores de gran experiencia y expertos en el tema de transporte de fluidos no newtonianos.

Capítulo 1. Marco Teórico

1.1 Trabajos precedentes sobre el Cieno Carbonatado

El antecedente más lejano acerca de este yacimiento se remonta a la década del 50, con el proceso de dragado por parte de una compañía Norteamérica; la información al respecto debió atesorarse en los archivos del entonces Servicio Geológico Norteamericano, donde es obvio que se debió haber realizado una valoración geólogo-económica que permitiera tomar la decisión de crear y emplazar una tecnología de tal magnitud y complejidad, (hasta décadas recientes única en su tipo en el mundo) y que hasta la actualidad se haya sostenido una explotación continuada del yacimiento de Cienos Carbonatados.

Los primeros estudios de los que hay referencia, se remontan a (Correa,1957) quien realizó un estudio sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al Oeste de Cayo Moa Grande.

En la década de los 60 se inicia la extracción de los Cienos Carbonatados (denominados en esa época “coral” o “fangos coralinos”). En 1964 el Centro Coordinador para el Desarrollo del Norte de Oriente, solicitó al I.C.R.M. (Instituto Cubano de Recursos Minerales) la realización de estudios de localización y ubicación de las reservas de “coral”, para después tomar decisiones respecto a la tecnología a adoptar en el proceso de refinación del níquel.

Posteriormente (Nedved, 1966) presentó el informe final de los trabajos de búsquedas de fangos coralinos, donde se tomaron diferentes muestras evaluándose en las mismas el contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) y granulométricamente por las mallas 20, 48, 100, 200 mesh.

Se reportan en la literatura (Castillo, 1988) problemas con la extracción y utilización de la materia prima, recomendando el empleo de la fracción gruesa (fracción retenida en la malla de 20 mesh) constituidos por conchas de moluscos, algas calcáreas y restos de corales teniendo en cuenta su perspectivas por contenidos de carbonato de calcio.

En los trabajos realizados por (Nápoles, 1992) se evaluó la materia prima para contenido de CaCO_3 y granulométricamente en las mallas +20, +100, +325 y -325 mesh y se calcularon reservas en categoría industrial.

La principal deficiencia en la ejecución de estos trabajos radica en que no se contó con los recursos técnicos adecuados que garantizarán el posicionamiento confiable de las labores realizadas en correspondencia con la exigencia de las escalas de los trabajos.

Con posteridad especialistas del Centro de Proyectos del Níquel (CEPRONIQUEL 1997) recalcularon las reservas sobre la base de la información de (GEOMAR 1992) obteniendo reservas muy inferiores a las reportadas por esta última.

En trabajos realizados por Campos, 2001) se refleja el carácter terrígeno de los sedimentos que conforman el depósito, además de la composición química y mineralógica donde se establece la exclusión de los sedimentos terrígenos los cuales proceden de la formación de las rocas de la asociación ofiolítica y de la corteza de interperismo laterítico vinculados a la misma.

Se han realizado otras investigaciones en los cuales el Cieno Carbonatado constituye el objeto de estudio, donde se establecen las características físico-químicas de la hidromezcla de Cieno Carbonatado:

- (Hernández, 2003); aporta el gráfico que relaciona el factor de fricción en función del número de Reynolds y Hedstron.
- (Jimenes, 2005); Partiendo de la caracterización del Cieno Carbonatado evalúa la instalación existente para la transferencia de la pulpa desde el Puerto hasta la planta de Neutralización.
- (Martínez, 2009); mediante modelos físico–matemático establece la regulación del movimiento de las suspensiones de Cieno Carbonatado y como proceden en su movimiento por la red de tuberías, analizando experimentalmente las propiedades físico-químicas y mecánicas, composición granulométrica, mineralógica y comportamiento reológico, entre otros factores.

- (Correa G. M., 2010); realiza un perfeccionamiento del sistema de transporte de Cieno Carbonatado en el Puerto Moa, planteando una metodología de cálculo específica para este tipo de fluido.

En estos momentos se está realizando una investigación mediante estudios experimentales en la instalación semi-industrial del ISMM de Moa para determinar el modelo matemático que describa la pérdida de energía del Cieno Carbonatado durante su transportación.

Todas estas investigaciones abarcan el tema en estudio con disímiles resultados, obteniéndose las composiciones químicas, el comportamiento reológico, el porcentaje de sólido entre otras cualidades, incluyendo formulaciones que tienen en cuenta las propiedades del fluido en cuestión, pero ninguna de ellas ha llegado a la simulación de la hidrotransportación por tuberías del Cieno Carbonatado por lo que en este trabajo aplicando técnicas modernas de análisis y simulación, utilizando el Método de los Elementos Finitos por su alta confiabilidad en los resultados, se realizará la simulación de la hidrotransportación del Cieno Carbonatado, para así desarrollar un procedimiento que permita determinar la caída de presión del mismo teniendo en cuenta las propiedades de la mezcla y las dimensiones de la instalación.

1.2 Fundamentos de los fluidos no newtonianos.

La rama de la mecánica que estudia el comportamiento de los fluidos, ya sea en reposo o en movimiento, se le llama “Mecánica de los Fluidos”. En la estática de los fluidos, el peso específico es la propiedad de mayor importancia, mientras que en el flujo de fluidos, la densidad y la viscosidad son las que predominan. (Torres, 2000).

Los fluidos son sustancias que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen. Cuando están en equilibrio no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma. Los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases, (Greene, 1995) (Díaz, 1990) (Perry, 1984) (Skelland, 1970) (Tejeda, 1985). Los líquidos son prácticamente incompresibles, ocupan un volumen definido y tiene superficies libres, sin embargo los gases son compresibles, se expansionan hasta ocupar todas las partes del recipiente que los contenga.

Los líquidos simples y las disoluciones verdaderas suelen ofrecer un comportamiento newtoniano. Los líquidos no newtonianos son generalmente muy complejos y constan de más de una fase, aunque las disoluciones de polímeros puedan considerarse como fases únicas. Una de las fases es continua y la otra discontinua (dispersa).

Reología

El término reología fue sugerido en 1929 por Eugene Cook Bingham para definir la rama de la Física que tiene por objeto el conocimiento de la deformación o flujo de la materia. La reología es la ciencia del flujo y la deformación; estudia las propiedades mecánicas de los gases, líquidos, plásticos, sustancias asfálticas y materiales cristalinos.

En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican desde el punto de vista reológico en newtoniano y no newtoniano (Skelland, 1970; Tejeda, 1985; Perry, 1988; Díaz, 1989; L R Garcell, 1988)

En los fluidos newtonianos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante, siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad. La experiencia demuestra que todos los gases y los líquidos homogéneos de baja viscosidad se comportan como fluidos newtonianos; la viscosidad de estos fluidos es constante respecto a los cambios en la magnitud del esfuerzo cortante (τ) y del gradiente de velocidad ($\dot{\gamma}$).

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. En otras palabras un fluido no newtoniano se define como aquel que exhibe flujo uniforme, pero para el que no es constante la relación entre tensión tangencial y velocidad de deformación (la viscosidad no es constante).

Según la variación de la viscosidad los materiales no newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos:

1. De viscosidad independiente del tiempo:

- Seudoplásticos: Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ($\tau > 0$). Su curva de flujo se describe por el modelo de Ostwald de Waele (para $n < 1$):
- Dilatantes: Sus viscosidades aumentan con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ($\tau > 0$). También se describen por el modelo de Ostwald de Waele (para $n > 1$).
- Plásticos ideales: Se les conoce también como plásticos Bingham, ya que siguen ese modelo. Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que un esfuerzo cortante inicial (τ_0), que es el esfuerzo límite que hay que aplicarles a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y comiencen a fluir.
- Plásticos reales: Sus viscosidades también disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que τ_0 . Siguen el modelo de Herschel – Bulkley.

2. De viscosidad dependiente del tiempo:

- Tixotrópicos: La viscosidad de estos materiales disminuye con el tiempo, cuando están sometidos a un gradiente de velocidad determinado. Se comportan reológicamente como seudoplásticos, plásticos ideales y reales.
- Reopécticos: La viscosidad de estos aumenta con el tiempo, para un gradiente de velocidad determinado; y se comportan como materiales dilatantes.

3. Viscoelásticos ó de Maxwell:

- Estos materiales exhiben propiedades viscosas y elásticas, los cuales 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.

Modelos reológicos de flujo.

Para expresar la relación existente en estado estacionario entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad se han propuesto varias relaciones empíricas (modelos reológicos). Existe en la literatura una gran variedad de modelos propuestos. Los más difundidos son los siguientes:

Modelo de Oswalds de Waele.

$$\tau_{yx} = K \left(-\frac{dV_x}{dy} \right)^n \quad (1.1)$$

Esta expresión se conoce también como Ley de potencia; se utiliza para describir el comportamiento de fluidos pseudoplásticos y dilatantes. En esta ecuación, n es el índice de flujo, una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material, K es el índice de consistencia y constituye una medida del grado viscoso del material.

Modelo de Bingham

$$\tau_{yx} = \tau_0 + \mu_p \left(-\frac{dV_x}{dy} \right) \quad (1.2)$$

Donde: μ_p es la viscosidad plástica y τ_0 es el esfuerzo cortante inicial.

Este modelo se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos ideales.

Modelo de Bulkley - Herschell

$$\tau_{yx} = \tau_0 + K \left(-\frac{dV_x}{dy} \right)^n \quad (1.3)$$

Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales.

τ_0 , K y n tienen los mismos significados descritos en los dos modelos anteriores.

(Manual de operaciones planta de Cienos Carbonatados.)

Curvas de flujo

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos newtonianos y no newtonianos, las que se denominan curvas de flujo.

A continuación en un esquema se muestran las curvas de flujo típicas (Figura 1.), y las curvas con tixotropía y reopexia (Figura 2.), Estas últimas forman lazos de histéresis conformados entre las curvas para valores de $\dot{\gamma}$ ascendentes y descendentes, según indican las saetas.

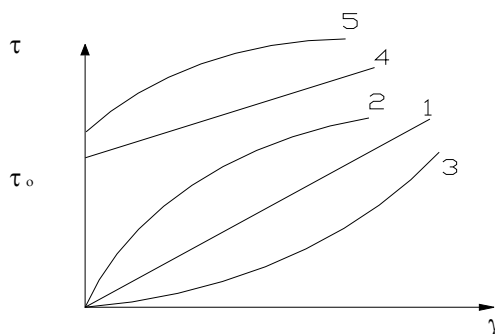


Figura 1. Curvas de flujo típicas: 1-Newtonianos; 2-Seudoplásticos; 3-Dilatantes; 4-Plástico ideal (Bingham); 5-Plástico real.

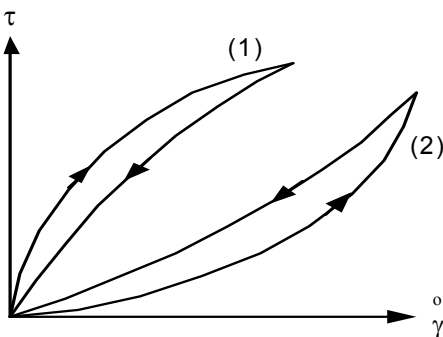


Figura 2. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo: 1- Tixotrópico; 2- Reopéctico.

Importancia de las curvas de flujo.

Son variadas las aplicaciones de los datos que aportan las curvas de flujo; a continuación solo se mencionarán las más importantes:

1. Permite identificar el comportamiento y la naturaleza reológica del fluido, así como seleccionar el modelo que describe dicho comportamiento.
2. Permite determinar valores de viscosidad para diferentes condiciones de operación.
3. Posibilita establecer si un equipo o un conducto, que ha sido diseñado para manipular un material determinado, puede ser utilizado con otro producto.
4. La evaluación del funcionamiento de un sistema de flujo dado.
5. Contribuye a establecer condiciones de operación industriales en distintos sistemas hidrodinámicos.

Viscosidad de los fluidos no newtonianos

Para los gases y la mayoría de los líquidos puros, y para muchas disoluciones y dispersiones la viscosidad es una magnitud bien definida a una temperatura y presión determinadas. Este es el caso del aire, el agua, alcohol, soluciones de sacarosa, aceites, y otros. Este tipo de fluidos, que siguen la ley de Newton de la viscosidad, se conocen como fluidos newtonianos. Sin embargo, en muchas disoluciones y en la mayoría de las dispersiones, especialmente si son concentradas o si las partículas son asimétricas (las cuales son capaces de formar una estructura o retículo debido a las interacciones entre ellas de diferente naturaleza), se observan desviaciones del flujo newtoniano, por lo que se les clasifica como materiales no newtonianos.

Para comprender mejor el comportamiento de la viscosidad en los fluidos no newtonianos debemos dominar algunos conceptos básicos primero.

La ley de Newton de la viscosidad:

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \mu \dot{\gamma} \quad (1.4)$$

Constituye la definición de la viscosidad dinámica de un fluido. Para los fluidos newtonianos μ es una constante para una temperatura y concentración determinadas; sin embargo, para los materiales no newtonianos, $\mu = \mu(\dot{\gamma})$. Si para

estos últimos aplicamos la Ley de Newton, la viscosidad calculada correspondería a cada valor de $\dot{\gamma}$ velocidad, considerando como si el fluido fuera newtoniano en cada punto (Figura 3.). De ahí que esta viscosidad se conozca como viscosidad aparente, representándose generalmente por el símbolo μ_a (Garcell, 1988; Skelland, 1970).

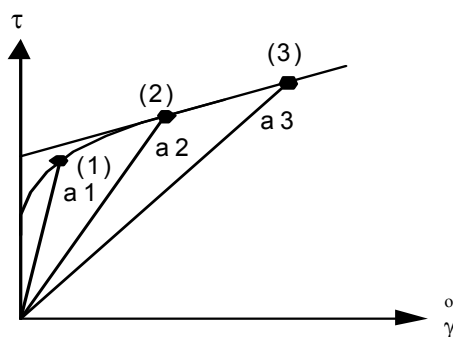


Figura 3. Viscosidades aparentes a diferentes valores de $\dot{\gamma}$ en un fluido no newtoniano.

El Cieno Carbonatado (material calcáreo y grisáceo) se utiliza en la industria cubana productora de níquel y cobalto para la neutralización de licores derivados del proceso de lixiviación ácida de menas lateríticas ferruginosas.

Las pulpas de cieno, por la variabilidad de sus propiedades físicas, limitan el uso de las ecuaciones de cálculo conocidas para la selección y evaluación de los sistemas de transporte.

Las pulpas elaboradas con el cieno se componen de partículas finas (menos de 0,85 mm) por lo que se comportan como sistemas coloidales; por estudios reológicos realizados anteriormente se ha demostrado que el Cieno Carbonatado se comporta como un fluido no newtoniano en los cuales la viscosidad es variable.

1.3 Viscosidad de remolino

El flujo turbulento es el más frecuente en las aplicaciones prácticas de la ingeniería. En esta clase de flujo las partículas del fluido se mueven siguiendo trayectorias muy irregulares originando un intercambio de cantidad de movimiento de una posición del

fluido a otra. Las partículas fluidas implicadas en el intercambio de cantidad de movimiento pueden tener un tamaño desde muy pequeño hasta muy grande, el flujo turbulento origina una mayor tensión de cortadura en el fluido y produce más irreversibilidades o pérdidas. Así en el flujo turbulento las pérdidas de energía mecánica varían aproximadamente con el cuadrado de la velocidad, mientras que el laminar lo hace con la potencia.

En el flujo laminar las partículas del fluido se mueven a lo largo de trayectorias lisas en capas o laminas deslizándose una capa sobre la adyacente. En este tipo de flujo se cumple la ley de Newton de la viscosidad, que relaciona la tensión de cortadura con la velocidad angular de deformación; la acción de la viscosidad frena la tendencia a la turbulencia pero este no es estable cuando la velocidad o el caudal es grande transformándose en turbulento; una ecuación similar a la de Newton puede usarse para el flujo turbulento:

$$\tau = \eta \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (1.5)$$

El factor η no es ahora solamente una propiedad del fluido sino que depende, además de la densidad y del movimiento del fluido. Se llama viscosidad de remolino. En muchos casos prácticos de flujo la tensión de cobertura es función de la viscosidad y de la turbulencia y resulta:

$$\tau = \mu + \eta \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (1.6)$$

En flujos turbulentos η , la viscosidad de remolino, es generalmente mucho mayor que μ . Puede considerarse como un coeficiente de transferencia de cantidad de movimiento, el cual expresa la transferencia de cantidad de movimiento desde puntos donde la concentración es alta hasta puntos donde es baja. Es conveniente utilizar una viscosidad de remolino cinemática $\epsilon = \eta/\rho$, la cual depende de los parámetros de flujo únicamente, y es análoga a la viscosidad cinemática.

