

DESIGN SUPPORT TOOL FOR TRANSPORTING SOLIDS BY PIPELINES

Cano Bertiz, Marcos; Rodríguez Pérez, Fernando; Ortega Fernández, Francisco;
Roces Invernón, Lucía
Universidad de Oviedo

During the last years a huge development in the transport of solid materials by means of pipelines has occurred. The use of this type of transport has made it easy the continuous transport of material by long length pipes, with completely acceptable costs and moderate environmental impact.

In this technology the solid material is fluidified requiring big volumes of liquid. In order to decrease the liquid volume very high concentration levels of solids in the fluids have been achieved through thickening (flocculation). Unfortunately, these thick fluids present non Newtonian properties, which greatly complicates the calculations involved.

The work here presented provides a tool to help in the design of pipelines for solids transport, incorporating all the necessary calculations to get a full dimensioning of the system, without requiring from the user a great knowledge of advanced fluid-dynamics. The tool performs the dimensioning of the pipes and pumps according to their characteristics, as well as the selection of materials. For each case the pressure drops in piping are obtained as well as the transport speed. Moreover, parameters of system maintenance due to wear and corrosion, and methods to minimize it are taken into account.

Keywords: solids transport; thickening; pipelines design

HERRAMIENTA DE AYUDA AL DISEÑO EN TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS.

En los últimos años se ha producido un gran desarrollo en el transporte de materiales sólidos mediante tuberías. El uso de este tipo de transporte ha facilitado enormemente el transporte continuo de material mediante tuberías de gran longitud, con costes completamente asumibles y un impacto ambiental moderado.

En esta tecnología el material sólido es fluidificado, requiriéndose grandes volúmenes de líquido. Para disminuir el volumen de líquido necesario se están alcanzando niveles muy altos de concentración de sólidos en los fluidos mediante su espesamiento (floculación). Desafortunadamente, estos fluidos densos adquieren propiedades no newtonianas lo que complica enormemente los cálculos.

El trabajo aquí presentado proporciona una herramienta de ayuda al diseño de tuberías de transporte de sólidos, incorporando todos los cálculos necesarios para conseguir un dimensionamiento completo del sistema, sin demandar al usuario grandes conocimientos de fluidodinámica avanzada.

La herramienta realiza un dimensionamiento de las tuberías y bombas en función de sus características, además de la selección de materiales. Para cada caso se obtienen las pérdidas de carga en tubería, así como de la velocidad de transporte. Además se tienen en cuenta parámetros de mantenimiento del sistema debido al desgaste y corrosión, así como métodos para minimizarlo.

Palabras clave: transporte de sólidos; espesamiento; diseño de tuberías

Correspondencia: Francisco Ortega Fernández - fran@api.uniovi.es

1. Introducción

En la actualidad existen muchos métodos en la industria para el transporte de sólidos, modificándose y adaptándose a cualquier tipo de terreno que se pueda encontrar para conseguir optimizar el transporte del material.

Debido a la multitud de ventajas que presenta el transporte de material en tubería, se ha producido un incremento en su demanda, aunque aspectos como su complejidad técnica en el diseño, han supuesto una barrera difícil de afrontar.

El uso de este tipo de transporte ha facilitado enormemente el transporte continuo de material, con unos costes asumibles y produciendo un impacto ambiental moderado. Esta tecnología requiere una fluidificación del material sólido con el propósito de alcanzar valores que permitan su bombeo.

Este último aspecto ha influido de mayor manera en lugares en los que la escasez de agua está presente. Esto ha hecho necesario que se requiera un espesamiento continuo de material a transportar cada vez en mayor con el fin de disminuir la demanda, tanto de fluido como de consumos energéticos,

Estos fluidos con elevadas concentraciones en sólidos, obtenidos gracias a tecnologías como la floculación, a partir de ciertos niveles de espesamiento, comienzan a experimentar un cambio en sus propiedades que limitan su uso en los sistemas que no están preparados para ello.

Estos comportamientos de los fluidos plantean un nuevo reto en el campo de la ingeniería de tuberías. En estos comportamientos, comúnmente denominados comportamientos no newtonianos, la magnitud de la tensión cortante aplicada en el fluido determina la viscosidad que pueda tener el fluido requiriendo nuevas exigencias para su bombeo. Si bien desde un punto de vista teórico no se trata de una situación nueva, sí lo es desde el punto de vista numérico por cuanto dejan de ser casos aislados para convertirse en una actividad habitual. Sin embargo, aunque deberían haber surgido aproximaciones alternativa al diseño de tuberías, es paradójico que los esquemas de diseño prácticamente no han variado en los últimos 40 años (Ihle, 2013). De hecho las herramientas informáticas destinadas al cálculo de fluidos, como por ejemplo, *Aspen* o *AFT* no consideran todos los factores que influyen en estos casos con concentraciones de sólidos tan elevadas (Ihle, Tamburrino, & Montserrat, 2014).

