

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA



**"POTENCIALIDAD DEL TRANSPORTE HIDRAULICO DE
SOLIDOS A LARGAS DISTANCIAS EN LA MINERIA PERUANA"**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

JORGE ADELFO LEON FLORIAN

LIMA - PERU

1998

POTENCIALIDAD DEL TRANSPORTE HIDRAULICO DE SÓLIDOS A LARGAS DISTANCIAS EN LA MINERÍA PERUANA

ÍNDICE

CAPITULO 1 : GENERALIDADES

- 1.1 Introducción
- 1.2 Breve Historia de esta Tecnología
- 1.3 Aplicaciones Relevantes a Nivel Mundial
- 1.4 Experiencias Relevantes en Chile
- 1.5 Experiencias Recientes en Perú
- 1.6 Definición de Términos
- 1.7 Análisis de las distintas soluciones para el transporte de sólidos en la Industria Minera
- 1.8 Razones para la Aplicación de esta Tecnología en la Industria Minera Peruana

CAPITULO 2 : CONCEPTOS HIDRAULICOS FUNDAMENTALES

- 2.1 Hidráulica Clásica Referencial
- 2.2 Sedimentología del Sólido a Transportar
- 2.3 Velocidad Mínima de Flujo
- 2.4 Pérdida de Carga
- 2.5 Técnica General de Bombeo
- 2.6 Desgaste en Línea de Pulpa por Abrasión y Corrosión

CAPITULO 3 : CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO

- 3.1 Características del Sólido a Transportar
- 3.2 Determinación del Rango de Flujos
- 3.3 Selección del Tipo de Ducto
- 3.4 Selección del Tipo de Bomba a Usar (Centrífuga & Pistón)
- 3.5 Tecnología de Instrumentación y Control a Usar
- 3.6 Sistemas de Protección Contra Riesgo Ambiental
- 3.7 Filosofía General de Operación
- 3.8 Planificación y Control de Obras

CAPITULO 4 : TECNOLOGÍA DE EQUIPOS Y MATERIALES

- 4.1 Selección de Tuberías
- 4.2 Selección de Válvulas de Pulpa
- 4.3 Selección de anillos de Disipación de Energía y Discos de Ruptura
- 4.4 Selección de Bombas de Pulpa
- 4.5 Agitadores de Pulpa
- 4.6 Selección de Instrumentos en Línea y Controladores

CAPITULO 5 : EVALUACIÓN ECONÓMICA

- 5.1 Introducción
- 5.2 Costos Unitarios de Inversión en Sistemas de Transporte de Pulpa
- 5.3 Valorización Total de Inversiones
- 5.4 Valorización de Costo de Operación
- 5.5 Costo Total Unitario en Transporte Hidráulico de Sólidos
- 5.6 Flujos de Caja

CAPITULO 6 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

6.2 Recomendaciones

ANEXOS

**TABLAS Y GRÁFICOS DE USO PRACTICO EN TRANSPORTE
HIDRAULICO DE SÓLIDOS**

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

Todos los peruanos conscientes de las riquezas que nuestro País dispone, en especial en el campo de los yacimientos minerales coincidiremos en afirmar que gran parte de estos se encuentran ubicados en la alta cordillera, a cotas superiores a los 2,500 m.s.n.m, y que presentan las dificultades propias de la minería en altura para su prospección, diseño y operación.

Asimismo, las condiciones geográficas habituales de nuestra cordillera, con valles estrechos y laderas de alta pendiente, dificultan los accesos, los suministros de agua y energía, además de presentar fuertes limitaciones de espacio para la instalación de Plantas Concentradoras y canchas de relaves.

En el presente trabajo tratamos de modelar el diseño global de un complejo minero, que defina alejar la planta Concentradora del yacimiento, que tenga alejado los depósitos de relaves o el embarque de los concentrados. Siendo necesario para cumplir estos objetivos la selección del sistema de transporte que sea más conveniente para lograr un abastecimiento continuo y confiable, y que presenten un costo de inversión y operación razonable.

Como es de nuestro conocimiento las soluciones más habituales para el transporte de productos mineros son camiones, vía férrea, andarivel, cinta transportadora y en muy pocos casos el transporte hidráulico, por lo tanto; quisiéramos subrayar que el transporte hidráulico, otorga la posibilidad de trasladar grandes cantidades de sólidos a larga distancia en forma continua mediante un fluido transportante generalmente agua.

Por lo expuesto, nuestro objetivo se centra en el resumen de las consideraciones y conocimientos empíricos y tecnológicos principales, así como su entorno económico y

operacional relativos al diseño y funcionamiento del sistema de transporte hidráulico de sólidos a grandes distancias de aplicación Internacional, Regional y Nacional.

Finalmente dejo para su evaluación las conclusiones finales; haciendo mención de las referencias Bibliográficas.

JORGE LEÓN F.

CAPITULO I

1.0 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de los Países de América del sur, en especial nuestro País, disponen de importantes yacimientos de minerales ubicados en la alta cordillera, la mayoría de ellos a cotas superiores a los 2,500 m.s.n.m, que presentan las dificultades propias de la minería en altura para su prospección, diseño y operación.

Las condiciones anteriores han implicado que en algunas operaciones se haya preferido separar geográficamente la planta concentradora o las canchas de relaves del yacimiento, en distancias considerables, que alcanzan varias decenas de kilómetros. Esto determina un sistema de transporte de minerales, relaves o productos de gran longitud, en condiciones climáticas que pueden ser muy adversas durante el invierno, atravesando zonas de avalanchas de nieve, bajas temperaturas y serias restricciones de acceso.