Para el estudio de este tipo de flujos se necesita recurrir a la experimentación. (Streeter, 1978)

Esta teoría es aplicada para los fluidos newtonianos, al emplearla a los no newtonianos la ecuación del modelo para plásticos Bingham quedaría de la siguiente forma :

$$\tau = \tau_0 + (\eta + \mu_p) \left(-\frac{dV_x}{dy} \right) \quad (1.7)$$

1.4 Cieno Carbonatado

El yacimiento de Cienos Carbonatados de la bahía de Cayo Moa es un depósito compuesto por sedimentos clásticos friables cuaternarios, de carácter biodetrítico y terrígeno que se caracterizan en su conjunto por un elevado contenido de carbonato de calcio.

Es apreciable el carácter discordante del depósito de sedimentos clásticos carbonatados con relación a su basamento; de esta forma los sedimentos carbonatados son parte de una secuencia sedimentaria sin relación con el basamento de la cuenca en que se depositaron; al transportarse fueron sedimentándose en una zona de aguas tranquilas y de poca circulación en un ambiente de laguna retroarrecifal.

En las proximidades de la ciudad de Moa, los restantes elementos que conforman el substrato plegado no afloran y en la zona costera y la plataforma marina, las rocas de la asociación afiolítica y en ocasiones su corteza de intemperismo, son cubiertas por depósitos sedimentarios del Neógeno – Cuaternario que en su base están compuestos por caliza arrecifales, calizas biodetríticas, margas, rocas arcillosas y depósitos palustres sobre los que yacen en el área de la bahía de Cayo – Moa, arenas y sedimentos arenos limosos y limosos calcáreos que en su conjunto forman el yacimiento de Cieno Carbonatado.

Los sedimentos que conforman el yacimiento presentan una estratigrafía matizada por la carencia de una verdadera estratificación y donde predominan los cambios granulométricos graduales en la vertical y los cambios faciales laterales.

En estos sedimentos marinos cuaternarios de edad Holoceno – Reciente, la deposición estuvo controlada, no sólo por el régimen de transporte hidrodinámico específico de la zona costera, sino también por el relieve e inclusive las características litológicas de las fuentes de suministro.

En el perfil litológico generalizado del depósito aparecen con diferente grado de mezcla, las siguientes “capas” u horizontes: arena carbonatada, Cieno Carbonatado de limoso a arenoso, y cieno terrígeno.

Las rocas del basamento están constituidas por calizas arrecifales y biodetríticas, además de areniscas, que por lo general contienen fragmentos de corales. Por zonas aparecen arcillas y turbas que por lo general se mezclan con la parte inferior más arenosa del yacimiento de Cienos Carbonatados.

Se establece dos tipos litológicos útiles de este material. (Nedved, 1966). El primero, de color gris claro, con alta plasticidad y poco arenoso, con fuerte olor a H₂S, en él prevalecen las partículas menores de 0.08 mm que pasan la malla 200 mesh (entre 50 y 90 %) y las partículas gruesas sobre mallas 200 mesh no sobrepasan el 10 %. El segundo tipo de color gris oscuro, menos plástico, con incremento de las partículas gruesas (abundantes conchas) carece de olor a H₂S y aumenta el contenido de partículas gruesas sobre mallas 20 mesh (0.85mm) hasta 30%. (Martínez, 2009).

1.4.1 Procesamiento del Cieno Carbonatado.

El Cieno Carbonatado, es minado en la bahía y transportado hasta la planta de coral establecida en áreas aledañas al puerto de Moa. En dicha planta es sometido a un proceso de beneficio para la utilización del material menor de 20 mesh (0.85mm), y el resto constituye el rechazo, que es almacenado en depósitos cercanos a dicha planta.

Después de clasificado, este material se somete a un proceso de aumento de la concentración entre 30 y 45% de sólido, el cual es requerido en el proceso de neutralización y es transportado hasta la fábrica “Comandante Pedro Sotto Alba”

Moa Nickel S.A. ubicada a 4 km, mediante un sistema de transporte por tuberías. (Gavilares, 2014)

Tabla 1. Características de las pulpas de Cieno Carbonatado (Manual de operaciones planta de Cienos Carbonatados).

Parámetros	
Densidad (kg/m ³)	1100 – 1340
Porcentaje de sólido (%)	25 – 45
Porcentaje de arena de arena (%)	≤16
Cloruro (ppm)	500 - 600
Carbonato de calcio (%)	≥87
Composición granulométrica (-325 mesh) %	≤76
pH	8 - 9

1.4.2 Composición química.

En la investigación realizada por (Martínez, 2009), toma tres muestras de Cieno Carbonatado en varios puntos del proceso tecnológico de preparación de la pulpa de Cieno Carbonatado, desde el minado pasando por la torre de beneficio hasta la descarga de dicho material en la Planta de Neutralización.

- M - 1** Patana de transporte de mineral
- M - 2** Tubería de alimentación al tanque de sedimentación 1 de la planta de cienos
- M - 3** Tanque de alimentación a las bombas

Obtiene la composición química planteada en la Tabla 2:

Tabla 2. Composición química del Cieno Carbonatado (Martínez, 2009).

Muestra	% Ni	% Fe	% Mg	% Mn	% Ca	% Al	% Na
M - 1	0,119	1,45	1,80	0,046	27,80	0,609	0,306
M - 2	0,114	1,15	1,73	0,028	29,14	0,470	0,200
M - 3	0,113	1,16	1,72	0,027	30,74	0,479	0,111

Como los resultados indican, la muestra M-1 posee los valores máximos para los elementos siguientes: hierro, magnesio, manganeso, aluminio y sodio, lo cual se debe a que en ella se incluye la fracción mayor de 0,85mm. Respecto a la muestra M-2 y M-3 no existen diferencias significativas entre ellas aunque es preciso aclarar que el contenido de sodio con respecto a M-1 disminuye debido al proceso de lavado al cual es sometido el material, no obstante entre la M-1 y M-2 esta disminución sugiere que en el sedimentador ocurre una disolución parcial del cloruro de sodio contenido en la muestra. El enriquecimiento de la muestra M-3 en cuanto al contenido de calcio es de 30,74 %; ello se debe a que en esta etapa la pulpa se somete a un proceso de floculación y sedimentación donde los sólidos en suspensión con contenidos de calcio son precipitados.

1.4.3 Composición granulométrica.

El análisis de los resultados obtenidos en trabajos anteriores muestran que en el material denominado de rechazo obtenido de los depósitos, las partículas menores de 0.83 mm representan el 22.3 % de la masa total del material, fracción de tamaño necesaria para la utilización en el proceso y su transportación. Las partículas superiores a esta fracción de tamaño representan un 77,7 % por lo que el 80% de material de salida se encuentra aproximadamente ubicado en el orden del diámetro de partículas igual a 6,3mm.

Este material de tamaño de fracción de partículas superior a los 0,83mm es sometido a un proceso de trituración y molienda permitiendo obtener la fracción de tamaño de partícula necesaria para su transportación.

Una vez sometido al proceso de molienda la caracterización granulométrica de las partículas mayoritarias corresponden a la clase menor de 0,046mm, constituyendo el

68.31 % en peso de las fases sólidas en la muestra. Existe un predominio de las fracciones finas de forma general y el 80% de material de salida se corresponde con el diámetro de partícula igual a 0.08444 mm, lo cual indica que el 80 % de la muestra presenta un diámetro inferior a este valor.

1.4.4 Densidad del sólido y la pulpa.

Según (Caballero, 2008) los valores de la densidad del sólido y de la pulpa de Cieno Carbonatado, son los que relaciona la Tabla 3:

Tabla 3. Valores de densidad de la pulpa y el sólido de Cieno Carbonatado de determinados (Caballero, 2008).

Densidad, (kg/m ³)	
Sólido	Pulpa
3015	1310

La Tabla 4 muestra los valores obtenidos de densidad para un rango de 25 a 50 % de sólidos en experimentos realizados en los laboratorios de la fábrica Comandante “Pedro Sotto Alba”Moa Nickel SA.

Tabla 4. Valores de densidad de las pulpas de Cieno Carbonatado con diferente porcentajes de sólido.

% S	Densidad (kg/m ³)
25	1100
30	1226
35	1274
40	1325
45	1382
50	1443

1.4.5 Comportamiento reológico de las pulpas de Cieno Carbonatado.

La comprensión de la reología del Cieno Carbonatado tiene gran uso práctico en relación con sus parámetros de flujo al transportarlos a través de las tuberías.

A partir del estudio reológico realizado por (Martínez R. , 2014) se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 5, en la misma se recoge la dependencia entre el

esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad para los contenidos de sólidos experimentados.

Tabla 5. Resultados obtenidos del estudio reológico al Cieno Carbonatado (Martínez R. , 2014).

Gradiente de velocidad $\dot{\gamma}$ (1/s)	Esfuerzo de corte τ (Pa)				
	30%	35%	40%	45%	50%
16,640	1,339	2,330	6,090	15,090	29,500
34,190	1,430	2,530	6,250	15,460	30,300
67,080	1,498	2,740	6,417	15,900	30,700
109,500	1,583	2,940	6,630	16,180	31,350
146,300	1,674	3,125	6,720	16,560	31,740
180,400	1,731	3,236	6,863	16,760	32,000
205,600	1,842	3,330	6,980	16,930	32,400
231,500	1,890	3,420	7,150	17,090	32,900
248,100	1,972	3,490	7,200	17,300	33,600
274,500	2,140	3,620	7,340	17,670	33,700
304,100	2,210	3,750	7,590	18,400	34,080

Al representar gráficamente los datos experimentales de τ en función de $\dot{\gamma}$, se trazaron las curvas de flujo (Figura 4), las mismas permiten realizar el ajuste de los datos mostrados en las Tabla 5.

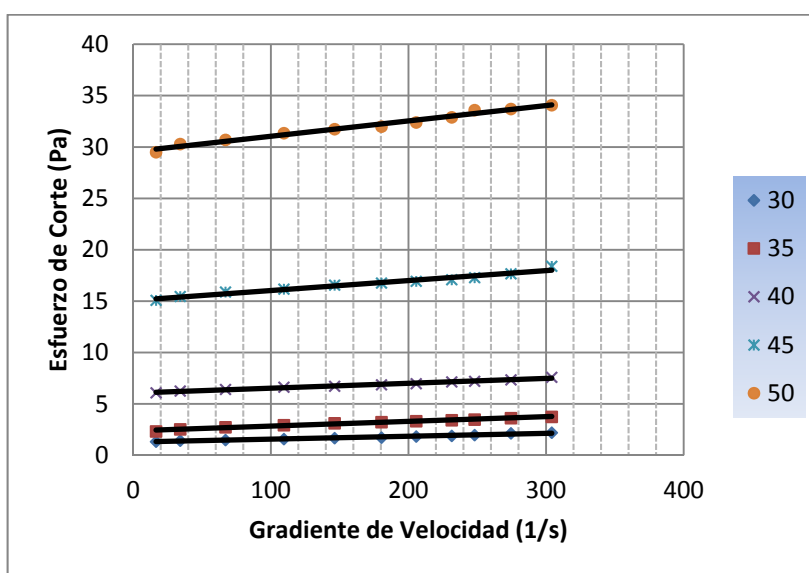


Figura 4. Curva de flujo del Cieno Carbonatado en función del contenido de sólido.

En la Figura 4 se observa que para el que para el rango de porcentaje de sólidos desde 30 hasta 50 %, de sólido, el Cieno Carbonatado muestra un comportamiento no newtoniano plástico ideal y el mejor ajuste para el modelo de Bingham, según lo planteado por (Martínez, 2009)(Martínez R. , 2014). El comportamiento manifestado, está caracterizado por los parámetros reológicos, esfuerzo de corte inicial (τ_0) y viscosidad plástica (μ_p). En cuanto a los parámetros reológicos, fue posible identificar la tendencia respecto a la dependencia de cada factor con el contenido de sólido. Los modelos ajustados para cada porcentaje de sólido se exponen en la Tabla 6.

Tabla 6. Correlaciones de esfuerzo de corte en función del gradiente de velocidad (Martínez R. , 2014).

Contenido de sólido	Modelo ajustado
30 %	$\tau_{xy} = 1,2835 + 0,0029 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)$
35 %	$\tau_{xy} = 2,3771 + 0,0046 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)$
40 %	$\tau_{xy} = 6,0539 + 0,0048 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)$
45 %	$\tau_{xy} = 15,061 + 0,0097 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)$
50 %	$\tau_{xy} = 29,553 + 0,015 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)$

En la Tabla 7, se resumen los parámetros reológicos y los coeficientes de correlación obtenidos del ajuste del modelo reológico.

Tabla 7. Parámetros reológicos obtenidos y coeficiente de correlación múltiple (Martínez R. , 2014).

No	Parámetros	Contenido de sólido				
		30%	35%	40%	45%	50%
1	τ_0 (Pa·s)	1,2835	2,3771	6,0539	15,061	29,559
2	μ_p (adim.)	0,0029	0,0046	0,0048	0,0097	0,015
3	R^2	0,974	0,985	0,989	0,967	0,980

El coeficiente de correlación múltiple (R^2) fue en todos los casos fue superior a 0,967; por lo que se considera satisfactorio el ajuste de los modelos a los datos experimentales.

Para la realización de la simulación del transporte de Cieno Carbonatado con el software Solid Works y utilizando el módulo Flow Simulation; que permitirá la creación de un procedimiento para la obtención de la perdida de carga del mismo se seleccionará los parámetros reológicos característicos de la muestra del Cieno Carbonatado con un 30% solido.

1.5 Descripción de la instalación semi-industrial de hidrotransporte del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

La función fundamental de la instalación de hidrotransporte es su utilización como laboratorio de la asignatura de Mecánica de los Fluidos, con el objetivo de estudiar varios fluidos en movimiento a través de un sistema de red de tuberías y equipos conectados en paralelo donde las líneas de descarga independientes de ambas bombas van hacia una línea de transporte común, para enriquecer los conocimientos adquiridos durante todo un curso. La instalación está dotada de equipos y accesorios que permiten realizar corridas de agua y pulpa para llevar a cabo investigaciones científicas permitiendo hacer mediciones de diferentes variables como presión, temperatura, densidad, nivel y flujo, registrando sus valores para un mejor análisis del proceso, como se muestra en la Figura 5 se presenta un esquema

de la instalación; la misma fue modelada completamente en el uso del Software Solid Works. (Ver anexo1.)

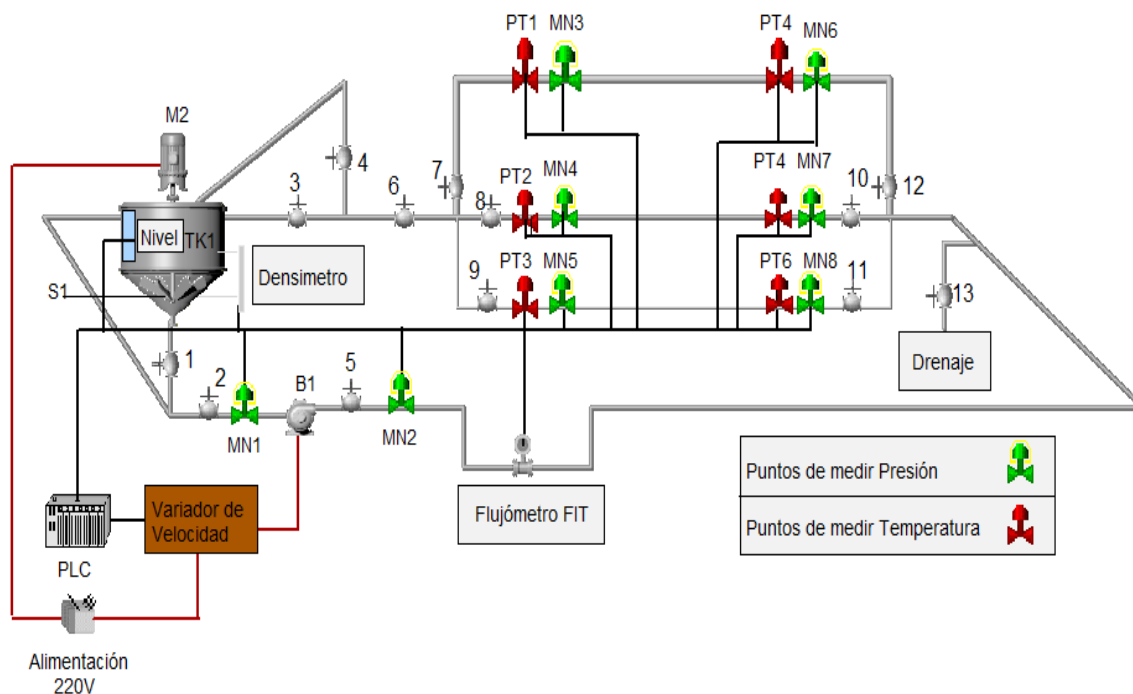


Figura 5. Instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMMM.