La complejidad de los cálculos para este tipo de fluidos puede resultar en que una mala aplicación de éstos sea clave a la hora de determinar la viabilidad o no de un proyecto.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo se basa en el desarrollo de un sistema que modelice el comportamiento de los fluidos en tuberías, con el fin de conseguir un prediseño de un sistema de transporte de sólidos por tuberías.

Para conseguir este objetivo principal, se ha de realizar una aproximación estableciendo objetivos de menor escala, aunque todos ellos imprescindibles para la consecución del proyecto.

Uno de estos objetivos es la modelización del comportamiento de un determinado fluido denso. De esta manera, partiendo de características fundamentales como son, la densidad, viscosidad, concentración de sólidos, etc. permitirá, mediante modelos matemáticos, predecir las características y comportamiento de un sólido denso cuando este se somete a las condiciones propias de un transporte por tubería. Para la determinación de todos estos

parámetros, el trabajo en laboratorio es imprescindible, con el fin de poder obtener unos resultados válidos.

Además de conocer el fluido, también se ha de realizar un estudio de los demás componentes que forman un sistema de transporte de estas características. En el presente trabajo, además del tipo de fluido con el que se trabaja, también se tiene en cuenta características de las tuberías, tanto perfiles como materiales o tamaños con el fin de establecer una respuesta que se aproxime a la real. Otros componentes como las bombas e incluso elementos que ha de tener una tubería se han tenido también en cuenta.

El resultado de todo este proceso se implementará en una hoja de cálculo que permita el manejo de todos los parámetros iniciales requeridos, con el fin de poder optimizar las características del sistema resultante.

3. Bases teóricas

Un fluido denso está comprendido por dos fases: una sólida la cual interesa transportar y una fase líquida que actúa como vehículo de transporte. La fase sólida comprende partículas de gran variedad de tamaños, desde partículas de pocas micras hasta partículas mucho más gruesas como pueden ser las gravas con tamaños de varios milímetros. La fase líquida está compuesta por un fluido que actúa como portador de la fase sólida, en la mayoría de los casos es agua, debido a sus características tanto físicas, químicas y económicas.

La relación entre la tensión de corte y la velocidad de cizallamiento en un flujo laminar define las propiedades de flujo del líquido. Si las propiedades viscosas están definidas por la ecuación:

$$\tau = \mu \gamma$$

donde:

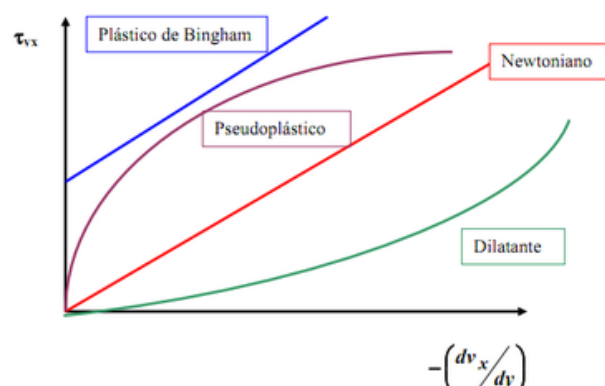
τ = tensión de corte (Pa)

μ = coeficiente de viscosidad dinámica (Pa.s)

γ = velocidad de cizallamiento (s^{-1})

De esta manera, cualquier fluido o mezcla que obedezca esta relación en flujo laminar, está considerada newtoniana y la viscosidad es suficiente para caracterizar el fluido.

Figura 1: Diferentes tipos de reogramas para fluidos no newtonianos (Argoti-Cacedo, A., 2015)



Los reogramas para fluidos newtonianos pasan por el origen y la pendiente de la curva es la viscosidad, que es constante. Por el contrario, los fluidos no newtonianos poseen un

reograma que no presenta linealidad, no para por el origen y además se produce una variabilidad con respecto al tiempo.

De una manera simplificada, el sistema se basa en el predimensionamiento de una tubería partiendo de un diámetro de tubería inicial, con el que se calculará la velocidad de la tubería, consecuentemente, se comprobará que se cumplen las velocidades de deposición o transición para las partículas y además se calcularán las pérdidas producidas por el transporte de un fluido concreto.