Las soluciones más habituales para el transporte de productos mineros son camiones, vía férrea, andarivel, cinta transportadora y transporte hidráulico.

El transporte hidráulico, otorga la posibilidad de trasladar grandes cantidades de sólidos a larga distancia en forma continua mediante un fluido transportante, habitualmente agua.

Esto, que también se observa en la naturaleza, en el arrastre de sedimentos por los ríos o en el transporte de arena por el viento, puede ser utilizado por el hombre, aprovechando para ello la fuerza de gravedad o la potencia entregada mediante bombeo a la mezcla fluida

El transporte hidráulico de sólidos o flujo de pulpas, es susceptible de ser modelado matemáticamente en forma bastante rigurosa y general; empero las ecuaciones resultantes del llamado modelo "exacto" son además de complejas desde el punto de vista matemático, incompletas en el sentido de que contienen siempre términos de difícil estimación a la luz de los estudios realizados hasta hoy en día.

Sin embargo, debido a la urgencia tecnológica de resolver problemas de interés industrial, ha sido necesario buscar soluciones rápidas para definir sistemas de flujo de pulpas de diseño aproximado.

Surgió así una buena cantidad de modelos empíricos, basados en su mayoría sólo en consideraciones de análisis dimensional que permiten resolver los sistemas de transporte hidráulico de sólidos en forma aproximada, pero de forma tal que es posible desarrollar proyectos con un alto grado de seguridad de éxito.

Por ser un método más seguro y de mayor grado de utilización en los países desarrollados sobre todo en los transportes de sólidos a grandes distancias, el transporte hidráulico de sólidos por tuberías (en presión) ha recibido un mayor desarrollo científico y tecnológico, en cambio el transporte hidráulico de sólidos por canaletas corresponde a aplicaciones muy puntuales.

1.2 BREVE HISTORIA DE ESTA TECNOLOGÍA

El transporte de sólidos por tuberías hizo su aparición en el año de 1,850, durante la fiebre del oro en California, al construirse un elevador hidráulico para subir las arenas de los placeres mezclados con agua hasta un lugar 50 pies más alto, desde donde partía la canaleta de lavado de oro.

La segunda aplicación de este sistema vino a efectuarse solamente 30 años más tarde, al diseñarse un método de extinción de incendios en minas de carbón, consistente básicamente en un chorro de agua con alto contenido de partículas finas de relave. Este dispositivo obligaba a tener una red de tuberías que transportara la mezcla, desde la superficie hasta los frentes de trabajo en la mina.

Posteriormente en el año 1,889, WALLACE ANDREWS en los Estados Unidos, reclamó una patente para un sistema que bombeaba sólidos a través de un ducto. Esta patente declaraba un método para: Transportar materiales sólidos en condiciones naturales o artificiales, de tamaños finos, que son introducidos en un líquido y transportados a distancia mediante una tubería, ya sea por gravedad o mediante bombeo.

En otros países se alcanzaron tempranamente algunos éxitos en diseños de circuitos de planta, por ejemplo, en Malasia en el año 1,900 se puso en marcha un sistema que bombeaba agua con casiterita, el cual estuvo en funcionamiento varios años.

El primer estudio científico de transporte hidráulico de sólidos fue realizado solamente en el año de 1906 por MISS NORA BLACH, en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Cornell. Este trabajo consistió básicamente en

mediciones experimentales de la pérdida de carga de una tubería horizontal, de 10 metros de longitud y 01 pulgada de diámetro, por las cual fluía una mezcla de agua con distintos tipos de arena.

La primera aplicación industrial de transporte de sólidos a distancias largas, fue hecho en Inglaterra en el año 1,914, en el traslado de carbón desde un punto de descarga fluvial a una casa de fuerza ubicada a 500 metros de distancia.

Esta instalación, que permitió transportar 25 toneladas por hora através de una tubería de 8 pulgadas de diámetro, fue la abrió definitivamente el camino para la construcción de este sistema de transporte, al presentar algunas ventajas frente a otros sistemas de transporte utilizados.

La puesta en marcha de este tipo de instalaciones creció muy rápidamente concentrándose en el transporte de materiales livianos, tales como el carbón, caolín, fosfatos, etc , hasta pasada la segunda guerra mundial. Con el avance en el desarrollo tecnológico a partir de la postguerra se pudo entrar a transportar materiales pesados, tales como de Níquel, de fierro , concentrados de cobre, etc.

En la actualidad se han construido mineroductos de colosales longitudes, mayores de 800 km., no existiendo restricciones fuertes para el tamaño de los sólidos, los cuales pueden alcanzar algunas pulgadas de diámetro. Un buen ejemplo del alto desarrollo tecnológico alcanzado lo da la tubería para transportar minerales de fierro de Samarco en Brasil, capaz de transportar 12 millones de toneladas por año através de 400 km. de selva, con mínima intervención humana en la operación.

En el caso de Chile, es de reconocimiento Mundial el fuerte auge minero de las últimas décadas, ello posibilitó un gran crecimiento de esta técnica, gran parte como desarrollo de tecnología autónoma.

Ese crecimiento de la técnica del transporte hidráulico de sólidos en Chile se manifiesta claramente en el GRAFICO N° 1.1, donde se presenta la magnitud global de los sistemas de conducción, para el final de la década.

En el gráfico ya indicado se ha definido un parámetro que integra la multiplicación de la longitud de cada sistema de transporte hidráulico existente, en kilómetros, por el respectivo flujo de sólidos transportados, en toneladas de sólido seco por día.