La instalación consta de un tanque (TK1), con un volumen de 5.187 m^3 , para almacenar la pulpa a diferentes concentraciones de sólidos, un sedimentador acoplado a su árbol (S1) para homogenizar la mezcla, dos motores de inducción (M1) y (M2) una bomba centrífuga (B1) $\mu\text{G } 126/25$ que forman el sistema de bombeo del fluido por toda la tubería pasando por un Flujómetro (FIT), ocho puntos de toma de presión desde (MN1) hasta (MN8) y seis puntos de toma de temperatura desde (PT1) hasta (PT6), tres tramos de tubería para determinar las pérdidas hidráulicas, los cuales poseen un diámetro de 75 mm, 100 mm y 150 mm. El drenaje del sistema se realiza por la válvula (13).

Los puntos MN3, MN4, MN5, MN6, MN7 y MN8 (para medir la presión) se encuentran alejados de los extremos de la tubería a una distancia de 4 m, para evitar las influencias de las perturbaciones más cercanas (codos, etc.), mientras MN1 y MN2 son para la medición de presión de succión e impulsión respectivamente. La bomba B1 tiene una capacidad de $160 \text{ m}^3/\text{h}$. Durante la toma de datos experimentales, la instalación opera en circuito cerrado (succión, impulsión y

tanque). La regulación del caudal de la bomba B1 se realiza con ayuda de un variador de velocidad. El llenado del sistema se efectúa directamente en el tanque TK1. La medición del caudal del fluido se realiza con el flujometro electromagnético FIT

Las mediciones realizadas llegan a un autómata programable Simatic S7 300, el cual se encarga de procesar los datos y enviarlo por una red de comunicación Ethernet a una PC, donde se visualizan y registran por medio de un Software de Scada Citect. Al concluir la corrida se limpia la instalación en circuito abierto mediante la válvula de drenaje.

1.6 Análisis de fluidos utilizando la simulación a través del CAE (Ingeniería Asistida por Computadoras).

A partir de la curiosidad y necesidad de comprender el trasfondo del comportamiento de los fluidos, los científicos plantearon formulaciones para su estudio utilizando las matemáticas.

Pasando por valiosos contribuyentes al desarrollo de la mecánica de fluidos, a finales del siglo XIX, fueron Claude-Luís Navier y George Stokes los que formularon teorías sobre la fricción interna de fluidos en movimiento y derivaron la famosa ecuación de Navier-Stokes. Se trata de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Al solucionar esta ecuación se puede conocer el valor de las variables de un fluido tales como velocidad, presión, temperatura, entre otros.

Actualmente no se dispone de una solución general analítica para este conjunto de ecuaciones, salvo ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas. Debido a esto se debe recurrir al análisis numérico para determinar una solución aproximada. A la rama de la mecánica de fluidos ocupada de la obtención de estas soluciones mediante computadores se denomina dinámica de fluidos computacional (CFD, de su acrónimo anglosajón Computational Fluid Dynamics), (Orrego, 2009).

La dinámica de fluidos computacional es una de las rama de la mecánica de fluidos que usa métodos numéricos y algoritmos que pueden ser resueltos usando computadores para estudiar y analizar problemas que involucran fluidos en

movimiento, mediante la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, transferencia de calor e incluso otras reacciones químicas en el computador.

En los 90 el uso de la CFD se ha expandido de forma significativa a distintas aplicaciones y procesos industriales en los que interviene transferencia de calor, reacciones químicas (como combustión), flujos bifásicos, cambios de fase, transferencia de masa y esfuerzos al interactuar con sólidos, entre otros.

Actualmente el uso de esta herramienta ha cambiado radicalmente. Ha pasado de ser empleado solo a nivel de investigación a ser utilizado como una potente herramienta en problemas aplicados de ingeniería de carácter industrial.

1.6.1 Conceptos básicos.

La dinámica de fluidos computacional proporciona información cualitativa y cuantitativa de la predicción del flujo de fluido por medio de la solución de las ecuaciones fundamentales usando métodos numéricos.

La CFD permite a los científicos e ingenieros desarrollar “experimentos numéricos” (simulaciones computacionales) en un “laboratorio virtual” (computador). Estos experimentos permiten predecir comportamientos y conocer datos de las variables involucradas en el proceso. Por ejemplo, un diseñador requiere conocer el comportamiento aerodinámico del ala de un avión (datos de velocidades, presiones y fuerzas alrededor del ala). Con la herramienta CFD se puede “montar” un experimento virtual que permita conocer en detalle el valor y comportamiento de las variables necesarias en un determinado escenario. La información generada es importante y clave para comprobar el diseño y mejorar la eficiencia y comportamiento del ala. La Figura 6 muestra una imagen comparativa de los resultados obtenidos por métodos experimentales y métodos numéricos, sobre un mismo escenario y problema.(Orrego, 2009).

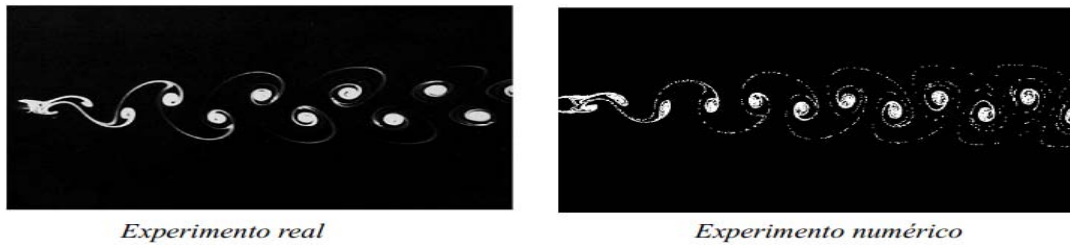


Figura 6. Vórtices de Von Karman. Kuzmin©.

1.6.2 Aplicaciones.

En la actualidad son múltiples los campos a los que se aplica la dinámica de fluidos computacional. La industria del automóvil es uno de estos campos, donde, por ejemplo, se puede simular el comportamiento aerodinámico del coche, de hecho las escuderías de fórmula uno emplean este tipo de software para mejorar el rendimiento de sus coches. También en el ámbito deportivo cabe destacar el uso en estudios aerodinámicos en el ciclismo, de diseño de embarcaciones e incluso en diseño de ropa de baño de alta competición. (Orrego, 2009).

Usando la CFD es posible construir un modelo computacional que represente un sistema o equipo que se quiera estudiar. Después se especifican las condiciones físicas y químicas del fluido al prototipo virtual y el software entregará la predicción de la dinámica del fluido. Por lo tanto, CFD es una técnica de diseño y análisis implementada en el computador. La herramienta CFD ofrece la capacidad de simular flujos de gases, líquidos, transferencia de masa y calor, cuerpos en movimiento, física multi-fases, reacciones químicas, interacción fluido-estructura y acústica a través de la modelación en el computador,(Orrego, 2009). Las posibilidades de aplicación de la CFD a distintos procesos son enormes. Algunos ejemplos son:

1. Sistemas de calefacción, ventilación, climatización y refrigeración.
2. Aeroespacial/Defensa: perfiles de alas, misiles y estudios de aerodinámica externa.
3. Industria agroalimentaria: procesado y envasado de alimentos, diseño de equipos.

4. Industria automoción: aerodinámica, combustión en motores, componentes.
5. Energía: petróleo, gas, nuclear, generación eléctrica, turbo maquinaria, células de combustible.
6. Industria química: combustión, filtración, mezcla, separadores, reactores.
7. Industria electrónica: semiconductores, enfriamiento de elementos.
8. Industria biomédica.
9. Industria naval.
10. Industrias del metal.
11. Industria deportiva: automovilismo, vela, estadios.
12. Medio ambiente.
13. Control de polvos.

1.6.3 Ventajas y Desventajas del CFD.

Si se cuenta con un dispositivo o un diseño de un sistema el cual presenta dificultades de prototipado o de realizar pruebas experimentales para comprobar y verificar su diseño, el uso de la herramienta CFD permite virtualmente conocer el comportamiento del funcionamiento interior. Existen muchos fenómenos que se pueden evidenciar a través de la CFD, que no se pueden apreciar mediante ningún otro método. La CFD ofrece un conocimiento interno más detallado de los diseños, (Orrego, 2009).

Las principales ventajas que tiene el uso de la herramienta CFD son:

- Predice el comportamiento de las propiedades del fluido con gran detalle en el dominio estudiado.
- Ayuda al diseño y al prototipaje y soluciones rápidas evitando costosos experimentos.
- Se obtiene una visualización y animación del proceso en términos de las variables del fluido.

Entre las principales desventajas que se pueden mencionar del uso de estas tecnologías se encuentran las siguientes:

- Requiere usuarios con amplia experiencia y formación especial.

- Consume recursos de hardware y software que requieren inversiones iniciales significativas.
- En algunos casos, el costo computacional es elevado.

1.6.4 Metodología de trabajo del CFD.

Una simulación numérica está compuesta por 3 etapas: pre procesamiento, procesamiento y pos procesamiento. Durante la etapa de pre procesamiento se genera la geometría, el enmallado y configuración de la simulación. Durante la etapa de procesamiento se resuelven numéricamente las ecuaciones fundamentales y la etapa de pos procesamiento está definida por la visualización y análisis de resultados.

Una simulación CFD comienza con la modelación geométrica CAD (Diseño Asistido por Computadoras) del dominio a analizar, es decir representar en el computador la geometría de lo que se quiera simular. Este dominio representa el fluido sobre el cual se quiere tener información, analizar y predecir el comportamiento. Actualmente existen diversos softwares comerciales especializados únicamente en generar modelaciones CAD. Algunos de ellos son: Pro Engineer, Catia, Solid Works, Solid Edge, AutoCAD, etc.

Una vez se tenga el dominio computacional o modelo CAD del fluido, éste se discretiza o divide espacialmente en celdas para formar una malla o grilla. Las mallas pueden ser regulares, definidos por celdas en formas de triángulos (2D) o en tetraedros (3D), o pueden ser regulares definidos por celdas en formas de cuadrado (2D) o hexaedros (3D). Las propiedades físicas del fluido, tales como temperatura o velocidad, son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales. Un mayor número de elementos necesita mayor capacidad computacional. La Figura 7. muestra el resultado de discretización (mallado) de los componentes de una turbina Francis, realizado con un software llamado ICEM CFD, (Orrego, 2009).

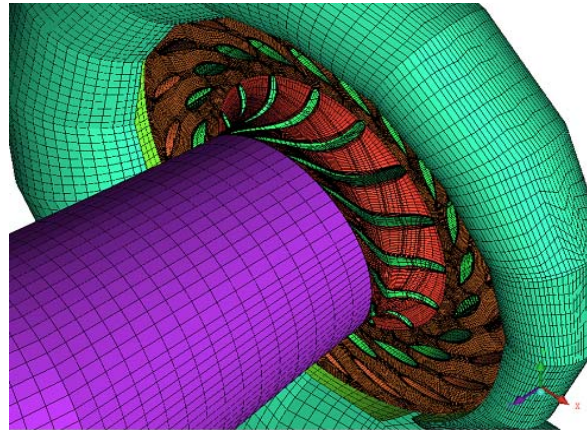


Figura 7. El mallado regular de una turbina Francis. (Mecánica Aplicada EAFIT©.)

Luego de dividir el modelo geométrico en celdas se procede a generar la configuración de la simulación. Esto significa establecer materiales, velocidades en el contorno de la geometría, modelos adicionales para el análisis, etc.

Una vez terminada la etapa de pre procesamiento continúa la etapa de solución de las ecuaciones. Los tiempos de cómputo dependen de varios factores: número de elementos, especificaciones del equipo usado, configuración de la simulación. Posterior a la solución se analizan los resultados, se toman decisiones y por lo general se procede a realizar otras simulaciones para evaluar el comportamiento de algún valor en función de la variación de determinados parámetros. (Orrego, 2009).

1.6.5 Simulaciones vs. Experimentos – Validación.

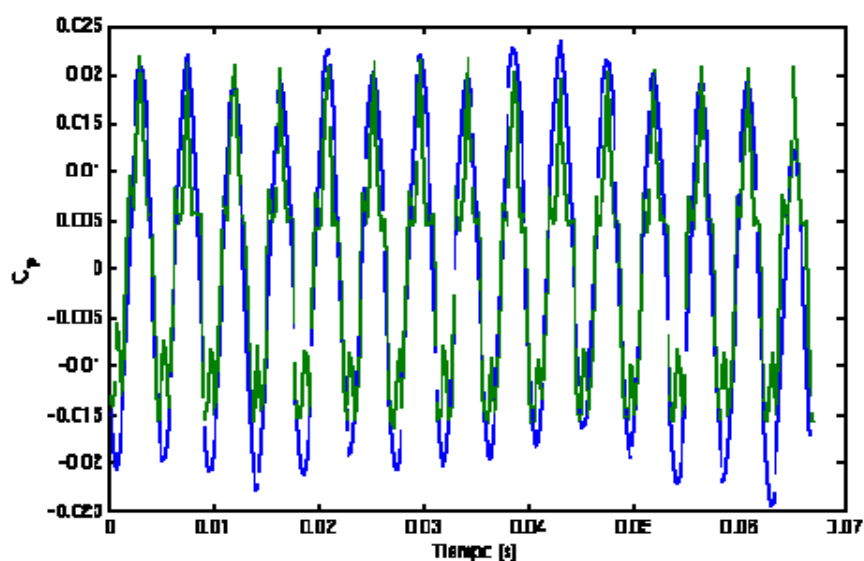
Existen una multitud de dificultades que se han de afrontar antes de obtener una buena solución.

En primer lugar no se puede perder de vista que la solución debe de ser acorde a la realidad. De nada sirve una “bonita” solución si no se aproxima a los experimentos físicos reales. Es por esto que cualquier simulación numérica debe buscar un método de validación experimental y/o analítica. De nada sirve visualizar campos de presiones y velocidades, si los datos plasmados en la respuesta son falsos.

Por esta razón la CFD se conoce jocosamente como Color Fluid Dynamics. Es altamente recomendando que cualquier simulación numérica lleve un proceso de validación y control de calidad de resultados. Esto garantiza la confiabilidad de los datos obtenidos.

La tendencia de la industria mundial al utilizar este tipo de herramientas es utilizar siempre ambos métodos de diseño, pruebas experimentales y simulaciones numéricas; las pruebas experimentales necesitan de simulaciones numéricas y viceversa, obteniendo los mismos resultados.

Comparaciones de aplicaciones industriales manifiestan que se alcanzan porcentajes de error hasta de 10%; un valor bastante aceptado a la hora de diseñar y proponer procesos de optimización. La Figura 8 muestra un gráfico de presión vs tiempo para un punto espacial de una turbina Francis. Se realizó una simulación de su comportamiento y se halló la presión en determinado lugar. Adicional a esto se hizo una medición de presión y se obtuvo su valor. Ambos datos se compararon. Se puede ver la gran concordancia de datos, (Orrego, 2009).



Azul experimental – Verde numérico

Figura 8. Comparación de datos experimentales y numéricos. (Mecánica Aplicada EAFIT©.)

Una vez que el modelo de la CFD es validado (calibrado) mediante cualquier método es posible entonces reproducir cualquier escenario requerido para los diseñadores o analistas. Esto aumenta el espectro de soluciones requeridas, de una manera más económica que implementar un banco experimental avanzado, (Orrego, 2009).

1.7 Método de elementos finitos.

El método de elementos finitos se ha impuesto para la mayoría de los casos prácticos. A partir de su consolidación en el área de Mecánica de Sólidos, el método se extendió a otras áreas de la física, tales como la mecánica de fluidos, la transferencia de masa y calor, el electromagnetismo.

El análisis de elementos finitos, permite la construcción de diseños enteros, su refinación y la optimización de éstos antes de que el diseño sea manufacturado. Esta poderosa herramienta de diseño ha mejorado en gran forma, ambos, el estándar de diseños en ingeniería y la metrología del proceso del diseño en muchas aplicaciones industriales. La introducción del análisis de elementos finitos ha reducido el tiempo que se toma para llevar productos desde el concepto hasta la línea de producción. A través de la mejora de diseños de prototipos iniciales usando el análisis de elementos finitos se han acelerado, principalmente, las pruebas y el desarrollo. En resumen, los beneficios del análisis de elementos finitos son: una alta precisión, diseño mejorado, y una mejor percepción de los parámetros críticos de diseño, prototipos virtuales, menos prototipos de hardware, y ciclo de diseño más rápido y económico, alza en la productividad y en las ganancias.

El desarrollo y obtención de estructuras formadas por piezas constituye una de las partes más importantes en el trabajo de ingenieros y arquitectos. Las tareas de desarrollo de la estructura de las piezas están indisolublemente vinculadas con el desarrollo técnico de las máquinas en general. Debe entenderse como estructura la parte de una construcción o artefacto mecánico, encargada de mantener su forma ante acciones exteriores de todo tipo (fuerzas, variaciones de temperatura, movimientos impuestos, etc.).