Posteriormente, se realizarán cálculos para determinar la pérdida de rendimiento de las bombas centrífugas para el transporte de este tipo de fluidos, así como el espesor de pared teniendo en cuenta el desgaste de la tubería.

Los datos de partida requeridos para este sistema se obtienen por medio de un análisis de laboratorio de los fluidos, por lo que se requerirá un análisis anterior. Para poder realizar los cálculos propios para bombas y tuberías se requerirán datos del fabricante para lograr una estimación lo más acertada posible.

El sistema se ha implementado con el fin de trabajar con parámetros razonables en este tipo de dimensionamientos, con lo que la entrada de datos se restringirá a unos rangos de valores razonables.

Una limitación clara y en la que se ha de seguir investigando es en la modelización del gradiente de presión por fricción en el transporte de fluidos con un régimen mixto y con un comportamiento del fluido base no newtoniano, ya que actualmente no existen modelos y se requieren de datos y ensayos empíricos para su modelización.

Ha de tenerse en cuenta que un conocimiento de lo visto anteriormente, facilitará la comprensión del sistema, permitiendo modificar los datos de entrada para así poder optimizar el sistema de transporte de tuberías deseado.

3. Metodología de cálculo

En este apartado se describe la metodología de cálculo que se ha empleado para desarrollar el sistema y que se ha implementado en una hoja de cálculo. Las principales etapas son:

Caracterización del fluido

Mediante parámetros iniciales de fácil determinación en un laboratorio como pueden ser las características de las partículas (cantidad, tamaño, material...) o las del fluido (densidad, viscosidad...), se realiza una caracterización inicial del fluido a estudiar, que determinará los modelos matemáticos empleados posteriormente. Los tipos de fluidos en los que se clasifican, se presentan a continuación:

- Fluido heterogéneo:

Se caracterizan ya que a bajas velocidades de transporte tiende a formar un lecho, fijo o móvil, en la parte inferior de la tubería.

Se observan dependiendo de la velocidad de la tubería diferentes estados de transporte, desde un lecho estacionario a bajas velocidades hasta un flujo del fluido pseudo-homogéneo.

Dos velocidades cuya determinación es importante son: la velocidad en la cual el lecho pasa de un estado estacionario a completamente en movimiento y aquella en la que el flujo del fluido mantiene los sólidos completamente en suspensión.

En la práctica, las tuberías que transportan este tipo de fluidos están normalmente diseñadas para operar a velocidades mayores que la velocidad de deposición estacionaria, ya que una operación próxima a esa velocidad, está asociada con una operación inestable y puede generar un bloqueo de la tubería.

- Fluido homogéneo: El análisis reológico para este tipo de fluidos es fundamental con el fin de determinar su comportamiento y así llevar a cabo una modelización correcta de su flujo.

Existen algunos fluidos que son newtonianos a bajas concentraciones de sólidos, pero estos pueden llegar a convertirse en no newtonianos a medida que la concentración de sólidos se incrementa.

Para la clasificación de los diferentes tipos de fluidos no newtonianos se ha tenido en cuenta el modelo de Herschel-Bulkley (Saramito, 2009), pudiendo obtenerse fluidos pseudoplásticos, dilatantes o fluidos tipo Bingham.

- Fluido de régimen mixto:

Este tipo de fluidos contienen partículas gruesas que presentan precipitación y partículas finas que se mantienen suspendidas. Este es el motivo por el que estos fluidos adquieren comportamientos de los dos tipos de fluidos anteriormente descritos.

El flujo en tubería de un régimen mixto vendrá gobernado por las características de las partículas gruesas que precipitan y las características viscosas dadas por las partículas finas esencialmente sin precipitación.

Cálculo de la velocidad de operación

La velocidad de operación calculada se caracteriza por ser la que reduce o elimina los efectos adversos de un transporte de fluidos densos en la tubería seleccionada. A partir de estas determinadas velocidades, se verificará si el tamaño de la tubería es suficiente para transportar la cantidad de material requerido.

Para el caso de las mezclas heterogéneas se ha tenido en cuenta la velocidad de deposición, velocidad de transición entre un lecho móvil y estacionario, evitando el trabajo a menores velocidades y como consecuencia obstrucciones en la línea.

Respecto a los fluidos homogéneos se ha estimado la velocidad de transición entre un flujo laminar y turbulento intentando siempre trabajar en un rango de velocidades superior a esta, siempre y cuando la técnica lo permita.

Para el caso de los fluidos mixtos se establecen las dos velocidades anteriores, intentando elegir para la modelo aquella con un mayor valor.