En dicho gráfico puede observarse que a fines de la década del 50, habían instalaciones equivalentes a 3.80 millones de Km. x Ton/día.

1.3 APLICACIONES RELEVANTES A NIVEL MUNDIAL

Las aplicaciones de transporte hidráulico de sólidos mediante canaletas, es una tecnología bastante antigua. Por su parte la utilización de tuberías, siendo más nueva ya es una tecnología probada y que cuenta con más de 20 años de experiencias en el caso de algunos ejemplos actualmente en operación. (ver CUADRO N° 1)

Algunas aplicaciones importantes a nivel mundial se describen brevemente en el siguiente resumen

DESARROLLO EN CHILE DEL TRANSPORTE DE PULPAS A GRANDES DISTANCIAS

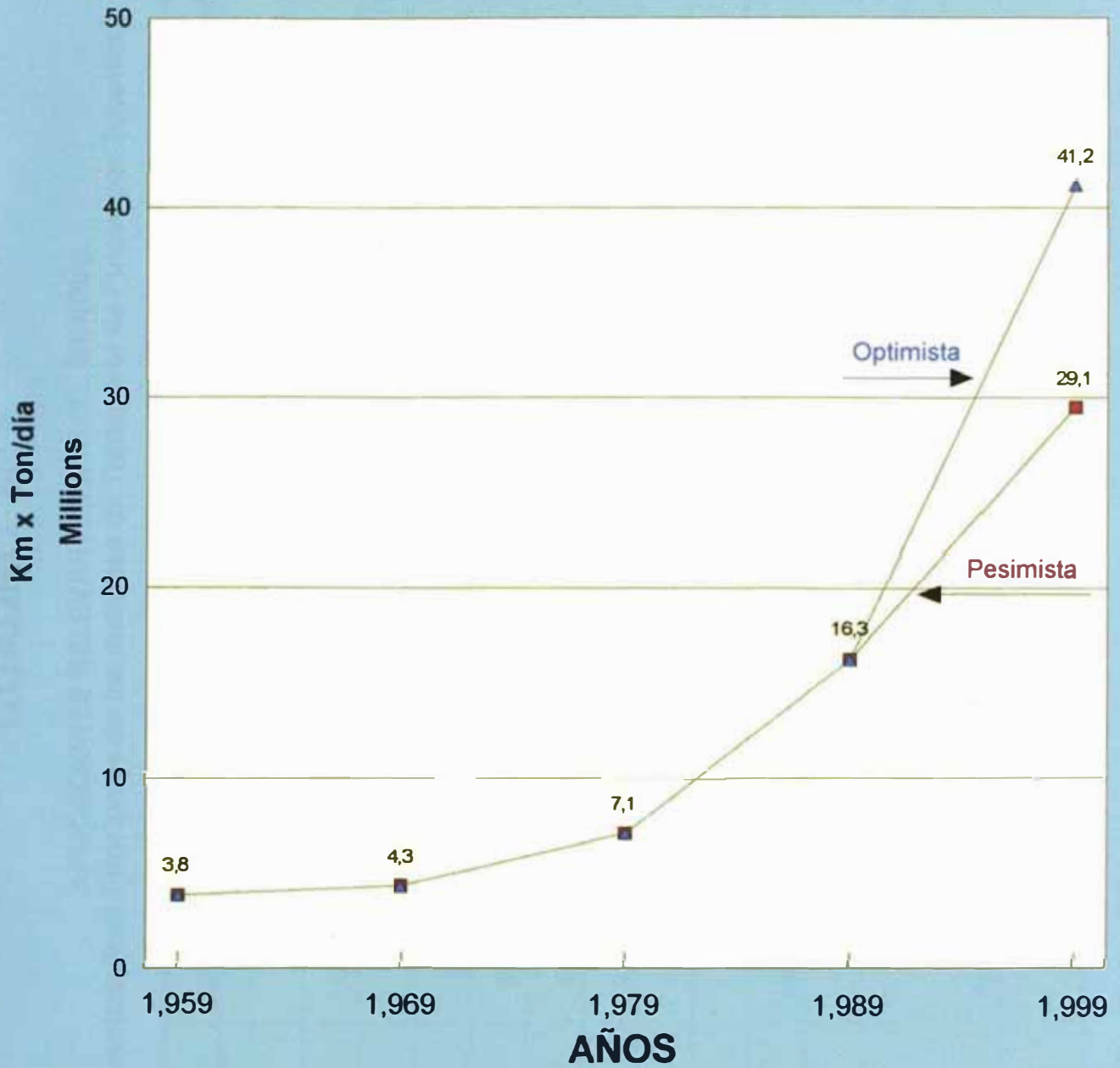


GRAFICO N° 1.1

CUADRO N° 1

APLICACIONES RELEVANTES A NIVEL MUNDIAL (Características Principales de los sistemas de Transporte de Pulpas por Tuberías)