1.8 Flow Simulation.

Flow Simulation es ampliamente usado en muchas industrias y para aplicaciones diversas, dónde la optimización del diseño y el análisis de rendimiento son sumamente importantes, como válvulas y reguladores, los componentes hidráulicos y neumáticos, los cambiadores de calor, las partes automotoras, la electrónica y muchos otros. (SolidWorks, 2013)

1.8.1 Capacidades de Flow Simulation.

Como se basa en avanzadas técnicas de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite analizar una amplia gama de flujos complejos con las siguientes características: (SolidWorks, 2013)

- Análisis en dos y tres dimensiones.
- Flujos externos e internos.
- Flujos en estado estacionario y transitorio.
- Líquido incompresible y flujos de gas compresible, incluyendo los regímenes subsónico, sónico y supersónico.
- Líquidos no newtonianos. Régimen laminar.
- Líquidos compresibles * (densidad del líquido depende de la presión).
- Flujos laminares y turbulentos.
- Remolinos y ventiladores.
- Flujos de mezclas.
- Flujos con transferencia de calor dentro y entre los líquidos y sólidos (transferencia de calor conjugada) * Versión Professional.
- Radiación de superficie a superficie * (incluyendo la calefacción solar).
- Flujo con efectos gravitacionales (también conocido como los efectos de empuje).
- Medios porosos.
- Flujos con gotas de líquido o partículas sólidas.
- Paredes con rugosidad.
- Movimiento tangencial en las paredes (traslación y rotación).

1.8.2 Flow Simulation teoría de fondo.

Resuelve las ecuaciones que rigen el fluido usando el método de los volúmenes finitos (FV) en lugar del método de elementos finitos.

- Se cumplen las ecuaciones de conservación.
- Conservación de la masa (ecuación de continuidad).
- La segunda ley de Newton del movimiento (ecuación del momento).

- La primera ley de la termodinámica (ecuación de conservación de la energía).
- Ecuaciones de transporte se utilizan para la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación.

En una malla computacional espacial rectangular diseñada en el sistema de coordenadas cartesianas. Con los planos ortogonales a los ejes y refinado localmente en la interfaz sólido/líquido. Y si es necesario, además, en las regiones líquidas especificadas, en las interfaces sólido/sólido y en la región líquida durante el cálculo.

Los valores de todas las variables físicas se almacenan en los centros de la malla. Las ecuaciones que gobiernan el flujo son discretizadas en forma conservativa. Las derivadas espaciales se aproximan con operadores de diferenciación implícita de segundo orden de exactitud.

Se utiliza un modelo laminar/turbulento para describir los flujos de capa límite de las regiones cerca de la pared. El modelo se basa en el llamado enfoque Modificado de las Funciones de la Pared.

Este modelo se emplea para caracterizar flujos laminares y turbulentos cerca de las paredes, y para describir la transición de flujo laminar a turbulento, y viceversa. (SolidWorks, 2013)

1.8.3 El proyecto de Flow Simulation.

Cada proyecto se asocia con una configuración de Solid Works. Mediante la modificación del proyecto de Flow Simulation se puede analizar el flujo bajo diferentes condiciones y para modelos modificados de Solid Works. Cuando se crea un proyecto aparece a la derecha de la ficha Administrador de configuración de Solid Works una nueva ficha de diseño Árbol Flow Simulation. Puede utilizar el gestor de diseño para especificar los datos restantes del proyecto, tales como condiciones de contorno, condiciones iniciales, las fuentes de calor, las condiciones materiales y objetivos.

- Para crear un proyecto, debe definir lo siguiente:
 - El nombre del proyecto.
 - Un sistema de unidades.

- Un tipo de análisis (externo o interno).
- El tipo de fluido (gas, líquido incompresible, líquido laminar no newtonianos o líquidos compresibles).
- Para crear un proyecto, también se debe definir lo siguiente (si procede):
 - Las sustancias (líquidos y sólidos).
 - Las condiciones iniciales y ambientales.
 - La resolución de la geometría y la resolución de los resultados.
 - Un valor de rugosidad de la pared.
 - Las características físicas incluyen la transferencia de calor en los sólidos, efectos de grandes números de Mach para flujo de gas, los efectos gravitatorios, efecto del tiempo, radiación de superficie a superficie y si el flujo es laminar solamente.
 - Condiciones por defecto de la pared, por ejemplo, pared adiabática, si la transferencia de calor en los sólidos no se considera.
 - Condiciones térmicas por defecto de la pared exterior en caso de un análisis interno con transferencia de calor.
 - Condiciones de radiación por defecto de la pared en el caso de radiación superficie-superficie

Condiciones de frontera en la pared.

Las condiciones de contorno de la velocidad por defecto en las paredes sólidas se corresponde con la condición de no deslizamiento (velocidad tiende a cero en la pared). La condición "Pared Ideal" también está disponible. Por ejemplo, paredes ideales se pueden utilizar para modelar planos de simetría del flujo.

Resultados de Flow Simulation.

- Gráficos de resultados (Cualitativos).
 - Vectores, curvas de nivel, isolíneas.
 - Gráficos de corte, de superficie, trayectorias de flujo, isosuperficies.
- Resultados procesados (Cuantitativos).
- Excel.
- Parámetros de Gráficos X-Y (Excel).
- Objetivos (la superficie).

- Parámetros de los puntos.
- Informes.
- Temperatura de referencia del fluido.

Capítulo 2. Procedimiento para la evaluación de la pérdida de carga durante la transportación por tuberías del Cieno Carbonatado.

En el ISMMM desde varios años se realizan estudios en caminados al tema del hidrotransporte de fluidos y en particular de aquellos que presentan un comportamiento no newtoniano. Las experimentaciones son realizadas en una instalación a escala semi-industrial que se encuentra en el instituto, pero para poder llevar acabo las mismas necesitan grandes volúmenes del material en estudio además el consumo eléctrico es elevado lo que dificulta en varias ocasiones la realización de las pruebas.(Ver Figura 9) Teniendo en cuenta las capacidades que brinda el software Solid Works; que forma parte del programa de estudio de nuestra carrera, se planteó la necesidad de elaborar un procedimiento que permita la evaluación de la pérdida de carga durante el hidrotransporte del Cieno Carbonatado por tuberías mediante su simulación.

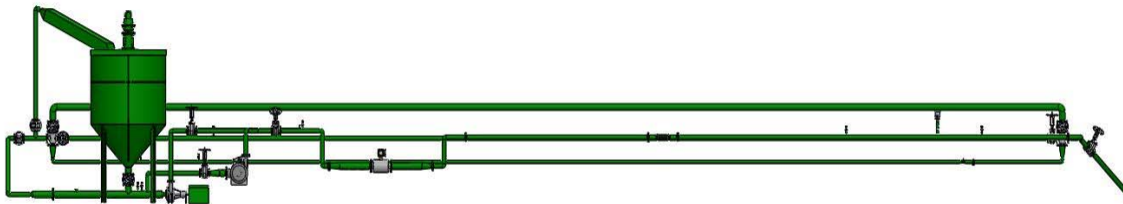


Figura 9. Instalación semi- industrial del ISMMM. (Salermo, 2014).

2.1 Selección de los parámetros reológicos del Cieno Carbonatado.

Para la simulación del transporte por tuberías del Cieno Carbonatado se seleccionó una mezcla con un 30% de sólido la cual, como se aborda en el Capítulo1 muestra un comportamiento no newtoniano y se ajusta al modelo Plástico ideal o Plástico Bingham (ver ecuación 1.2), en la Figura10 se muestra la curva de flujo obtenida con los datos experimentales de esfuerzo de corte (τ) en función de gradiente de velocidad ($\dot{\gamma}$), para esta mezcla.

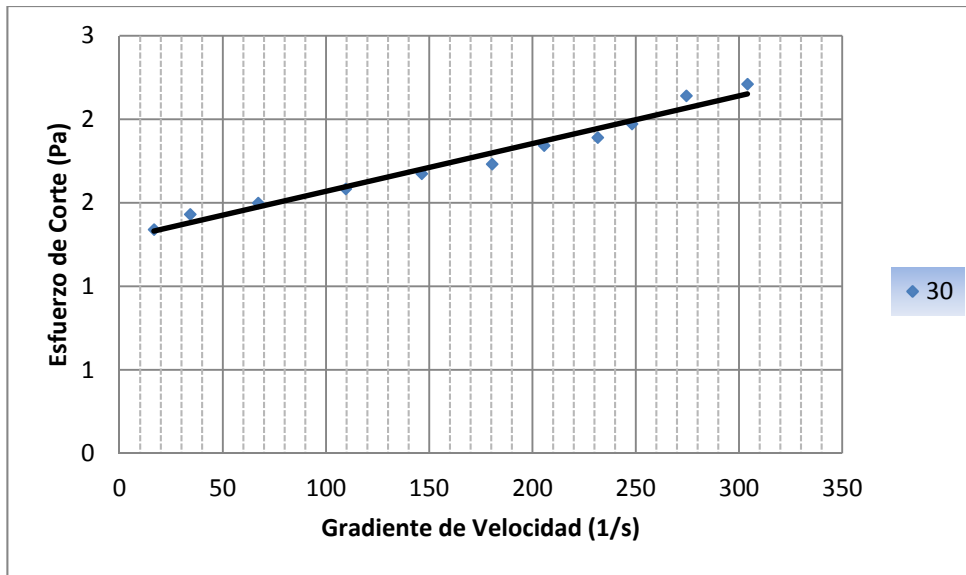


Figura 10. Curva de Flujo del Cieno Carbonatado con un 30% de sólido. (Laurencio, 2012; Martínez R. , 2014).

Al realizar el ajuste de la curva con la línea de tendencia se obtuvo el siguiente modelo ajustado para este caso, con un valor de coeficiente de correlación del ajuste del modelo reológico R^2 igual a 0.674 por lo que se considera satisfactorio el ajuste del modelo a los datos experimentales.

$$\tau_{xy} = 1,2835 + 0,0029 \left(\frac{dv_x}{dy} \right)$$

De la ecuación anterior podemos obtener los parámetros reológicos que se necesitan para la simulación del Cieno Carbonatado; los que muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros reológicos del Cieno Carbonatado con un 30% de sólido.

Parámetros	Contenido de sólido:30%
τ_o (Pa·s)	1,2835
μ_p (adim)	0,0029

2.2 Realización de las mediciones en la instalación semi-industrial del ISMMM

Los datos iniciales para la simulación se tomaron de los experimentos realizados en la instalación del ISMMM con una pulpa de Cieno Carbonatado a un 30 % de sólido, en una tubería de diámetro 100 mm. La variación de la velocidad del fluido se realizó mediante el método de regulación de frecuencia (variador de velocidad) obteniendo un caudal en un rango de 0.028 a 0.006 m³/s.

Las pérdidas de presión en la zona a investigar se midió con transmisores de 0-5 mA, los cuales captan la presión, la transforman en energía eléctrica, y envían la señal para el autómata programable (PLC), el cual registra la información de los valores de presión medido en cada punto.

La instalación consta de equipos y accesorios que permiten mayor calidad en el registro y control de las variables y su procesamiento posterior, mediante el programa de adquisición de datos CitectSCADA. (Figura 11.)

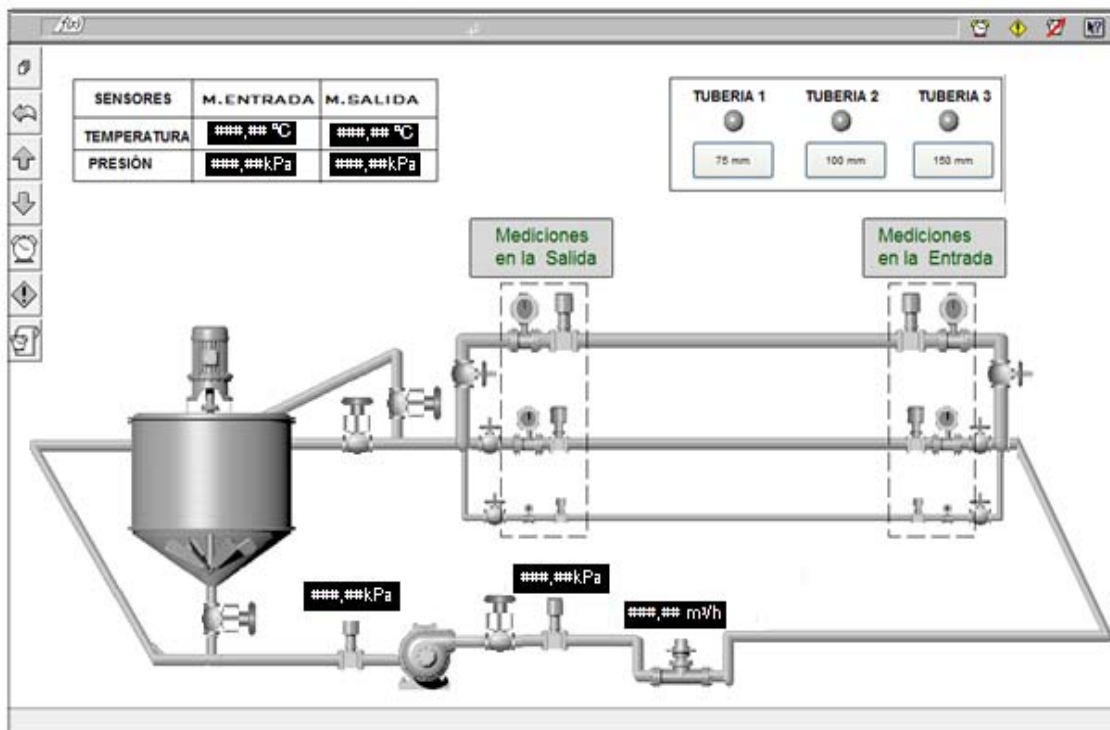


Figura 11. Esquema del sistema CitectSCADA para la estación experimental de hidrotransporte del Instituto Superior Minero Metalúrgico.

Tabla 9. Valores de presión recogidos en la prueba realizada en la instalación del ISMMM.

	No	Q(m ³ /s)	P2(Pa)	P1(Pa)	ΔP(Pa)
30% de sólido	1	0.028	29883	38482	8599
	2	0.027	29030	36738	7708
	3	0.025	28036	35292	7256
	4	0.023	25708	32426	6718
	5	0.021	25032	30936	5904
	6	0.017	23566	28072	4506
	7	0.014	20918	24558	3640
	8	0.011	19630	22354	2724
	9	0.009	18370	20413	2043
	10	0.006	15928	17314	1386

La Tabla 9 muestra los valores de presión obtenidos en dos puntos a una distancia de 16 m uno del otro; ambos alejados adecuadamente de los accesorios para evitar la influencia de las perturbaciones causadas por los mismos. Estos datos serán utilizados para la validación de la simulación con el uso del Flow Simulation y así confirmar la veracidad de los resultados.

2.3 Determinación del coeficiente de viscosidad de remolino.

Entre las capacidades del Flow Simulation se encuentra el análisis de los fluidos no newtonianos pero está restringido solo para el caso de flujos que se encuentren en el régimen laminar y en las aplicaciones prácticas de la ingeniería es mucho más frecuente el régimen turbulento por lo que se tuvo en cuenta el efecto de la viscosidad de remolino al introducirlo en los parámetros al definir las propiedades del fluido para la simulación.

Al tener en cuenta viscosidad de remolino en la simulación se logra minimizar los errores de la simulación con respecto a los valores obtenidos en los estudios experimentales.

Al despejar la viscosidad de remolino de la ecuación 1.7 se obtiene:

$$\eta = \left(\frac{\tau - \tau_0}{\dot{\gamma}} \right) - \mu_p \quad (2.1)$$

Donde:

T: Esfuerzo cortante (Pa*s)

To: Esfuerzo cortante inicial (Pa*s).

$\dot{\gamma}$: Gradiente de velocidad (1/s).

μ_p : viscosidad plástica (adm).

$$\tau = \frac{D * \Delta P}{4 * L} \quad (2.2)$$

Donde:

T: Esfuerzo cortante (Pa*s).

D: diámetro de la tubería (m).

ΔP : Caída de presión (Pa).

L: longitud de la tubería (m).

Esta ecuación es independiente de la naturaleza reológica del fluido.

Para los plásticos Bingham, a partir de la ecuación de movimiento se obtiene

la expresión de $\dot{\gamma}$ siguiente:

$$\dot{\gamma} = \frac{\left(1 - \frac{\tau_0}{\tau} \right)}{\left[1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_0}{\tau} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau} \right)^4 \right]} \left(\frac{8 \langle v \rangle}{D} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

T: Esfuerzo cortante (Pa*s).

To: Esfuerzo cortante inicial (Pa*s).

D: Diámetro de la tubería (m)

v: Velocidad (m/s)

Los valores de viscosidad plástica y esfuerzo cortante inicial se encuentran en la Tabla 8 los cuales fueron obtenidos por los estudios reológicos realizados anteriormente.