Determinación de las pérdidas de fricción producidas por el fluido

Debido a las características propias del fluido antes citadas, se producen unas pérdidas de fricción en la tubería por el mero hecho del transporte del fluido y sus características como puede ser su carácter newtoniano o no newtoniano y relacionado con esto último, la propia viscosidad del fluido.

Cálculo de las pérdidas de presión producidas por el peso del fluido

Dependiendo del perfil en alturas que presente la tubería, el peso producido por el propio fluido puede ser un condicionante adicional en el transporte de fluidos densos y por tanto influir en las pérdidas de presión que se producen en las tuberías.

Cálculo de las pérdidas de presión totales

Teniendo en cuenta las pérdidas de presión producidas por el fluido, así como las propias por el perfil de las tuberías y todas aquellas que producen los elementos no lineales como pueden ser las válvulas, limpiadores e incluso las curvaturas de la tubería.

Todas estas formarán parte de las pérdidas de presión totales, parámetro imprescindible para la posterior caracterización de las bombas empleadas en el transporte.

Caracterización de las bombas que se han de emplear

Con el fin de poder determinar las bombas a emplear, se calculan los parámetros de desgaste y eficiencia para el transporte del tipo de fluido determinado anteriormente, pudiéndose así deducir si es necesario emplear otros modelos o materiales diferentes en las bombas. En este el modelo los coeficientes de desgaste y eficiencia son calculados para bombas centrífugas.

Parámetros de desgaste en las tuberías

Teniendo en cuenta el material empleado en la tubería, así como en su revestimiento y teniendo en cuenta los parámetros de funcionamiento anteriormente calculados, se ha intentado modelizar los desgastes producidos en el interior de la tubería producidos en las condiciones de trabajo de la tubería.

4. Caso de estudio: Transporte de relaves mineros

La extracción de mineral genera un importante movimiento de tierras ya que generalmente la mena se encuentra dispersa en el terreno con diferentes concentraciones. Una vez se extrae el mineral del terreno, se procede a realizar una concentración del material de interés, ya que es imprescindible transportar el material con mayor valor añadido.

Durante el proceso de concentración, gran cantidad del material extraído es ganga, es decir material sin interés comercial en el que se encontraba la mena del mineral. Este volumen de tierra se ha de transportar a las balsas de lodos con el fin de minimizar el impacto ambiental del terreno, sirviendo así de material de relleno en muchas zonas.

El método actual más empleado para el transporte de todos los relaves mineros es el transporte por tubería. Cada vez más tuberías se construyen con el fin de minimizar el impacto y los costes en transporte y así facilitar el proceso. Debido a esto, se están construyendo tuberías de cientos de kilómetros que respaldan el hecho de que esta sea una tecnología muy aconsejable para grandes movimientos de tierras.