Descripción	Unid.	Black Mesa Coal Pipeline	Savage River Pipeline	Consolidation Coal Pipeline	Rugby Portland cement Co.	West Irian	Samarco
Ubicación		Arizona EE.UU.	Tasmania AUSTRALIA	Cádis-Ohio CANADA	INGLATERRA	INDONESIA	BRASIL
Inició Operación	Años	1,970	1,967	1,957	1,964	1,973	1,979
Material de la Tubería		Acero	Acero	Acero	Acero	Acero	Acero
Longitud mineroducto	Km	439	85	174	92	111	392
Diámetro de la Tubería	Pulg.	18	9 5/8	10	10	3	20
Peso de Fe	Ton.	60,000	3,300	6,700	3,500	1,500	60,000
Tiempo de Operación	Años	23	26	36	29	20	16
N° de Est. Bombeo		3	1	3	--	--	2
N° de Est. Disipadoras		--	--	--	--	--	3
Flujo Másico	MT/A *	5.50	2.25	1.30	1.70	0.50	12.00
% de Sólidos	%	60	60	--	--	--	65
Material Transportado		Mineral Carbón	Concentrado Hierro	Mineral Carbón	Cal	Concentrado Cobre	Concentrado Hierro
Densidad del Sólido	Ton/m3	--	4.20	--	--	--	4.20
Granulometría (Mesh - Tyler)		100% - #14	100% - #100	--	--	--	96% - #200

* MT/A :::> Millones de Toneladas por año.

Black Mesa Coal Pipeline

Black Mesa posee el sistema de transporte de pulpa más grande y extenso en operación hasta la fecha, de 439 Km. Se ubica en el estado de Arizona, EE.UU. y su puesta en marcha data del año 1,970. El mineroducto es capaz de transportar sobre 5.5 millones de toneladas de carbón anualmente.

En el proceso previo el mineral extraído es reducido a 3/4" por chancadoras y posteriormente es molido en un circuito de tres molinos de barras en paralelo (- 14 Mesh Tyler). De los molinos de barras, la pulpa es almacenada en tres estanques agitadores que alimentan la estación de bombeo a lo largo de la ruta. Finalmente es descargado en la planta de fuerza Mohave ubicada en Nevada al lado del río Colorado.

Savager River Pipeline

El primer mineroducto para transportar concentrado de Fe. a larga distancia tiene 85 Km y un diámetro de 9 5/8". Se sitúa en la isla de Tasmania, Australia y atraviesa terreno muy riguroso desde el concertador Menesita en Sagaver River a Port Latta donde se peletiza.

Esta mina se conocía desde hacía 100 años, sin embargo se consideraba inaccesible debido a la lejanía de las fuentes de agua. El concepto de transporte de pulpa en tubería hizo posible la explotación económica de este yacimiento. El sistema está en operación desde noviembre de 1967 y está diseñado para transportar 2.25 millones de toneladas de concentrado de fierro al año, siendo necesario a lo largo del trazado sólo una estación de bombeo.

Consolidación Coal Pipeline

Consolidation Coal Co. puso en operación en 1957 un mineroducto para transportar pulpa de carbón. Esta línea se extiende desde Cádiz, Ohio a Eastlake, Ohio, tiene una longitud de 174 Km. y 10" de diámetro. a lo largo de su trazado requiere 3 estaciones de bombeo, cada una con bomba de doble pistón de desplazamiento positivo de 450 HP, lo que permite transportar 1.3 millones de toneladas al año de pulpa de carbón.

Rubby Portland Cement Co.

existen muchos sistemas para transporte de cal, la más grande está ubicada en Inglaterra y pertenece a Rubby Portland Cement Co.

Esta línea alcanza una longitud de 92 Km. con un diámetro de 10".

West Irian

Esta mina se encuentra ubicada en Indonesia. El sistema está diseñado para transportar 0,3 millones de toneladas al año de concentrado de cobre a través de una tubería de 111 Km. de longitud y 3" de diámetro.

Samarco Pipeline

Samarco Pipeline S.A. opera una mina a tajo abierto capaz de producir 10 millones de toneladas de mineral de hierro al año, un concentrador y una planta de filtrado y peletización que entrega 7 millones de toneladas de concentrado de hierro al año

Para transportar el concentrado de fierro desde la planta Concentradora hasta la planta de peletización se construyó un sistema de transporte de pulpa. El mineroducto tiene una longitud de 396 Km. y un diámetro de 20" excepto en una sección de 53 Km. que tiene un diámetro de 18"

El sistema es capaz de transportar 12 millones de toneladas al año con una concentración en peso de 65% además cuenta con dos estaciones de bombeo y 3 estaciones disipadoras. En estas últimas el diámetro de los orificios cerámicos varía desde 4" a 5"

1.4 EXPERIENCIAS RECIENTES EN CHILE

Como ya se ha mencionado, el transporte de sólidos a grandes distancias ha tenido en Chile un acelerado crecimiento en las últimas tres décadas. Como ejemplo de ello se hará una breve descripción de 4 instalaciones de conducción de pulpas mineras, de reciente construcción. (ver CUADRO N° 2)

Canaleta de Transporte de Relaves de El Teniente

En la década pasada, la División El Teniente de Codelco Chile construyó un nuevo embalse de relaves "Tranque Carén", ubicado en la zona del valle central, a 80 Km. aproximadamente de las instalaciones de la planta que se ubica en las zonas cordilleranas

Para este transporte, que es de más de 1,000 l/s de pulpa de relaves, se construyó una canaleta de hormigón de 1.4 m de ancho.

CUADRO N° 2

APLICACIONES RECIENTES EN CHILE
(Principales Características del Sistema de transporte por Tuberías)

Descripción	Unid.	Cia Minera Disputada	Cia Minera Escondida
Inició Operación	Años	1,992	1,990
Material de la Tubería		Acero	Acero
Longitud mineroducto	Km	56	185
Diámetro de la Tubería	Pulg.	20	6
N° de Est. Bombeo		–	1
N° de Est. Disipadoras		04	–
Flujo Másico	MT/A *	11.10	1.20
Material Transportado		Mineral Cobre	Concentrado Cobre
Porcentaje de sólidos	%	–	60
Densidad relativa del Sólido	Ton/m3	–	2.10

* MT/A :> Millones de Toneladas por año.