En la Tabla 10 se muestran los resultados de los cálculos realizados para la determinación de la viscosidad de remolino en los casos de estudio.

Tabla 10. Resultados del cálculo de la viscosidad de remolino.

No	Q(m³/s)	Velocidad(m/s)	Gradiente de velocidad $\dot{\gamma}$ (1/s)	Esfuerzo cortante τ_0 (Pa*s)	Viscosidad de remolino dinámica
1	0.028	0.04827246	3.86179662	3.695313	0.0028543
2	0.027	0.04654844	3.72387531	3.596875	0.0026202
3	0.025	0.04310041	3.44803269	3.415625	0.0026438
4	0.023	0.03965238	3.17219008	3.206250	0.0026330
5	0.021	0.03620434	2.89634746	3.062500	0.0024849
6	0.017	0.02930828	2.34466223	2.710938	0.0022232
7	0.014	0.02413623	1.93089831	2.584375	0.0020631
8	0.011	0.01896418	1.51713439	2.190625	0.0017689
9	0.009	0.01551615	1.24129177	1.996875	0.0013832
10	0.006	0.0103441	0.82752785	1.725000	0.0009484

2.4 Simulación del hidrot transporte por tuberías del Cieno Carbonatado.

Para la realización de la simulación del transporte de fluidos por tuberías con el uso del software Solid Works hay que tener activado el módulo Flow

Simulación; si no, se activa en la barra de menú / opciones  / complementos. (Ver Figura 12.)

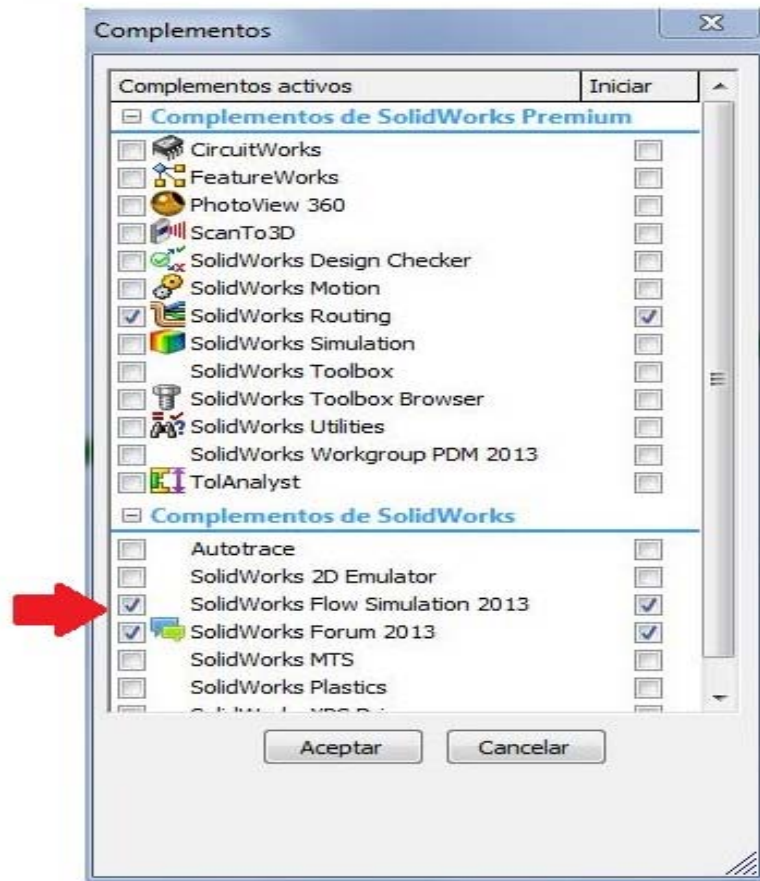


Figura 12. Complementos del Solid Works.

2.4.1 Modelación geométrica de la instalación o la tubería

La primera etapa es donde se realiza la modelación geometría del sistema; aquí se tiene en cuenta los parámetros dimensionales de la tubería:

- Longitud
- Diámetro
- Espesor
- Tipo de material

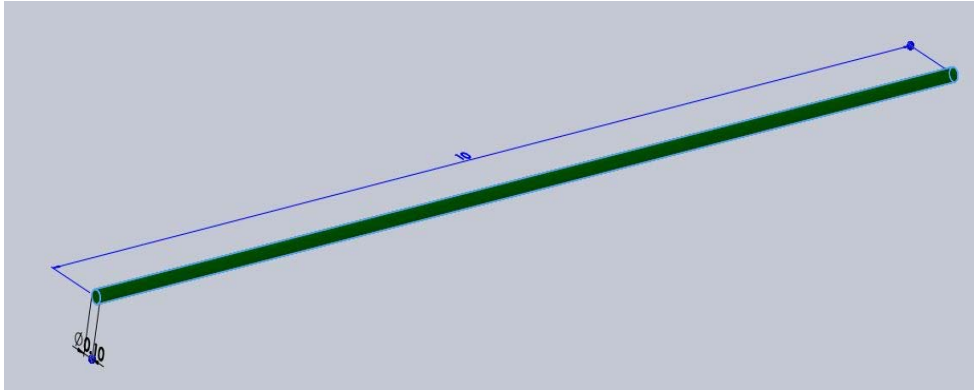


Figura 13. Geometría de la tubería modelada en el Solid Works.

2.4.2 Editar el fluido en la base de datos de ingeniería del Flow Simulation

Para editar el fluido con el cual se va a trabajar hay que dirigirse en la barra de herramientas / Flow Simulation/ Herramientas (Tools)/ Base de datos de ingeniería (Engineering Database).

Dentro de la base de datos se selecciona materiales/líquidos no newtonianos/ definidos por el usuario/ nuevo producto.

En las propiedades del fluido se introducen los valores de los parámetros que se muestran:

- Nombre
- Densidad
- Calor específico
- Conductividad térmica
- Coeficiente de consistencia (K)
- Esfuerzo cortante (T_0)
- Índice de flujo (n)

Siempre que se termine de editar un fluido se guarda.

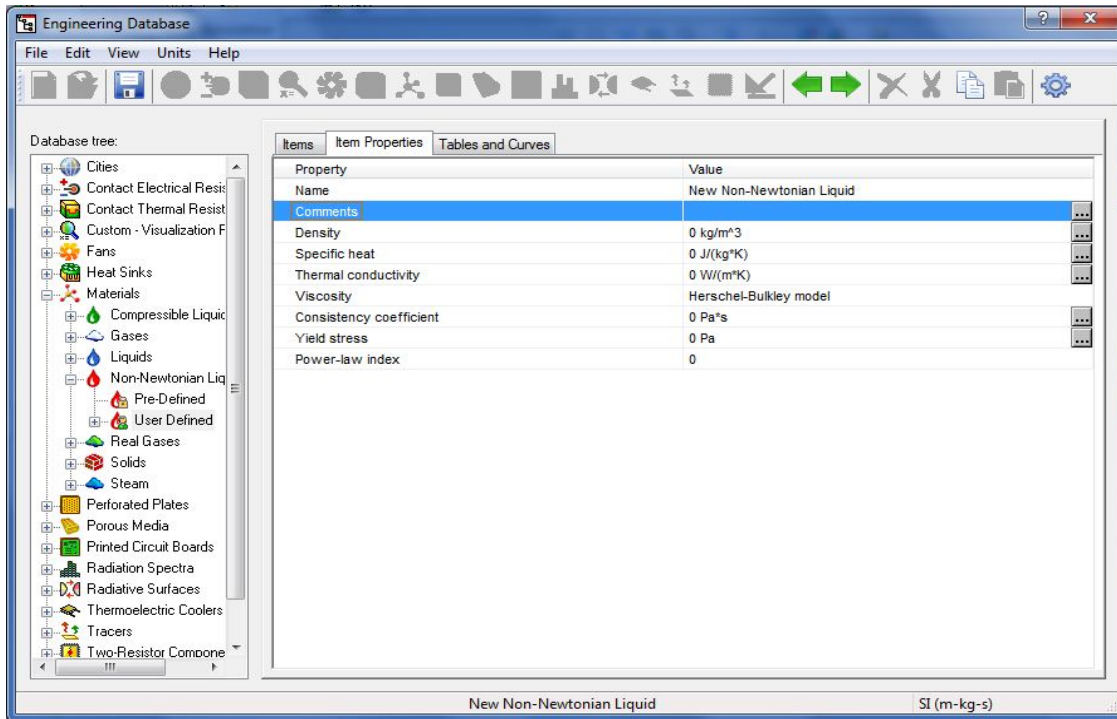


Figura 14. Base de datos de ingeniería.

Para el caso de los fluidos no newtonianos que se ajustan al modelo de plásticos ideales como es el Cieno Carbonatado, en el parámetro Índice de flujo se establece el valor 1; puesto que le Solid Works reconoce el modelo plástico Bingham como un caso especial del modelo Bulkley - Herschell y al tomar $n=1$ el coeficiente de consistencia (k) pasa a ser automáticamente la viscosidad plástica (ver ecuaciones 1.2 y 1.3) (Ver anexo 2).

Como se planteó anteriormente el Flow Simulation solo realiza el análisis de los fluidos no newtonianos en el régimen laminar por lo que al editar los parámetros del Cieno Carbonatado en la base de datos del Software tuvo en cuenta del valor de la viscosidad de remolino en el parámetro de viscosidad plástica.

Al sumarle al valor de viscosidad plástica del Cieno Carbonatado, $0.0026\text{Pa}\cdot\text{s}$, los valores de viscosidad de remolino se obtiene los valores recogidos en la siguiente Tabla.

Tabla11. Valores de la viscosidad del sumarle la viscosidad de remolino

No	Viscosidad de remolino dinámica (Pa*s)	Viscosidad total (Pa*s)
1	0.0028543	0.0057543
2	0.0026202	0.0055202
3	0.0026438	0.0055438
4	0.0026330	0.0055330
5	0.0024849	0.0053849
6	0.0022232	0.0051232
7	0.0020631	0.0049631
8	0.0017689	0.0046689
9	0.0013832	0.0042832
10	0.0009484	0.0038484

Como la viscosidad de remolado depende de la velocidad del fluido ahora se tendrá para cada caudal utilizado en la simulación, un valor de coeficiente de consistencia; esto conlleva a que en cada caso se tendrá un fluido con características particulares, por lo que se tendrán que editar tantos fluidos como simulaciones se realicen.

Posterior a editar el fluido se continua con la creación del proyecto en Flow Simulation, para ello se recurre a Flow Simulation /Project (Proyecto) / Wizard. Se crea un nuevo proyecto y una carpeta donde se guardan todos los datos.

2.4.3 Pasos para la creación de un nuevo proyecto en Flow Simulation.

Paso 1: En Nombre del proyecto (Project name) se introduce el nombre del estudio. / Siguiente (next).

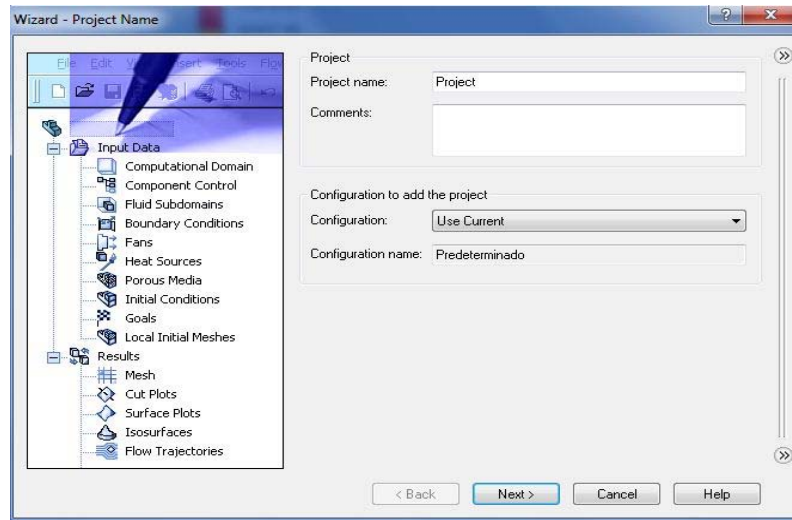


Figura 15. Nombre del proyecto.

Paso 2: Selección del sistema de unidad de medida con el que se desea trabajar. / Siguiente (next). El los estudios realizados de seleccionó el sistema internacional de unidades.

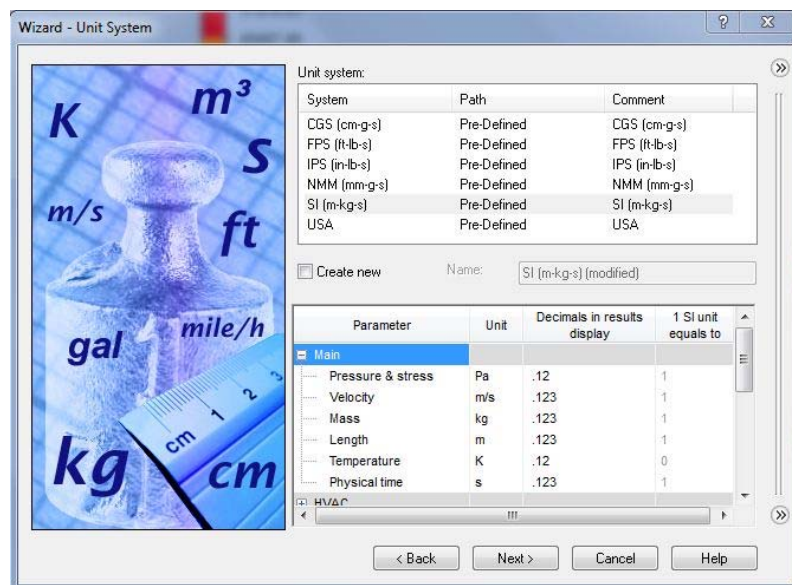


Figura 16. Sistema de unidades de medida.

Paso 3: Selección del tipo de análisis que se va a realizar: interno o externo. / Siguiendo (next). Para el estudio del transporte de fluidos por tuberías el tipo de análisis es interno.

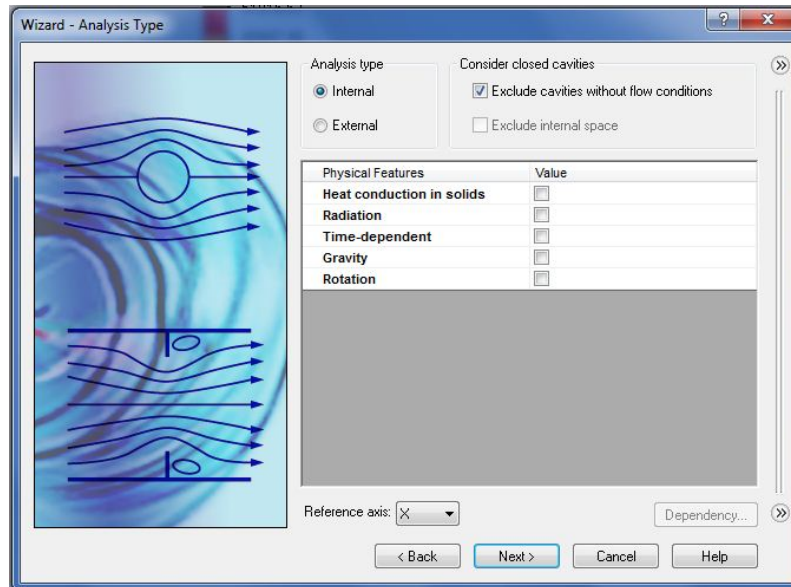


Figura 17. Tipo de análisis.

Paso 4: Selección del fluido que se simulará. / Add / Siguiendo (next). Los fluidos seleccionados fueron los Cienos Carbonatados correspondientes a cada uno de los casos.

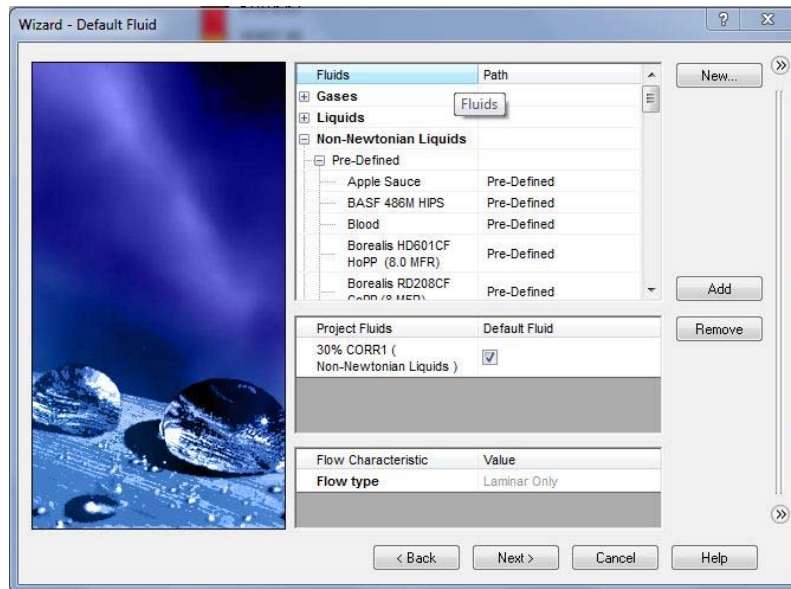


Figura 18. Selección del fluido.