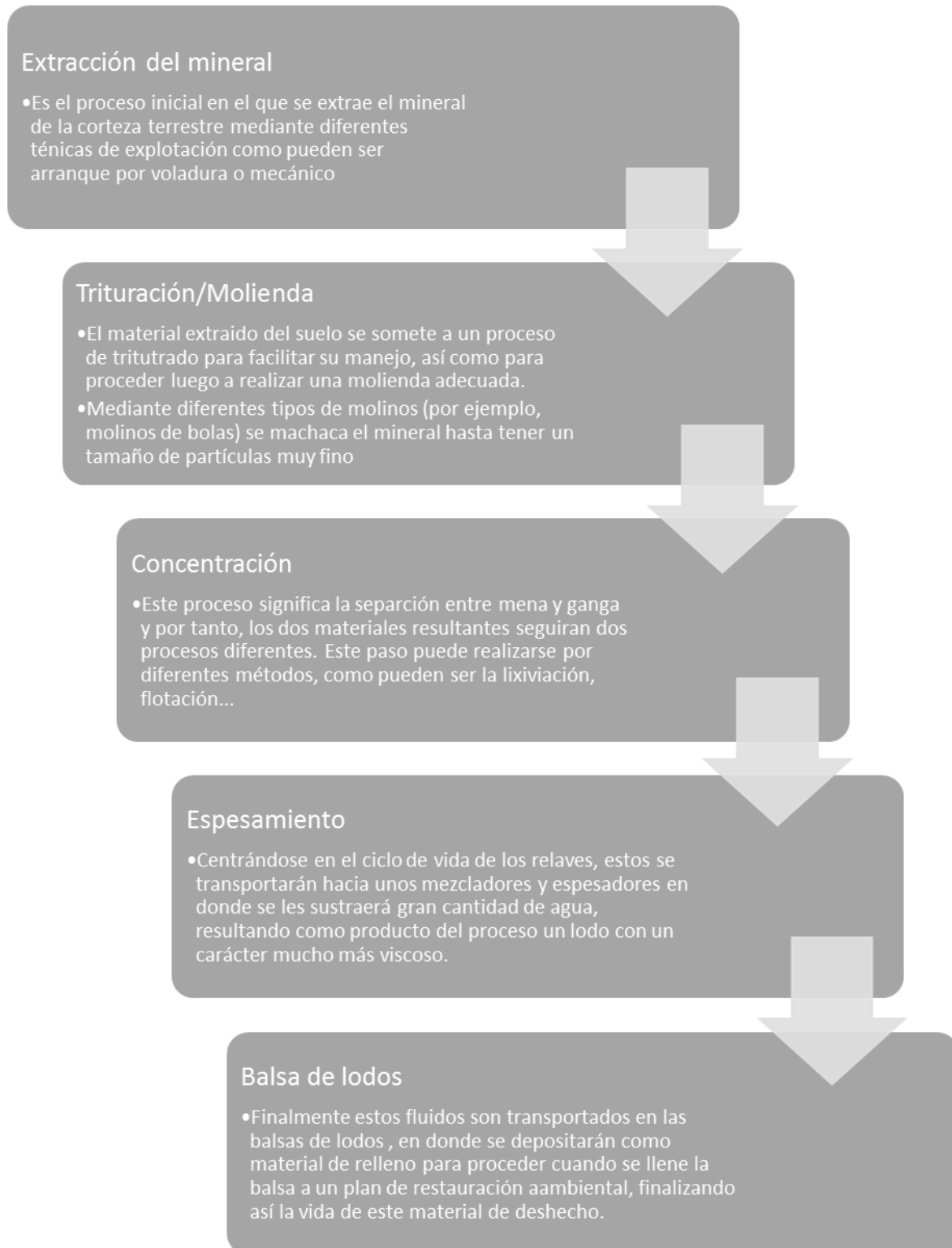
Todos estos fluidos terminan depositándose en las balsas de lodos en las que se secarán. Debido a esto, es importante el transportar los materiales con poco contenido en agua, ya que facilitarán su secado en las balsas de lodos agilizando el proceso. Además, se elimina el proceso de recuperación del exceso de agua acumulado en la superficie de la balsa.

Cabe destacar, que gracias a ese espesamiento, es mucho más difícil que se produzca una rotura en una balsa de lodos debido a la mayor estabilidad que adquiere el terreno.

En este sector normalmente se emplean diámetros que varían de 150 a 1200 mm con un espesor de 4,4 a 31,8mm. Dependiendo de las exigencias del comprador estas tuberías serán distribuidas con recubrimientos o no para prevenir el desgaste acelerado de los componentes (Tenaris, 2015).

En la Figura 2 se muestra de una manera simplificada el ciclo de vida completo de un relave producido en un proceso minero extractivo común.

Figura 2: Ciclo de vida de un relave minero



Para presentar el sistema desarrollado se utiliza como ejemplo de aplicación un caso de estudio referente al transporte de relaves procedentes de una mina con extracción de mineral de hierro en la que la composición del relave a transportar tiene las siguientes características:

Tabla 1. Composición del relave

Compuesto	Composición
SiO ₂	83%
Al ₂ O ₃	1%
Fe ₂ O ₃	14%
Otros	2%

Conocidas las proporciones de cada compuesto en nuestros sólidos mediante un cálculo sencillo se obtiene la densidad de sólidos. El tamaño de las partículas vendrá dado mediante un análisis granulométrico del cual se escogerá un tamaño representativo del fluido.

El líquido escogido para el transporte de estos sólidos es el habitual en este tipo de casos en los que se emplea principalmente agua, debido a sus características tanto económicas como físicas y químicas. La cantidad requerida a transportar de relave minero será unas 500 Tm/h que incluirán en ellas la cantidad de sólidos y agua a transportar.

Para el transporte de este tipo de fluidos se recurrirá a una tubería de acero con recubrimiento de polietileno de alta densidad. La inclinación de esta tubería será de 2 grados en total.

5. Análisis de resultados

En este apartado se presentan los resultados que proporciona la herramienta de ayuda al diseño para el caso de estudio planteado. Cabe señalar que el sistema desarrollado emplea el idioma inglés por lo que todas las pantallas de resultados se presentan en ese idioma.

El primer paso consiste en introducir los datos de entrada definidos en el apartado anterior. Una vez introducidos los datos de entrada en el sistema se obtendrán los cálculos para una tubería de agua equivalente con el fin de poder realizar cálculos en modelos posteriores. A continuación y con los datos citados anteriormente se obtendrán los cálculos iniciales para una tubería con un fluido de este tipo.