NOTA: El sistema de transporte de mineral por tuberías de Cia Minera Disputada inicia sus operaciones a 3,400 m.s.n.m y finaliza a los 759 m.s.n.m.

En su trayecto, se requirió de diversas obras hidráulicas adicionales, como son: un sifón invertido, Cámaras de disipación (drop boxes) y cascadas en alta pendiente.

esta conducción ya tiene 8 años de operación sólo interrumpida para mantenimientos programados.

Sistema de Transporte de Pulpas de Disputada

La Cia. Minera Disputada de las Condes S.A., trasladó su concentrador a la zona del valle central, por lo que debe conducir el mineral desde sus instalaciones en la zona cordillerana a Tórtolas, donde también tiene su embalse de relaves.

El mineroducto conduce el mineral entre la Planta de Molienda en los Bronces a una elevación de 3,400 m.s.n.m. y la Planta de Flotación en las Tórtolas a 759 m.s.n.m., en forma hidráulica, en tubería en presión y usando sólo energía gravitacional

Para una mejor comprensión de este mineroducto dividiremos su descripción en las siguientes áreas principales: El Sistema de cabeza, la Conducción, el Sistema de Disipación de Energía, el Sistema de Drenajes y Venteo, la Alimentación Eléctrica y la instrumentación y Control.

El **Sistema de Cabeza**, ubicado en Los Bronces tiene por objeto recibir y acondicionar la pulpa proveniente de los espesadores de la Planta de Molienda, para ser alimentada en forma estable, segura y eficiente al mineroducto. El elemento estabilizador del sistema son dos estanques de hormigón provistos de sendos agitadores de 200 HP y un volumen total de 4,200 m³, lo que

proporciona un tiempo de resistencia del orden de tres horas y permite absorber las variaciones de operación de la Planta de Molienda.

El **Sistema de Conducción** consiste en una línea de acero de 20" de diámetro y 56 Km. de longitud, enterrada en una zanja a profundidad variable entre 1.3 m y 4.0 m, con excepción de aproximadamente 8 Km. en que la tubería atraviesa túneles y puentes.

La conducción se inicia en el distribuidor presurizado ubicado en Los Bronces, a 3,400 m.s.n.m. y termina en el estanque de carga de Planta de Flotación de Las Tórtolas, a 780 m.s.n.m.

En su recorrido atraviesa 6 valles, sorteando los accidentes geográficos mediante 3 túneles de una longitud total de 8 Km. y 5 puentes, con una longitud de 300 m.

El acceso a la conducción se logra mediante 77 Km. de caminos de operación, 45 Km. de los cuales coinciden con la plataforma en que va enterrada la tubería.

El **Sistema de Disipación de Energía** es el corazón del Sistema de Transporte de Pulpa.

Sus funciones principales pueden resumirse en:

Asegurar el flujo en presión a lo largo de la tubería.

Mantener velocidades que aseguren el transporte de los sólidos, sin riesgo de embanque.

Controlar la velocidad de la pulpa para evitar el desgaste excesivo de la línea.

Mantener las presiones máximas, a lo largo de la tubería, dentro de rangos de seguridad definidos.

Controlar las presiones mínimas en las salidas de las Estaciones Disipadoras para evitar cavitación.

Evitar la separación de la columna en los puntos altos del trazado.

Para cumplir estas vitales funciones este mineroducto cuenta con cuatro Estaciones Disipadoras a lo largo de su trazado, lo que le otorga una gran flexibilidad y seguridad operacional. Cada Estación Disipadora está formada por:

Una rama principal, de 24" de diámetro, con anillos disipadores fijos y variables

Una rama de reserva de 20" de diámetro con sólo anillos fijos, que permite realizar la manutención de la rama principal, sin interrumpir la producción.

Una rama de emergencia de 8" de diámetro conectada mediante discos de ruptura a la entrada y salida de las Estaciones, que actúa como una válvula de seguridad del Sistema frente a eventuales sobrepresiones.

Cada una de estas ramas cuenta con válvulas de corte que permiten su uso alternativo y facilitan la manutención.

El **Sistema de Drenaje y Venteo** está compuesto por cuatro embalses de emergencia y dos venteo. Los embalses de emergencia están diseñados con una capacidad concordante con el objetivo de evacuar la totalidad de la pulpa en tránsito en la tubería en el caso de presentarse una situación anormal o de emergencia. Dos venteo facilitan las operaciones de drenaje y llenado de la tubería, Permitiendo la eliminación del aire atrapado durante una llenado o su incorporación en casos de operación de drenaje.

Para el **Suministro de Energía Eléctrica** en los distintos centros de consumo, se siguió el siguiente criterio:

En los lugares donde existen sistemas de distribución de energía eléctrica, Los Bronces y Las Tórtolas, se Usó alimentación en 380 V y conexión a Sistemas Eléctricos de respaldo para equipos críticos (U.P.S. y generadores de emergencia).

En lugares remotos, optó por instalar grupos generadores a gas y bancos de baterías para los consumos de operación (accionamiento válvulas, radio comunicación, instrumentación y control e iluminación mínima) y grupos generadores Diesel móviles de 150 Kva, para accionamiento de puentes grúa y otros consumos de manutención.