Paso 5: Condiciones de la pared. / Siguiete (next).

En las condiciones de la pared seleccionaron los valores por defecto del software.

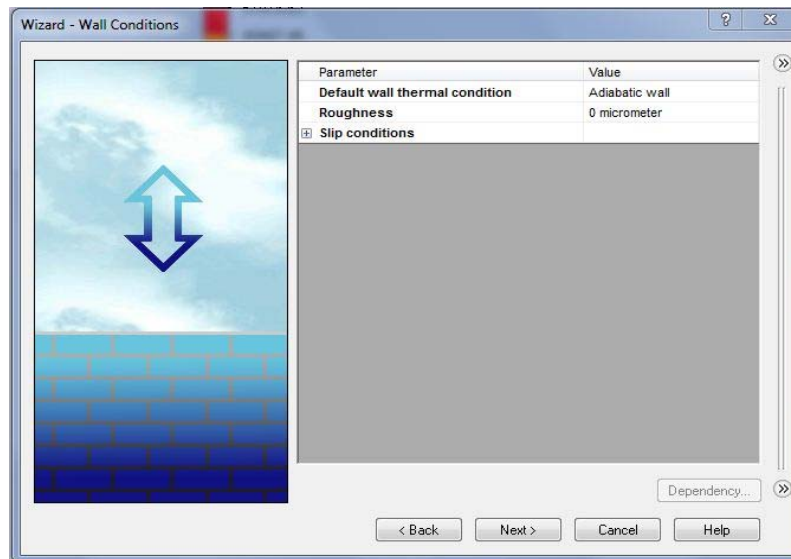


Figura 19. Condiciones de la pared.

Paso 6: Condiciones iniciales. / Siguiete (next).

Se tomaron como valores iniciales los atmosféricos, tanto presión como temperatura.

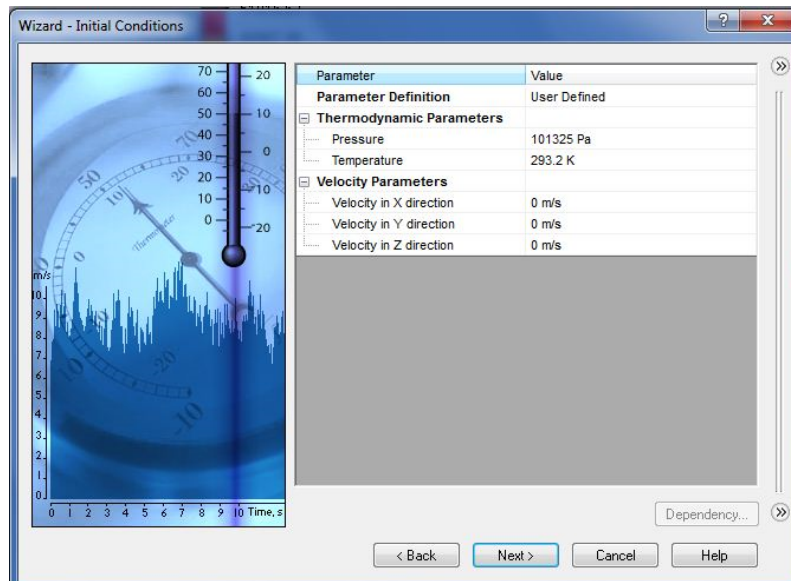


Figura 20. Condiciones iniciales.

Paso 7: En este paso se determina el tamaño de la malla y la resolución de los resultados/ Fin (Finish).

En la escala de resolución de los resultados se tomó el tercer grado y el tamaño de la malla la sugerida por el software.

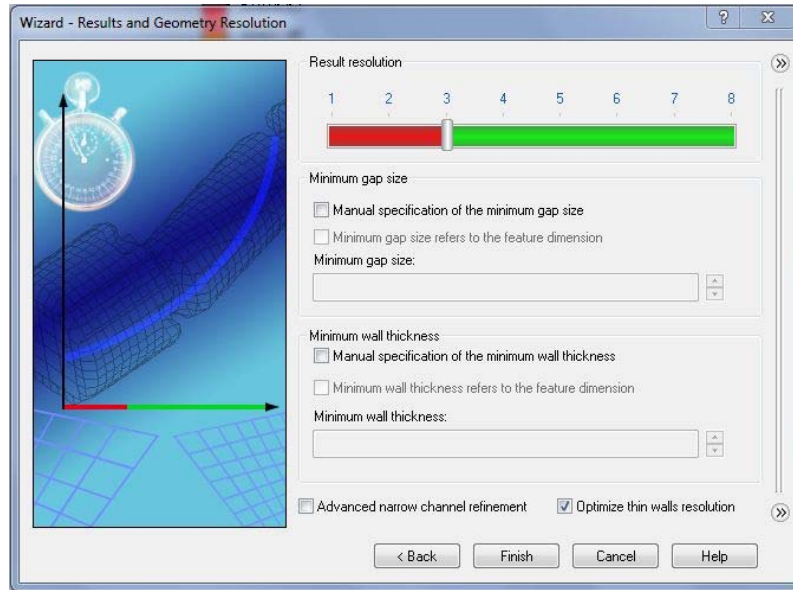


Figura 21. Resolución de resultados y mallado.

Como el estudio realizado es interno, el volumen donde se encuentra el fluido tiene que estar totalmente cerrado por lo que en los extremos de la tubería se crean dos tapas.

Al concluir con la creación del proyecto automáticamente se crea el Dominio Computacional. Este es el volumen que encierra el fluido al que se le realizará el estudio. (Ver Figura 22).

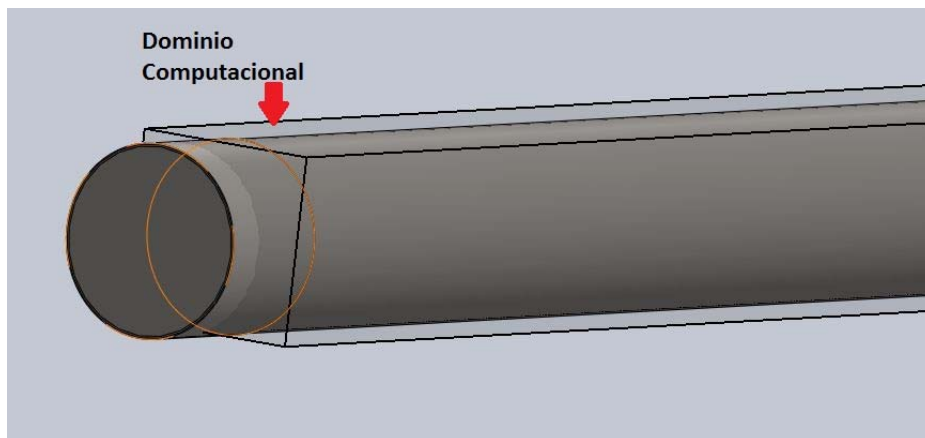





Figura 22. Dominio computacional.

2.4.4 Determinación de las condiciones de frontera

El siguiente paso es definir las Condiciones de Fronteras (Boundary Conditions). en el caso de la simulación de transporte de fluidos por tuberías se realiza de la siguiente forma:

- En la cara interior de unas de las tapas se fija la presión se salida. 
(Ver Figura 23)
- En la cara interior de la otra tapa se fija el valor de la velocidad o el caudal del flujo en estudio. seleccionando la opción que indica la dirección del flujo que entra a la tubería.  (Ver Figura 24).
- Especificar la rugosidad superficial de las paredes de la tubería. 

Otra forma de definir las condiciones de frontera es cambiando la dirección del flujo por lo que al definir el valor de presión este sería el de entrada y al seleccionar la dirección del flujo al especificar la velocidad o el caudal del mismo este sería de salida

Para la simulación del transporte de Cieno se tomaron los valores de presión arrojados por los estudios experimentales realizados en la instalación del ISMMM.

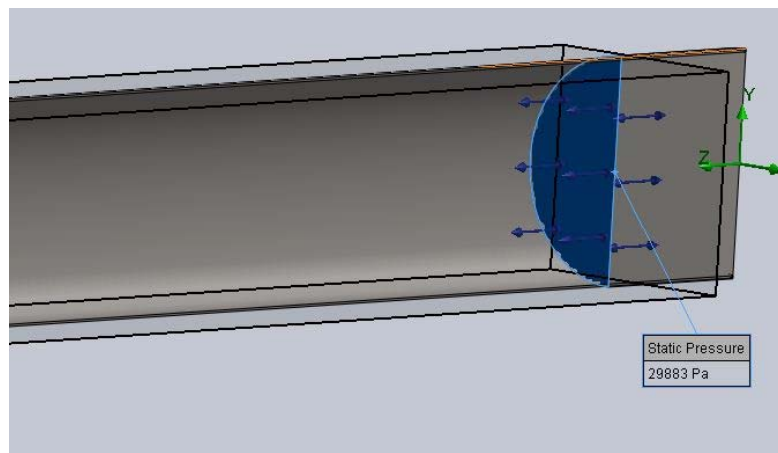


Figura 23. Condición de frontera. Salida.

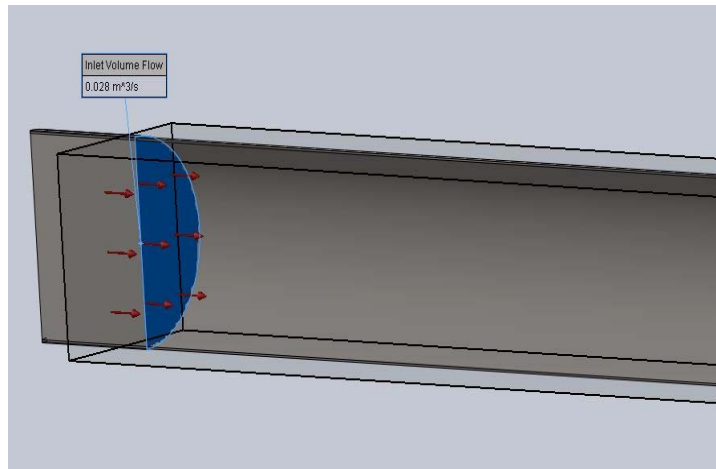


Figura 24. Condición de frontera. Entrada.

En el caso de los fluidos no newtonianos no existen suficientes evidencias del efecto de la rugosidad de la pared del tubo sobre el coeficiente de fricción en flujo turbulento; dado que la subcapa laminar, es más gruesa en los fluidos no newtonianos que en los newtonianos (Macedo, 2001). Es por ello que la mayoría de los autores desprecian el efecto de la rugosidad en el flujo no newtoniano, y consideran como si el flujo tuviera lugar a través de tubos lisos.

Por estas razones se deja a consideración personal la especificación de la rugosidad superficial de las paredes de la tubería.

2.4.5 Selección de las metas de ingeniería

Al terminar con este paso se procede a puntualizar las metas de Ingeniería (Goal): se especifican las metas de las superficies para la presión total promedio en la entrada y en la salida; en ambos casos en la cara interiores de las tapas que delimitan la zona de simulación.

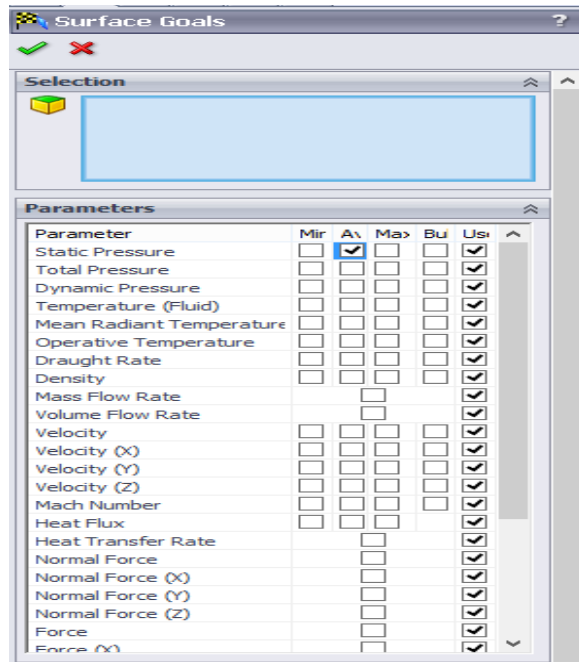


Figura 25. Metas de las superficies.

Después de determinar las metas de ingeniería se corre el estudio es cuando el software realiza la malla y los cálculos, todos estos datos son almacenados en una carpeta.

2.4.6 Obtención de los resultados

Flow Simulation provee información acerca del proyecto, especificaron características físicas, así como también número de iteraciones y los valores mínimos y máximos de presión, la velocidad, la temperatura, la densidad entre otros. Cuenta con varias herramientas para mostrar estos datos.

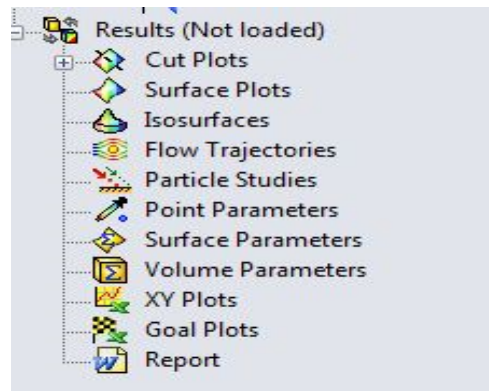


Figura 26. Herramientas para obtener los resultados.

En los estudios realizados para la simulación del transporte del Cieno Carbonatado se usó Corte de Planos (Cut Plot); esta herramienta muestra los resultados en una cara o plano seleccionado, con escalas de colores, isolina, vectores entre otros, en el caso de estudio se seleccionó un plano transversal a todo lo largo de la tubería.

Otra herramienta que se utilizó fue Puntos de Parámetros (Point Parameters) donde se especifican los puntos para los cuales usted quiere evaluar valores de parámetros. En los estudios realizados se seleccionó la opción de Patrón (Pattern); ya que los puntos son uniformemente distribuidos sobre el plano seleccionado; se tomaron puntos cada un metro de la tubería para visualizar mejor el comportamiento de la presión a lo largo de la misma. Estos datos se exportan a Excel en forma de Tabla al seleccionar Exportar a Excel (Export to Excel). (Ver anexo 3)

2.5 Análisis de los resultados de la simulación.

Para el estudio de la caída de presión durante la hidrotransportación por tuberías del Cieno Carbonatado se realizaron 10 estudios donde se varió el caudal desde 0.028 a 0.006m³/s, en una tubería con un diámetro de 0,1m y con una pulpa de Cieno Carbonatado de un 30 % de sólido.

Tabla 12. Comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos en la simulación

No	Q(m ³ /s)	P2(Pa)	P1(Pa)(Moa)	P1(Pa)(sw)	ΔP(Pa)(Moa)	ΔP(Pa)(sw)	E _(sw-moa) %
1	0.028	29883	38482	37394	8599	7511	12.65
2	0.027	29030	36738	35851	7708	6821	11.51
3	0.025	28036	35292	34412	7256	6376	12.13
4	0.023	25708	32426	31428	6718	5720	14.86
5	0.021	25032	30936	30060	5904	5028	14.84
6	0.017	23566	28072	27617	4506	4051	10.10
7	0.014	20918	24558	24108	3640	3190	12.36
8	0.011	19630	22354	22044	2724	2414	11.38
9	0.009	18370	20413	20197	2043	1827	10.57
10	0.006	15928	17314	17160	1386	1232	11.11

La confirmación de la validez de los valores de la simulación con los experimentales se desarrolla a través del error relativo, o sea, el módulo de la diferencia entre el valor de la caída de presión de la simulación y el valor de la caída de presión de los experimentos obtenidos para las mismas condiciones

El error relativo puntual se calcula por la siguiente expresión:

$$E_p = \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot 100 \quad (2.4)$$

Al realizar el examen de los errores y sus posibles fuentes de determina que influyen los siguientes factores:

- ✓ Características de los instrumentos de medición, que en algunos casos pueden ser de menor precisión y la calibración de los mismos.
- ✓ Perturbaciones que puedan ocurrir en las variables prefijadas durante las mediciones.
- ✓ Los valores experimentales son promedios de las réplicas.