Figura 3: Características del fluido y tubería iniciales

SLURRY CHARACTERISTICS (CONSIDERING SPHERICAL PARTICLES)							
Mass flow rate	m	500	T/h	Volumetric solids concentrati	Cv	0,332087342	%/100
Particle density	ρs	3016,884	kg/m ³	Mixture density	ρm	1669,781646	kg/m ³
Fluid density	ρw	1000	kg/m ³	Solids specific gravity	Ss	3,016884	
Mass solid concentration	C	0,6	%/100				
Pipeline diameter	D	0,2	m	Volumetric flow rate	Q	0,083177875	m ³ /s
Acceleration of gravity	g	9,81	m/s ²	Pipeline velocity	V	2,64763399	m/s
Fluid coefficient of dynamic	μw	1,52E-03	Pa.s				
Particle diameter	d	2,50E-05	m				
Volume shape factor	K	0,4	n.u.	Drag coefficient	Cd	1,71914328	n.u.
Pipeline hydraulic roughness	k	2,00E-05	m	Terminal settling velocity	Vt	0,000327063	m/s
Maximun solids particle pack	Cbmax	6,30E-01	%/100	Hindered terminal settling ve	V't	5,10907E-05	m/s
				Type:	SLOW SETTLING SLURRY		

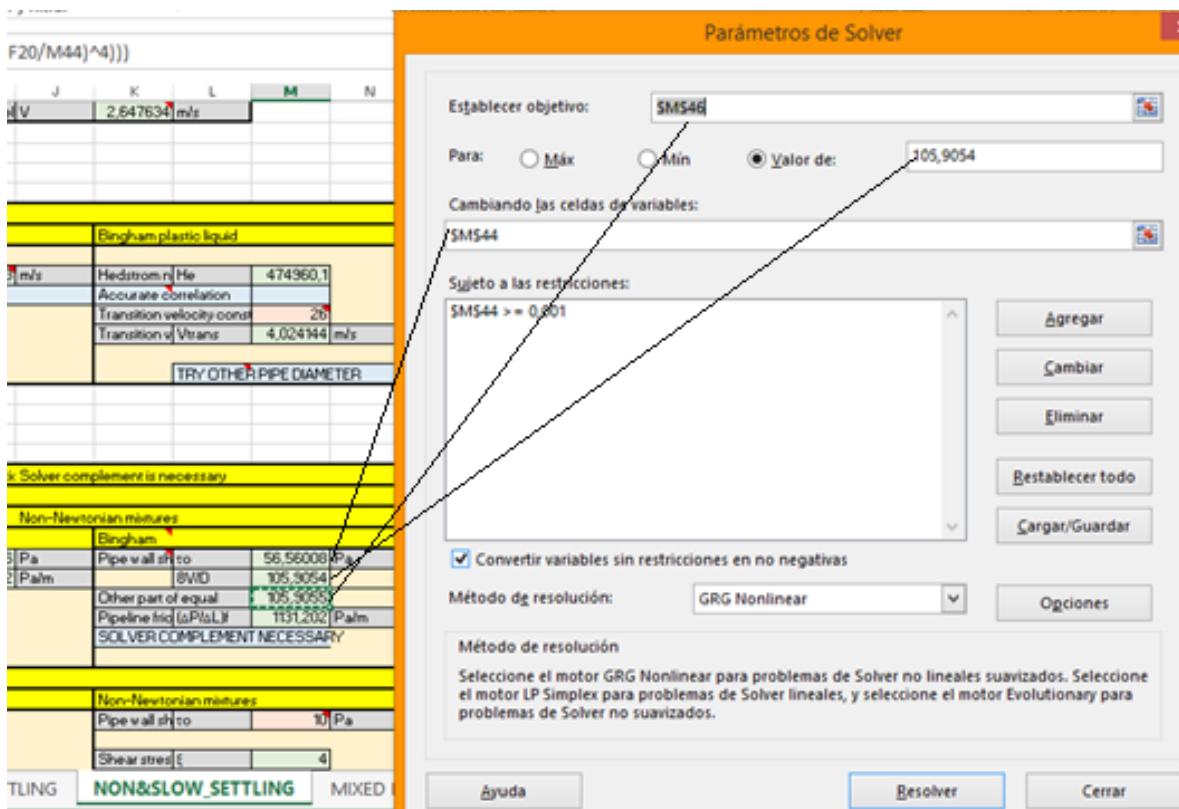
Como se puede observar con los parámetros de partida anteriormente citados, se obtiene un fluido con un asentamiento de partículas lento y por tanto su carácter es homogéneo.