El **Sistema de Instrumentación y Control** del mineroducto es la herramienta que permite el manejo total del sistema desde cualquiera de las dos Salas de Control ubicadas en Los Bronces y Las Tórtolas. Está compuesto por instrumentación de terreno, controladores lógicos Programables y comunicación de datos mediante radioenlaces UHF y microondas.

La instrumentación de terreno permite medir caudales, granulometrías y densidades de alimentación y descarga del mineroducto, a la vez que presiones en la entrada y salida de cada Estación Disipadora y en Estaciones de Drenaje y Venteo. Adicionalmente cuenta con termómetros, medidores de nivel, interruptores de flujo, indicadores de posición de válvulas, etc., instalados en distintos puntos del sistema.

El Sistema de control mantiene un monitoreo permanente de las variables más relevantes del proceso y equipos instalados, a la vez que hace posible realizar una amplia gama de operaciones automáticas como partidas, paradas, cambios de rama, cambios de configuraciones de anillos, etc.. Además de estas funciones de información y operación el Sistema de Control permite la detección y control automático de las fugas, lo que hace posible disminuir a un mínimo los riesgos de contaminación ambiental.

Sistema de Transporte de Concentrados de Minera La Escondida

Las instalaciones del S.T.P. de Escondida se pusieron en marcha el 01/12/90 y consiste en una tubería de acero de 189 Km. de longitud aproximada, con un diámetro mayoritario de 6", que impulsa mediante bombeo inicial y control de flujos con válvulas y anillos de disipación, un caudal medio de 28 l/s de pulpa con densidad relativa de 2.1

El S.T.P. Escondida tiene una capacidad de almacenaje a la cabecera para la producción de varios días (4-5), y opera a un 60% del tiempo solamente. Luego, su flexibilidad y capacidad remanente es considerablemente alta.

Canaleta de Transporte de Relaves de Andina

La División Andina de Codelco Chile tiene dentro de poco prácticamente agotadas sus capacidades de deposición de relaves en la alta cordillera, en sitios cercanos a sus instalaciones mineras. Por ello, está en proyecto, en etapa de finalización de Ingeniería Básica, una nueva conducción de relaves, consistente en una canaleta de 76 Km. de longitud que llevaría la pulpa a un depósito de relaves ubicado en el valle central.

Uno de los aspectos más interesantes de este proyecto es que los estudios de alternativas indican que en este caso resulta más económico la conducción en canaletas con respecto a la tubería, a pesar que en el trazado existen varias zonas de fuerte pendientes.

Es así, como el proyecto considera la conducción en canaletas en tramos de fuertes pendientes, que alcanzan valores de hasta el 3%. Para estos tramos se ha considerado el revestimiento en mampostería de piedra tanto de fondo como lateral.

Adicionalmente, en tramos con pendientes aún mayores el proyecto considera series de cámaras de caída, que en su totalidad disipan más de 200 metros de energía

El proyecto considera tramos de canaletas en túnel (3 túneles en una longitud total de 25 Km.), en los cuales, la pendiente de fondo es de 2.1%, por lo que se ha considerado albañilería de fondo

En la parte final de la conducción, donde ya se está prácticamente en el interior del depósito, el proyecto considera la conducción de relaves directamente sobre una quebrada existente, formado por roca.

Con respecto a la capacidad de la canaleta, el proyecto considera una expansión en conjunto con la construcción del nuevo embalse de relaves, por lo que la canaleta considera el caudal de la expansión el que corresponde a 860 l/s para una producción de 63 KTPD. Se espera que el proyecto sea una realidad a fines de esta década.

1.5 APLICACIONES Y PROYECTOS EN EL PERU

En nuestro país, a pesar del desarrollo de esta tecnología y aplicaciones más o menos frecuentes en el vecino país del sur en las últimas tres décadas. No se realizó ninguna aplicación de importancia, salvo aplicaciones un tanto empíricas en lo que conocemos como "relleno hidráulico" en distintas Unidades Mineras.

Es así que en Agosto de 1,994 se da inicio en nuestro medio a lo que es la única y ojalá la pionera aplicación de esta tecnología; en la actualidad se tiene 2 importantes proyectos relacionados con esta tecnología.(ver CUADRO N° 3)

Sistema de transporte de concentrados de Cia. Minera Iscaycruz.

Mina Iscaycruz, entró en operación a fines de 1,995 con un nivel de producción de 1,000 TMD, estimándose la producción de 320 toneladas de concentrado de Zinc y 20 toneladas de concentrado de Plomo diariamente. Después de 2 años se estima duplicar la capacidad de tratamiento, lo que significaría producir aproximadamente 700 toneladas de concentrados de Zn Y Pb al día.

Siendo la zona de difícil acceso, se realizó estudios para el transporte de los concentrados tanto por los sistemas convencionales, es decir camiones, y por el sistema de transporte hidráulico de sólidos por tuberías.

CUADRO N° 3

APLICACIONES Y PROYECTOS EN EL PERU (Principales Características del Sistema de transporte por Tuberías)

Descripción	Unid.	Cía Minera Iscaycruz	Cía Minera Antamina	Sociedad Minera la Granja	
				Mineroducto	Relaveducto
Inició Operación	Años	1,996	Proyecto	Proyecto -2001	Proyecto -2001
Nivel de Operación	TM/DIA	1,000	60,000	140,000	
Material de la Tubería		Acero	Acero	Acero	Acero
Longitud mineroducto	Km	25	210	265	62
Diámetro de la Tubería	Pulg.	3 1/2	--	36	--
N° de Est. Bombeo		--	--	2	--
N° de Est. Disipadoras		01	--	--	2
Flujo Másico Nominal	MT/A *	0.7	--	--	--
Material Transportado		Concentrado Zinc	Concentrado Cobre	Concentrado Cobre	Relaves
Porcentaje de Sólidos	%	60	--	55	55
Densidad relativa del Sólido	Ton/m3	2.10	--	--	--

* MT/A :::> Millones de Toneladas por año.