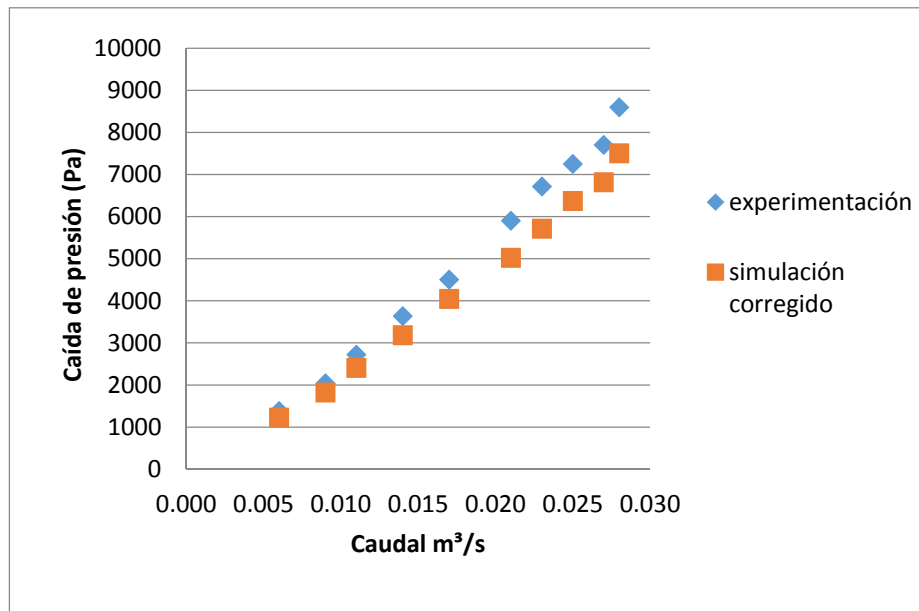


Figura 27. Caída de presión simulada y experimental.

En la grafica podemos observar como a medida que las velocidades disminuyen los valores de caída de presión, tanto los obtenidos por la

experimentación como los obtenidos por la simulación, van siendo similares. Ocurre todo lo contrario con los valores máximos de velocidad de la muestra seleccionada, donde los resultados de la simulación quedan por debajo de los de la experimentación.

En las Figuras 28 y 29 se observan los resultados de las simulaciones de mínima y máxima velocidad respectivamente; las escalas de colores y los puntos seleccionados para mostrar los valores de presión a cada metro de la tubería con lo que se puede así ver el comportamiento de la caída de presión en los casos de seleccionados.

Estudio 1

Caudal $0.028\text{m}^3/\text{s}$

Diámetro de tubería 100mm

Longitud 16m

$\Delta P=7511\text{ Pa}$

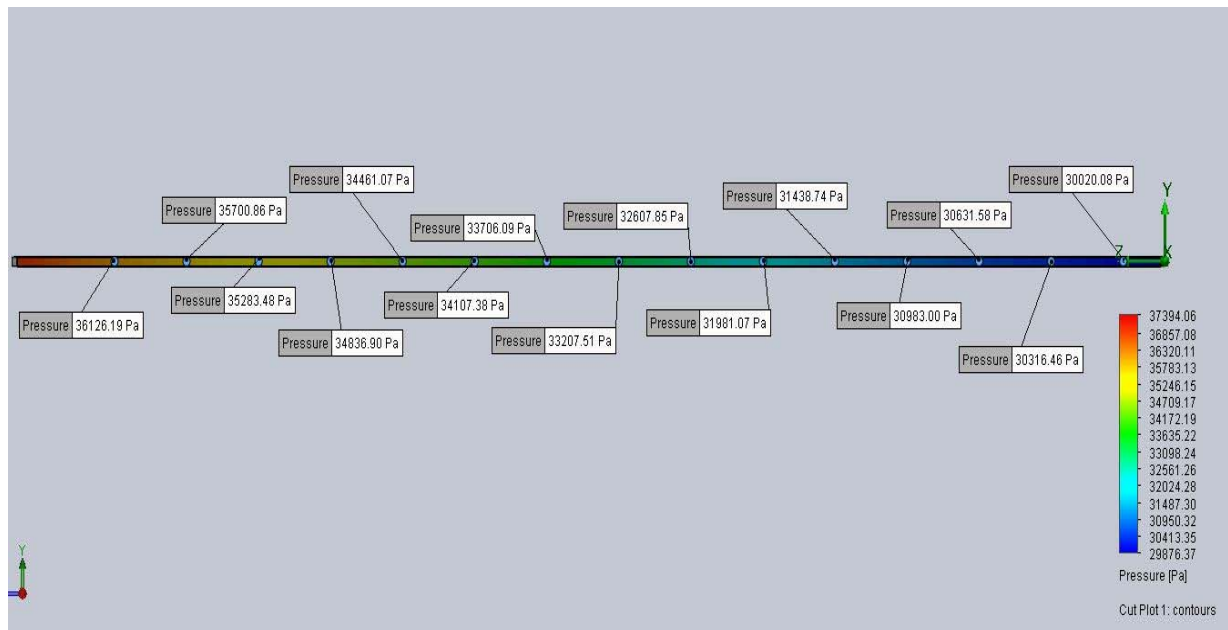


Figura 28. Estudio 1.

Estudio2

Caudal $0.027\text{m}^3/\text{s}$

Diamtro de tuberia 100mm

Longitud 16m

$\Delta P= 6821\text{Pa}$

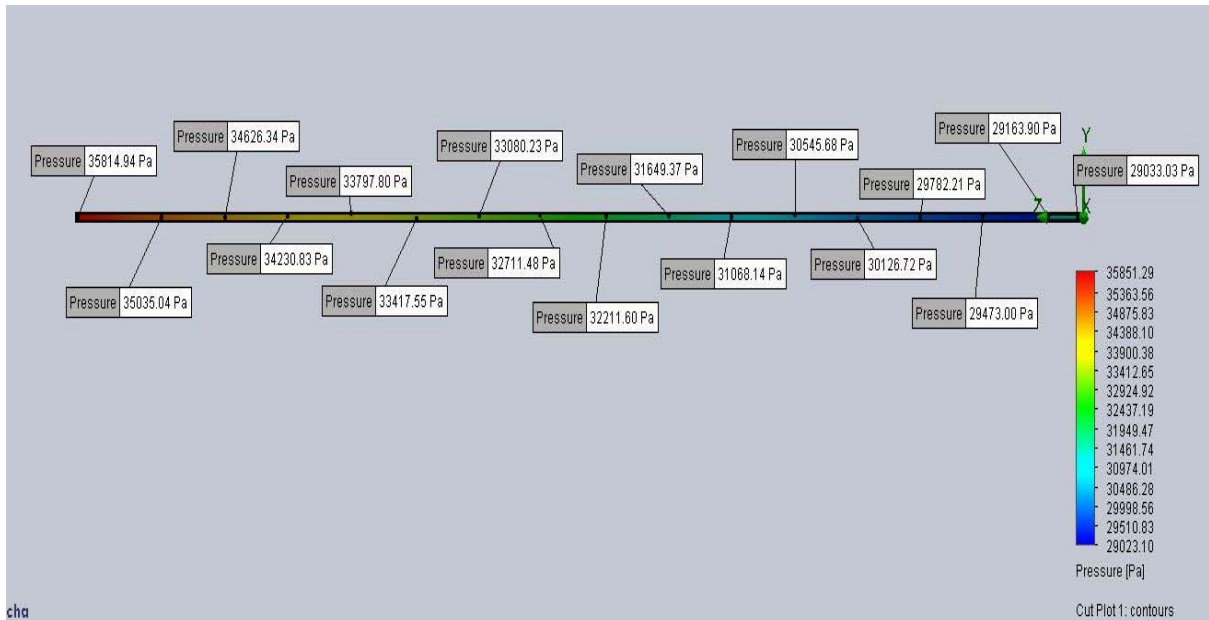


Figura 29. Estudio2.

2.6 Obtención de las ecuaciones de caída de presión del Cieno Carbonatado.

Para el procesamiento de los resultados de las simulaciones con el fin de obtener las expresiones de pérdida de carga durante la hidrotransportación del Cieno Carbonatado se empleó el programa profesional Excel 2010, de Microsoft Office.

La Figura 30 representa, de forma gráfica, el comportamiento de la presión en función del a longitud de la tubería para cada uno de los valores de caudal con lo que se realizaron las simulaciones.

Como se puede observar el comportamiento de la caída de presión en los primeros caso de estudio es más marcada que en los restantes ya que estos son los de mayor caudal y por lo tanto de mayor turbulencia.

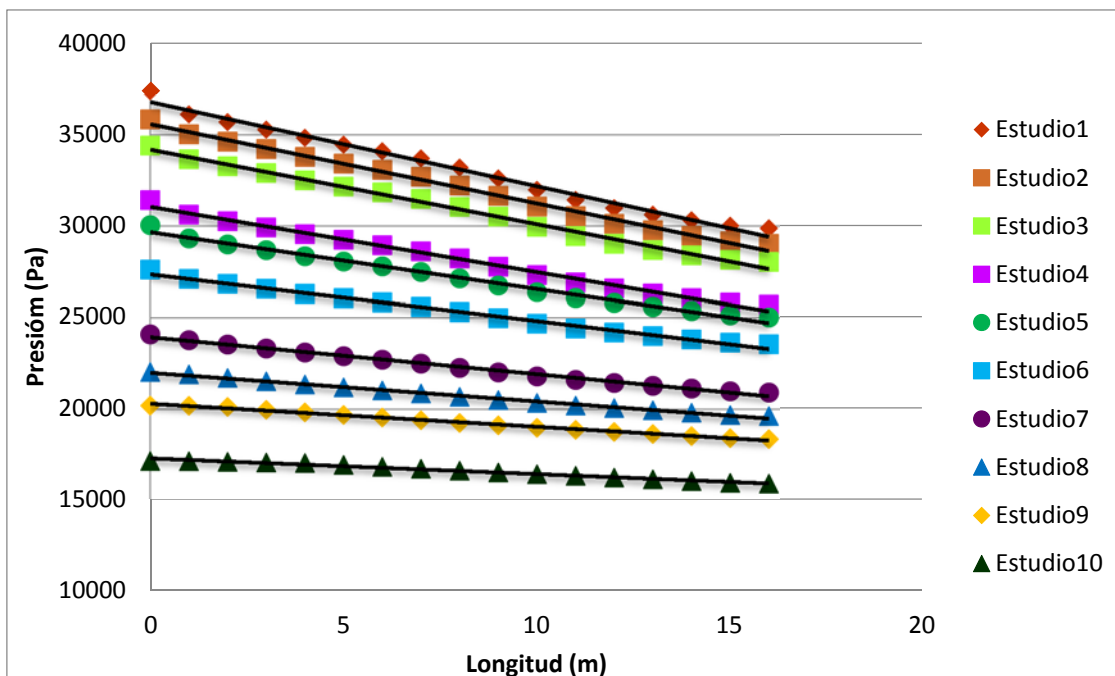


Figura 30. Curvas de la caída de presión del Cieno Carbonatado.

En todos los casos, el ajuste de las curvas se realizó por un análisis de regresión de mínimos cuadrados, pudiendo obtenerse las expresiones matemáticas que describen cada uno de estos comportamientos con índices de regresión por encima del 95 % (Tabla 13).

Tabla13. Expresión matemática obtenida por regresión.

No	Expresión matemática obtenida por regresión.
1	$y = 36786 - 461.18x$
2	$y = 35584 - 434.36x$
3	$y = 34185 - 408.64x$
4	$y = 31054 - 357.14x$
5	$y = 29665 - 310.17x$
6	$y = 27362 - 254.25x$
7	$y = 23947 - 202.79x$
8	$y = 21996 - 157.17x$
9	$y = 20298 - 125.96x$
10	$y = 17306 - 85.973x$

Con estas ecuaciones podemos obtener el valor de la presión en cualquier punto de la tubería siempre introduciendo la longitud en metros, y para el cálculo de la caída de presión solo habría que restarlo de la presión inicial tomada. La tabla 14 muestra la expresión para el cálculo de la caída de presión en los casos estudiados.

Tabla 14. Expresión para el cálculo de la caída de presión.

Cieno Carbonatado		
% de sólido		30
Diámetro de la tubería		100mm
No	Caudal (m³/s)	Expresión matemática obtenida de caída de presión
1	0.028	$\Delta P = P_o - (36786 - 461.18 * L)$
2	0.027	$\Delta P = P_o - (35584 - 434.36 * L)$
3	0.025	$\Delta P = P_o - (34185 - 408.64 * L)$
4	0.023	$\Delta P = P_o - (31054 - 357.14 * L)$
5	0.021	$\Delta P = P_o - (29665 - 310.17 * L)$
6	0.017	$\Delta P = P_o - (27362 - 254.25 * L)$
7	0.014	$\Delta P = P_o - (23947 - 202.79 * L)$
8	0.011	$\Delta P = P_o - (21996 - 157.17 * L)$
9	0.009	$\Delta P = P_o - (20298 - 125.96 * L)$
10	0.006	$\Delta P = P_o - (17306 - 85.973 * L)$

2.7 Procedimiento para la evaluación de la pérdida de carga en el hidrot transporte del Cieno Carbonatado por tuberías.

- 1) Determinar las principales dimensiones y parámetros la instalación o la tubería donde se va a realizar la simulación del hidrot transporte del Cieno Carbonatado.
 - a) Longitud.

- b) Diámetro.
- c) Material.
- d) Rugosidad superficial.
- 2) Determinar las propiedades reológicas de la mezcla para el porcentaje de sólido seleccionado(Ver epígrafe 2.1)
 - a) Viscosidad plástica.
 - b) Esfuerzo cortante inicial.
 - c) Densidad.
- 3) Calcular el coeficiente de viscosidad de remolino teniendo en cuenta el caudal o la velocidad del flujo a simular (ver epígrafe 2.3).
- 4) Modelar en Solid Works la instalación o la tubería donde se va a realizar la simulación del hidrot transporte del Cieno Carbonatado teniendo en cuenta las dimensiones y parámetros anteriormente determinados. (ver epígrafe 2.4.1)
- 5) Editar el Cieno Carbonatado con las propiedades anteriormente determinadas en la Base de Datos de Ingeniería del Flow Simulation (ver epígrafe 2.4.2)
- 6) Crear un proyecto en Flow Simulation siguiendo los pasos mostrados en el epígrafe 2.4.3.
- 7) Determinar las condiciones de frontera (velocidad o caudal y presión de entrada o salida) (ver epígrafe 2.4.4)
- 8) Seleccionar las metas de ingeniería (presión a la entrada y a la salida) (ver epígrafe 2.4.5)
- 9) Correr el estudio.
- 10)Obtener los resultados mediante las herramientas Corte de Planos (Cut Plot) y Puntos de Parámetros (Point Parameters). (ver epígrafe 2.4.6).
- 11)Procesar de los valores del resultado recogidos en la Tabla exportada a Excel para la obtención de las ecuaciones de caída de presión durante el hidrot transporte por tuberías del Cieno Carbonatado. (ver epígrafe 2.6)

2.8 Evaluación 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.

La potencia que se necesita para transportar un fluido en una tubería a una distancia determinada, constituye el indicador económico principal en un sistema de transporte.

En la instalación de hidrotransporte el gasto de energía eléctrica es causado por el alto consumo de la bomba instalada por lo que es de vital importancia el cálculo del consumo de la misma

Grupo Motor-Bomba

Motor-Bomba лG de arena.

Caudal: 160 m³/h

Altura: 40 m

Altura neta de succión positiva requerida (NPSH)_r= 5 m

Eficiencia: 56 %

Velocidad de rotación 1740 rev/min

Zona de utilización de la Bomba: 80-175 m³/h del caudal.

Densidad de la pasta admisible (en servicio nominal) 1.7 kg/dm³.

Transmisión:

Motor eléctrico de tipo 4A225 U4T2 N^o de fábrica 3315. Electromotores asíncronos de jaula de ardilla serie 4 A.

Intensidad de la corriente... 30.1A

Tensión....220 V

Frecuencia....60 Hz

Cosθ.....0.87

$$N_{elect} = \sqrt{3} * I * V * \cos \theta$$

$$N_{elect} = \sqrt{3} * 30.1 * 220 * 0.87$$

$$N_{elect} = 10kW$$

$$C_{bom} = t_{el} \cdot t_t \cdot N_{elect}$$

Donde:

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

N_{elect} - potencia eléctrica de la bomba; (kW).

t_{el} - tarifa eléctrica; (CUC/ kW*h).

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

Para el cálculo del consumo de energía de la bomba instalada en la instalación se usó el valor promedio de los caudales usados y de las pérdidas de presión obtenidas.

Tabla15. Parámetros para el cálculo del consumo de la bomba

N_{elect} (kW)	t_{el} CUC/ kW*h)	t_t (h)
10	0.27	8

Por los cálculos realizados solo en una jornada de trabajo donde se realizaron estos experimentos el consumo de la bomba ascendió a 21.6 cuc Además del gasto de gasto de energía eléctrica kWh; en la instalación de hidrotransporte hay que tener en cuenta: gasto específico de energía eléctrica por 1 m³ de material transportado, kWh/m³; costo de la transportación de 1 m³ de material sólido \$/m³. Por otra parte los costos de mantenimiento por fallas y averías del equipamiento. También el costo total de los activos fijos tangibles de la instalación.