A continuación, en estos fluidos es necesario una caracterización reológica con el fin de poder realizar una curva de ajuste y obtener así los parámetros del modelo de Herschel-Bulkley. En este caso de estudio, el fluido tiene tensión de fluencia (40 Pa) y por tanto, sabemos que nos encontramos ante un fluido no newtoniano.

El sistema nos indica que se está realizando el transporte de un plástico tipo Bingham, caso al que se intenta ajustar el reograma ya que simplifica los cálculos (Thomas, A.D. & Wilson, K.C., 2007). Se obtienen dos valores de la velocidad crítica para el flujo de esta mezcla en donde el flujo cambia de laminar turbulento. Los datos obtenidos son 1,57 m/s en el modelo de la curva de Hanks y 1,27m/s. Además, existiría un tercer método para la determinación de la velocidad crítica intersecando las dos curvas de flujo. De todas maneras, los otros dos modelos validan la velocidad de la tubería para el diámetro elegido inicialmente.

En el caso de las mezclas no newtonianas en régimen laminar se emplea el complemento de “solver” para el cálculo del gradiente de presión por fricción tal y como se muestra en la Figura 4.

Figura 4: Empleo del Solver para el cálculo del gradiente de presión en flujo laminar



Para el cálculo en régimen turbulento será necesario obtener el reograma de un fluido newtoniano equivalente con su viscosidad que será introducida en los inputs anteriormente mostrados. De esta manera se calculará el gradiente de presión por fricción en la tubería y la nueva velocidad que se dará debido al modelo empleado de Wilson, la intersección entre los dos reogramas nos dará el valor de la tensión de corte en la pared de la tubería que se tendrá que introducir.

Para el cálculo de los coeficientes de reducción de carga y eficiencia para una bomba se requieren las características de las bombas de los catálogos de fabricantes y la bibliografía especializada (Wilson, Addie, Sellgren, & Clift, 2006). Se escoge una bomba que nos permita obtener un caudal de 0,083 m³/s o lo que es lo mismo aproximadamente 299 m³/h.

Por lo tanto para un fluido sin asentamiento los parámetros de reducción de carga y eficiencia que se obtienen son los siguientes:

Figura 5: Coeficientes de reducción de carga y eficiencia para la bomba

CENTRIFUGAL PUMP DERATING						
SETTLING SLURRIES						
Impeller diameter	Di	0,89	m	Head derating	Hr	1,432926
Volumetric concentration	Cv		%/100	Efficiency deratin	Er	1,223584
Average particle size	d		m			
NON & SLOW SETTLING SLURRIES						
Water pump head	Hw	56	m	Newtonian		
Water pump flow rate	Qw	0,1	m ³ /s		Hm	2
Water pump efficiency	η_w	0,65	%/100		Qm	2
	Qbep-w	0,08	m ³ /s		η_m	0,7
	Hbep-w	45	m		Ch	1
Pump speed	N	1550	RPM		Cq	1
					Ce	1
Non-Newtonian						
					Hr	0,936039
					Er	0,744984

Como se puede observar los ratios de reducción de carga y de eficiencia para un fluido no newtoniano serán 0,94 y 0,74 respectivamente

Las presiones totales en la tubería teniendo en cuenta el tipo de fluido, inclinación, bombas, y materiales vendrán calculados en la tabla "HYDRAULICS", como se puede ver en la Figura 6.

Figura 6: Características finales de la tubería

HYDRAULICS							
Lenght of the pipe line	L	10000	m	Pipeline characteristics			
Pipeline angle of inclination	ϕ	3	°	Total pressure gradient	$\Delta P/\Delta L$	8574121,639	Pa/m
Pipeline friction pressure gra	$(\Delta P/\Delta L)f$	1200	Pa/m	Hydraulic gradient	j_m	523,43282	m/m
Pipeline flow rate	Q	0,08317787	m ³ /s	Total pressure loss in the pipe	Ptotal	85741216393	Pa
Head ratio	Hr	0,94		Total head loss in the pipe line	Htotal	5234328,2	m
Head ratio due to wear	Hwear	0,9		Pump characteristics			
Efficiency ratio	Er	0,74		Flow rate required	Q	0,083177875	m ³ /s
Efficiency ratio due to wear	Ewear	0,9		Head require d	H	63	m/m
Pump head generated at the	Hw	60	m/m	Efficiency	η	0,66	
Pump clear efficiency at the	η_w	0,6	%/100	Pump output shaft power	Pmo	133958,5227	W

Para el transporte se empleará una tubería de acero con una especificación de material API 5L y por tanto se tendrán en cuenta valores típicos para ella.