NOTA: El sistema de transporte de mineral por tuberías de Cía Minera Iscaycruz inicia sus operaciones a 4,600 m.s.n.m y finaliza a los 2,200 m.s.n.m.

Encontrándose que el transporte de los concentrados desde la mina y con sistemas convencionales, encarecería mucho el proyecto debido a la inversión que se debe realizar en una carretera y por el costo del flete. Por otra parte resultaba más ventajoso y de un costo unitario menor al sistema convencional, la construcción de un mineroducto para transporte de concentrados en pulpa a largas distancias.

Para transportar los concentrados desde la Planta Concentradora en mina Iscaycruz a una elevación de 4,600 m s.n.m y la planta de filtrado o secado que estará ubicada en el sector de Churin a una elevación de 2,200 m.s.n m , se esta construyendo un sistema de transporte de pulpa. El mineroducto tendrá una longitud de 24 Km. y con una tubería de acero Norma API 5L Grados X52 y X65 de 3 ½” de diámetro nominal y espesores variables entre 6.4 mm. Y 8.1 mm., protegida exteriormente con revestimiento epóxico.

El caudal promedio de pulpa es de 12 l/s con una concentración de sólidos del 60%. El sistema funciona en forma gravitacional aprovechando la energía disponible entre la alimentación y la descarga para conducir el caudal de pulpa deseado. Más aún, existe un excedente de energía que será disipado mediante una estación disipadora ubicada en la descarga del mineroducto.

Cabe indicar, que por razones seguramente de seguridad no fue posible obtener mayor información sobre este interesante proyecto.

Proyecto “construcción mineroducto de Cia. Minera Antamina”

El yacimiento de Antamina ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, Departamento de Ancash; con reservas del orden de los 500 millones de

toneladas con una ley de 1.2% de cobre; planea operar a un ritmo de 60,000 TM/día.

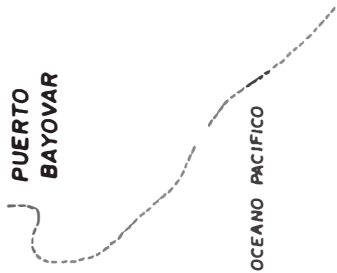
Paralelamente a los trabajos de exploración, la empresa desarrolla estudios relativos a la construcción de un mineroducto de 210 Km. Que transportará los concentrados hasta un puerto que estaría ubicado entre Supe y el norte de Huarmey, donde se construiría una planta de secado del mineral para su exportación a los mercados internacionales. Aunque no se descarta la construcción de una fundición y una refinera.

Proyecto “construcción mineroducto y relaveducto de Sociedad Minera la Granja”

Este importante yacimiento ubicado en el Distrito de Querocoto, Provincia de Chota, Departamento de Cajamarca, cuenta con un nivel de reservas de 2,000 millones de toneladas con una ley promedio de 0.60% de cobre. En el estudio de factibilidad se plantea un nivel operación de 140,000 TM/día (100,000 por flotación y 40,000 por lixiviación) a iniciarse el año 2001.

Además de la infraestructura de la mina, se construirá un tunel transandino que atravesará la cordillera occidental de los andes en dirección este - oeste de 11 Km. de longitud, por el cual pasarán hacia la costa tres elementos paralelos: la carretera, el mineroducto de 265 Km. que transportará los concentrados hasta la planta de filtrado ubicada en el puerto de Boyovar. Aproximadamente los primeros 150 Km del transporte serán por gravedad y luego será ayudado por dos estaciones de bombeo; y otra tubería transportará los relaves de la planta de flotación por gravedad hasta el depósito de relaves ubicado en el valle semidesértico de los Bravos, a 62 Km al sur oeste de la concesión y a una

PUERTO
BAYOVAR



OCEANO PACIFICO

LA GRANJA



TUNEL
(10.8 Km)



MINERODUCTO
(2.85 Km)

ESTACIONES DE
DISIPACION DE ENERGIA

ruta de acceso

ESTACION DE BOMBEO

ruta a bayovar
(182 Km)

CUMBIL

LAMBAYEQUE

CHONGOYAPE

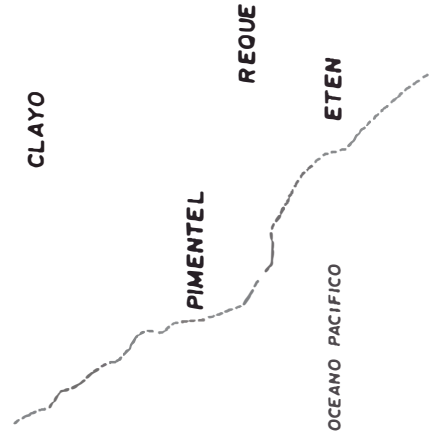
RELAVEDUCTO
(5.8 Km)

CLAYO

LOS BRAVOS

AREA DE RELAVES

PIMENTEL



REQUE

OCEANO PACIFICO

ETEN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA PROY. CUPRIFERO LA GRANJA, MINERODUCTO Y RELAVEDUCTO

DIBUJO:
JORGE LEON

ESCALA:
S/E.