Sin embargo con la simulación del transporte del cieno el gasto eléctrico solo es el del ordenador usado, por tanto teniendo en cuentan el factor económico la simulación del transporte de fluido es mucho más rentable.

2.9 Evaluación medioambiental.

Los sistemas de hidrotransporte para el Cieno Carbonatado son regulados bajo los requerimientos ambientales dispuestos en la Ley 81 y se materializan a través de un programa de mantenimiento planificado y financiado por la empresa encaminada a restaurar los tramos defectuosos de tuberías y soportes de este sistema, los cuales evitan procesos de derrames y como consecuencia contaminación del medio ambiente; existen válvulas de seguridad para evitar escapes y sobrecargas en las líneas, además un sistema de inspección visual por turnos de operación que garantiza la toma de decisiones rápidas ante un incidente en estos sistemas.

El desconocimiento de los valores reales de las pérdidas durante el transporte del Cieno Carbonatado, ocasiona toma de decisiones incorrectas en el empleo del sistema de bombeo instalado en la planta, a su vez provoca altos consumos eléctricos traducidos en derroche de energía y contaminación al medio ambiente. El procedimiento desarrollado brinda la posibilidad de conocer los datos de caída de presión en cualquier longitud de las tuberías por lo que evita los riesgos anteriormente mencionados.

Por otra parte los cálculos realizados demuestran que para la realización de estos trabajos experimentales en la instalación semi-industrial del ISMMM con el sistema de bombeo instalado actualmente en un tiempo promedio de ocho horas el consumo de energía ascendió a 80 kW/h lo que equivale por generación de energía eléctrica a 26.6 kg de combustible.

Para conocer la cantidad de CO₂ que se emite a la atmósfera al quemar esta cantidad de combustible para la generación de energía eléctrica se realizaron los siguientes cálculos (Ogarensian & Cobas, 1988).

Fuel: C: 84.4%; S: 3.5%

$$\rho_{CO_2} = 1.87 \text{ kg}_{CO_2} / \text{m}^3_{CO_2}$$

$$Vt = 0.01(1.866C + 0.75S)$$

$$Vt = 0.01(1.866 * 84.4 + 0.75 * 3.5)$$

$$Vt = 1.601154 \text{ m}^3_{CO_2} / \text{kg}_{comb.}$$

$$Vt * \rho = 1.87 * 1.601154$$

$$= 2.99 \text{ kg}_{\text{CO}_2} / \text{kg}_{\text{comb.}}$$

$$2.99 \text{ kg}_{\text{CO}_2} / \text{kg}_{\text{comb}} * 26.6 \text{ kg}_{\text{comb}} = 79 \text{ kg}_{\text{CO}_2}$$

Como muestran los cálculos se emiten a la atmósfera 79 kg de CO₂ en la generación de electricidad que es utilizada para la realización de los experimentos con el uso de la instalación del ISMMM.

Conclusiones

1. El uso de herramientas CAE de avanzada (Solid Works; Flow Simulation 2013) permitió desarrollar un procedimiento para evaluar la pérdida de carga en el hidrot transporte del Cieno Carbonatado por tuberías.
2. Para la obtención de resultados satisfactorios en la simulación del transporte del Cieno Carbonatado en régimen turbulento con la herramienta Solid Works; Flow Simulation 2013 es necesario en la base de datos ajustarse al modelo Bulkley - Herschell y tener en cuenta el coeficiente de viscosidad de remolino dinámico.
3. Con este Procedimiento utilizando tecnologías CAD-CAE, se disminuyen los costos de experimentación en 534.46 CUP lo que permite potenciar el desarrollo de futuras investigaciones en el campo de las pérdidas hidráulicas durante el transporte de fluidos no newtonianos.

Recomendaciones

1. Realizar la simulación del transporte de pulpas con mayor porcentaje de sólido.
2. Realizar un procedimiento para evaluación de la pérdida de carga en diferentes accesorios durante el transporte del Cieno Carbonatado.
3. Aplicar el procedimiento para varios diámetros de tubería y analizar la influencia de este parámetro en la caída de presión durante el transporte del Cieno Carbonatado.

Bibliografía

- C Macedo, J. M. (2001). Diseño, Construcción y Validación de una Unidad Piloto para el manejo de Fluido Newtonianos . *Información Tecnológica* 12(6), 169-176.
- Caballero, N. Y. (2008). *Caracterización de las pulpas de Cieno Carbonatado para su perfeccionamiento en el hidrotransporte*. ISMMM.
- Campos, G. M. (2001). *Nuevos datos acerca de la naturaleza y génesis de los sedimentos del yacimiento de Cieno Carbonatado en la bahía de Cayo Moa Grande*. Holguín.
- Castillo, D. (1988). *Informe sobre problemas de extracción y utilización de la materia prima de Cieno Carbonatado*.
- Correa, F. (1957). *Estudio sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al oeste de Cayo Moa Grande*.
- Correa, G. M. (2010). *Perfeccionamiento del sistema de transporte de fluido en la planta de cieno carbonatado en el Puerto de Moa . Trabajo de Diploma*. ISMM. Moa.
- Díaz, A. (1990). *Manual de Hidráulica aplicada* . Santiago de Cuba: Ediciones ISPJAM.
- Gavilares, P. E. (2014). *Análisis de los parámetros operacionales del transporte de cieno carbonatado en la Empresa "Comdte Pedro Sotto Alba" Moa Nickel S.A. Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico*. ISMM. Moa.
- Greene, A. (1995). *Flujo de fluidos*. La Habana : Editorial Pueblo y Educación.
- Hernández, L. R. (2003). *Cálculo verificativo y propuesta de modificación para la ampliación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado en la Empresa "Comdte Pedro Sotto Alba" Moa Nickel S.A. Trabajo de Diploma*. ISMM. Moa.
- Jimenes, D. Y. (2005). *Cálculo verificativo y propuesta de modificación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado desde el puerto hasta la planta de neutralización de la Empresa "Comdte Pedro Sotto Alba" Moa Nickel. S.A. Tesis de Diploma*. ISMM. Moa.

- L R Garcell, A. D. (1988). *Transferencia de cantidad de movimiento , calor y masa*. Ciudad de La Habana : Editorial Pueblo y Educación.
- Laurencio, H. (2012). Modelo para cálculo de pérdidas de presión en tuberías conductoras de petróleo pesado (11 API). *Minería y Geología* 28(3), 70-86.
- (s.f.). *Manual de operaciones planta de Cienos Carbonatados*. Moa .
- Martínez, R. (2014). Pérdida de carga durante el transporte en regimen laminar de pulpas de Cieno Carbonatado. *Revista Minería y Geología/ v.30 n.1/ enero-marzo/ , p 80-94*.
- Martínez, R. R. (2009). *Caracterización de las propiedades físico mecánicas del Cieno Carbonatado para el perfeccionamiento de su hidrotransporte por tuberías*. Tesis en opción de Master en Electromecánica. ISMM. Moa.
- (s.f.). *Mecánica Aplicada EAFIT©*.
- Nápoles, E. (1992). *Informe exploración orientativa de Cienos Carbonatados al Sur de Cayo Moa Grande*.
- Nedved, M. (1966). *Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al Sur de Cayo Moa Grande*.
- Ogarensian, C. L., & Cobas, I. J. (1988). *Diseño de Generadores de vapores con la utilización de computadoras personales. Primera Parte*. Camaguey.
- Orrego, S. (2009). *Simulación de fluidos utilizando computadores: una moderna herramienta para el estudio y el análisis de fluidos*. Obtenido de <http://mecánica.eafit.edu.co>.
- Perry, J. H. (1984). *Chemical engineers handbook. 6editions*. New York: McGraw Hill Book.
- Salermo, J. (2014). *Diseño del agitador del tanquede la instalación semi-industrial de hidrotransporte del ISMM de Moa .Tesis en opción al título de Ingeniero mecánico*. Universidad de Holguín. . Holguín.
- Skelland, A. H. (1970). *Now Newtonian Flow and Heat Tranfer*. La Habana: Ediciones revolucionarias .
- SolidWorks. (2013). *Flow Simulation* . Massachusset: Dassault Systemes.

- Streeter, V. (1978). *Mecánica de los Fluidos*. Ciudad de la Habana : Pueblo y Educación .
- Tejeda, H. D. (1985). *Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales. Trabajo de diploma.ISJAM.*
- Torres, E. (2000). *Transporte de partículas en flujo de gases para el incremento de la eficiencia del secado. Paper presented at the Segunda Conferencia Internacional CINAREM. .*

Anexos

Anexo 1.

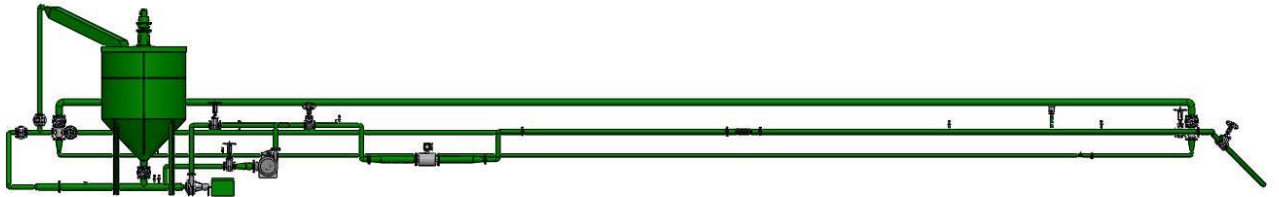


Figura 1. Instalación semi – instalación del ISMMM. Vista frontal.

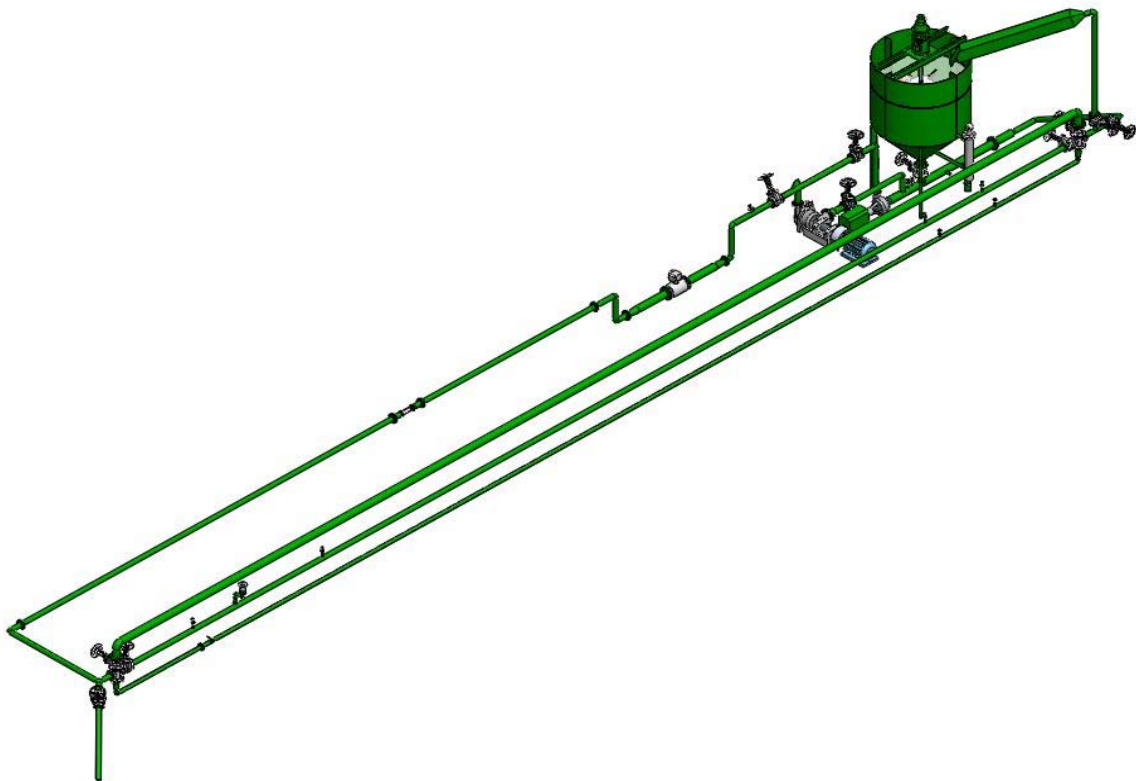


Figura 2. Instalación semi–instalación del ISMMM. Isométrica.

Anexo 2

Non-Newtonian Liquids

Flow Simulation is capable of calculating the laminar flow of inelastic non-Newtonian liquids. All available non-Newtonian models are based on the assumption that the flow's shear stress τ is a function of the flow's shear rate $\dot{\gamma}$:

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \text{ or,}$$

introducing the liquid's dynamic viscosity μ similarly to Newtonian liquids,

$$\tau = \mu(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}$$

The following five models of inelastic non-Newtonian viscous liquids are available:

- **Herschel-Bulkley model**

$$\mu(\dot{\gamma}) = K \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}$$

where K is the liquid's **consistency coefficient** ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), n is the liquid's **power-law index** (dimensionless), and τ_0 is the liquid's **yield stress** (Pa).

This model includes the following special cases:

- $n = 1, \tau_0 = 0$ describes Newtonian liquids, in this case K is the liquid's dynamic viscosity;
- $n = 1, \tau_0 > 0$ describes the Bingham model of non-Newtonian liquids, featured by a non-zero yield stress (τ_0), below of which the liquid behaves as a solid, so to achieve a flow this threshold shear stress must be exceeded (this threshold is modeled by automatically equating K , named plastic viscosity in this case, to a substantially high value at $\tau < \tau_0$);
- $0 < n < 1, \tau_0 = 0$ describes the power-law model of shear-thinning non-Newtonian liquids.
- $n > 1, \tau_0 = 0$ describes the power-law model of shear-thickening non-Newtonian liquids.

- **Power-law model**

- **Carreau model**

This model is a smooth version of the power-law model with the above-mentioned μ restrictions.

Figura 1. Ayuda del Solid Works acerca de los fluidos no newtonianos.

Anexo3

Tabla 1. Presiones obtenidas en la simulación estudios de 1 a 5

Diam tubería	100mm				
Long tubería	16m				
Conc. sólido	30%				
Caudal(Q)	0,028m ³ /s	0,027m ³ /s	0,025m ³ /s	0,023m ³ /s	0,021m ³ /s
EXPERIMENTO					
P1(kPa)	38.482	36.738	35.292	32.426	30.936
P2(kPa)	29.883	29.03	28.036	25.708	25.032
ESTUDIO	1	2	3	4	5
L(m)	P(Pa)	P(Pa)	P(Pa)	P(Pa)	P(Pa)
0	37394	35851	34412	31428	30060
1	36121	35035	33660	30625	29332
2	35701	34628	33279	30272	29006
3	35288	34229	32907	29927	28689
4	34841	33797	32509	29560	28356
5	34459	33428	32167	29246	28068
6	34105	33088	31849	28950	27799
7	33708	32704	31490	28621	27497
8	33209	32228	31048	28227	27139
9	32608	31661	30520	27771	26757
10	31988	31074	29961	27319	26390
11	31438	30552	29452	26918	26077
12	30986	30128	29032	26591	25819
13	30630	29780	28687	26310	25591
14	30318	29468	28401	26059	25368
15	30025	29169	28152	25821	25140
16	29883	29030	28036	25708	25032

Tabla 2. Presiones obtenidas en la simulación estudios de 5 a 10

Diam tubería	100mm				
Long tubería	16m				
Conc. solido	30%				
Caudal(Q)	0,017m ³ /s	0,014m ³ /s	0,011m ³ /s	0,009m ³ /s	0,006m ³ /s
EXPERIMENTO					
P1(kPa)	28.072	24.558	22.354	20.413	17.314
P2(kPa)	23.566	20.918	19.63	18.37	15.928
ESTUDIO	6	7	8	9	10
L(m)	P(Pa)	P(Pa)	P(Pa)	P(Pa)	P(Pa)
0	27616	24108	22044	20197	17160
1	27108	23789	21912	20196	17154
2	26836	23557	21719	20129	17121
3	26571	23332	21535	19975	17089
4	26304	23112	21361	19830	17061
5	26067	22914	21200	19691	16955
6	25837	22718	21038	19551	16849
7	25590	22507	20864	19404	16744
8	25301	22269	20681	19257	16642
9	24984	22024	20504	19118	16543
10	24684	21804	20346	18991	16447
11	24426	21611	20204	18873	16353
12	24203	21445	20074	18759	16259
13	24007	21290	19946	18646	16164
14	23824	21138	19816	18534	16069
15	23648	20987	19688	18421	15974
16	23566	20918	19630	18370	15928