El cálculo del espesor de la pared de la tubería se realizará a partir de los estándares ASME B31.3 y ASME B31.4 (Stewart, 2016), empleando valores propios de cada tipo de tubería teniendo en cuenta la especificación del material.

Con todo esto se tendría caracterizada el flujo del fluido a lo largo de una tubería además de las características de la tubería.

Con el fin de poder optimizar el proceso se debería ir probando diferentes tipos de diámetros para poder reducir el desgaste de los materiales, y seleccionar la velocidad máxima de

operación dentro de los límites proporcionados por el sistema, para así optimizar el tamaño de la tubería y las bombas con el fin de reducir los costes de inversión iniciales y, a su vez, intentar reducir el mantenimiento del sistema.

El ejemplo presentado pone de manifiesto la enorme utilidad del sistema de ayuda a la decisión desarrollado, sobre todo en las etapas iniciales de la fase de diseño de tuberías de transporte de sólidos.

6. Conclusiones

El transporte de fluidos densos es un campo en desarrollo que necesita ser investigado en mayor profundidad, con el fin de poder modelizar de forma más precisa el flujo de cualquier tipo de fluido en una tubería.

La tendencia actual hacia el transporte de materiales cada vez más densos, supone un reto para los materiales empleados en el proceso, exigiéndose cada vez unas mejores prestaciones en sus propiedades, y, por tanto, requiriéndose una mayor investigación en el ámbito de los nuevos materiales. El buen diseño del sistema de tuberías evitará futuros problemas en el proceso industrial, pudiendo marcar la diferencia entre el éxito o fracaso del mismo.

Recientemente el Know-How de esta tecnología se ha convertido en objetivo de todas las empresas mineras con el fin de optimizar todo el proceso de extracción del material. Esto implica un ahorro energético importante, así como de facilitar la operación y reducir tanto tiempos muertos como mantenimientos, resultando así en una mejora de carácter muy importante en el ámbito global de la empresa.

El trabajo aquí presentado proporciona una herramienta de ayuda al diseño de tuberías de transporte de sólidos, incorporando todos los cálculos necesarios para conseguir un dimensionamiento completo del sistema, sin demandar al usuario grandes conocimientos de fluido-dinámica avanzada.

Para una caracterización óptima del sistema de transporte, se han de tener en cuenta multitud de factores como puede ser la velocidad de transporte así como su relación con el desgaste de los elementos, la uniformidad de las partículas e incluso pequeñas pérdidas que se puedan llegar a dar. Todo esto tiene como objetivo final obtener una modelización lo más exhaustiva posible y así eliminando riesgos que se puedan ocasionar en los procesos.

La herramienta realiza un dimensionamiento de las tuberías y bombas en función de sus características, además de la selección de materiales. Para cada caso se obtienen las pérdidas de carga en tubería, así como de la velocidad de transporte. Además, se tienen en cuenta parámetros de mantenimiento del sistema debido al desgaste y corrosión, así como métodos para minimizarlo.

7. Bibliografía

- Argoti-Caicedo, A. (2015). Reología de las mezclas fermentativas. Recuperado a partir de <http://biorreactores.tripod.com/C5RMF.htm>
- Ihle, C. F. (2013). A cost perspective for long distance ore pipeline water and energy utilization. Part I: Optimal base values. *International Journal of Mineral Processing*, 122, 1-12.
- Ihle, C. F., Tamburrino, A., & Montserrat, S. (2014). Computational modeling for efficient long distance ore transport using pipelines. *Minerals Engineering*, 63, 73-80.
- Saramito, P. (2009). A new elastoviscoplastic model based on the Herschel–Bulkley viscoplastic model. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 158(1–3), 154-161. <http://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2008.12.001>

- Stewart, M. (2016). 2 - Piping standards, codes, and recommended practices. En *Surface Production Operations* (pp. 17-158). Boston: Gulf Professional Publishing.
Recuperado a partir de
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978185617808200002X>
- Tenaris. (2015). Mineral Slurry Pipelines. Recuperado a partir de
<http://www.tenaris.com/en/Products/OnshoreLinePipe/MineralSlurryPipelines.aspx>
- Thomas, A.D., & Wilson, K.C. (2007). Rough-Wall and turbulent transition analyses for Bingham plastics. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 107, 359-365.
- Wilson, K. C., Addie, G. R., Sellgren, A., & Clift, R. (2006). *Slurry Transport Using Centrifugal Pumps*. Springer Science & Business Media.