FECHA:
DICIEMBRE '97

LAMINA N°:
A

elevación promedio de 350 msnm. El propósito del tunel y los ductos es ahorrar costos de transporte por distancia.

En ambos casos (relave y concentrado), la pulpa se transportará a una densidad de 55% sólidos para evitar un desgaste prematuro de la tuberías.

1.6 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

A continuación se definirán algunos términos de uso habitual en sistemas de transporte de pulpas.

* **Pulpa**

Mezcla agitada de una fase de sólidos disgregados y un líquido soportante (agua).

* **Transporte de Pulpas a Grandes Distancias**

Como una definición semántica debe entenderse este término como la conducción hidráulica de sólidos de la industria minera, ya sea mineral molido, concentrados o relaves, a ritmos de producción sobre 100 Ton/día y distancias superiores a 1 Km.

* **Longitud por Tonelaje Diario (Km. x Ton/día)**

Este es un parámetro que indica la magnitud del sistema de conducción y corresponde al tonelaje nominal diario de sólidos transportados por el total de kilómetros de conducción.

Conducción Gravitacional de Pulpas

Corresponde al flujo de pulpas utilizando sólo la diferencia de nivel entre el punto de partida y la descarga, puede ser por canal o tubería en presión

*** Impulsión de Pulpas**

Corresponde a un flujo que requiera la instalación de bombas para conducir las pulpas a grandes distancias o puntos elevados.

1.7 ANÁLISIS DE LAS DISTINTAS SOLUCIONES PARA EL TRANSPORTE SÓLIDOS EN LA INDUSTRIA MINERA

A continuación, se hace una descripción de las soluciones tradicionales para el transporte de sólidos propios de la industria

a) Transporte Mediante Camiones

Esta solución implica la necesidad de diseñar una red vial desde la mina al concentrador o la planta de fundición, según corresponda, que pendientes, anchos y radios de curvatura que permitan un flujo continuo y eficiente de camiones. Lo anterior normalmente obliga a disponer de un chancado primario en las cercanías del yacimiento, con el consiguiente acopio y sistema de carguío de camiones. Asimismo, el sistema vial debe permitir la operación durante el invierno, dotándolo de sistema de

protección contra avalanchas y heladas, o en su defecto debe de considerar enormes acopios en las cercanías del concentrador para poder garantizar un abastecimiento razonable durante el invierno.

Esta solución es simple de definir, y aunque sus costos de inversión en camiones puede ser razonable en algunos casos, los costos de operación para una faena de alta cordillera normalmente resultan prohibitivos.

b) Transporte por Ferrocarril

Esta solución no es muy aplicable a la mayoría de los casos sudamericanos, dado que por razones obvias, se intenta el transporte a sectores de mejor acceso y más baja altura, lo que implicaría un ferrocarril de gran desarrollo por la alta pendiente disponible o el diseño de obras subterráneas de alto costo.

c) Transporte Mediante Andarivel

Esta solución , normalmente de inversiones y costos de operación atractivos, permite transportar el mineral o concentrado, en forma continua, de acuerdo a tecnologías de desarrollo Europeo. Lamentablemente en las condiciones que nos ocupa, el andarivel tiene fuertes vulnerabilidades, lo que implica un bajo porcentaje de disponibilidad durante el invierno y altos costos de manutención. Asimismo, este sistema es muy limitado para los incrementos de producción por encima de valor de diseño.

d) Transporte Mediante Cinta

Esta solución, de desarrollo tecnológico muy estandarizado, tiene el inconveniente de requerir trazados rectos, que en nuestra cordillera obligarían a construir túneles o costosos sistemas para correas de trazado curvo. Asimismo esta solución implica vulnerabilidad en relación a nevadas y acceso para mantenimiento. Los costos de inversión y operación de esta solución son relativamente altos.

e) Transporte Hidráulico

Esta alternativa requiere la instalación de la Planta de Molienda en las cercanías del yacimiento y conducir hidráulicamente el mineral molido hasta el concentrador. En forma similar, se puede proceder si se desea transportar el concentrado en forma hidráulica. El transporte de relaves, tradicionalmente se ha hecho mediante sistema de transporte hidráulico. Puede ser desarrollado en dos formas. conducción hidráulica a superficie libre (canaletas) o conducción hidráulica en presión (tuberías).

Esta solución posibilita desarrollar trazados sinuosos y manejar grandes desniveles entre el punto de partida y descarga. Asimismo, el sistema hidráulico es poco sensible a los problemas que genera el invierno. Finalmente, los costos de inversión y operación de esta solución son competitivos.

Para que un sistema de transporte hidráulico de sólidos opere es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

El sólido a transportar no debe reaccionar ni con el fluido ni con la tubería o canaleta o que en su defecto, ello no sea inconveniente para el proceso posterior.

Las partículas sólidas deben poder mezclarse y separarse fácilmente.

No debe existir riesgo de interacción química entre las partículas sólidas de modo que provoque una aglomeración de ellas y una posterior obstrucción de la tubería.

El desgaste y ruptura que podrían sufrir las partículas durante el transporte no debe tener efectos adversos para el posterior del sólido.

En general estos requerimientos son satisfechos en todos los procesos de la minería metálica, pero hay que tener ciertos cuidados en el transporte de algunos minerales no metálicos como la caliza, azufre, cal, etc

1.8 RAZONES PARA LA DIFUSION Y APLICACION DE LA TECNOLOGIA DEL TRANSPORTE HIDRAULICO DE SÓLIDOS A GRANDES DISTANCIAS EN NUESTRA INDUSTRIA MINERA

La industria minera de Chile y la nuestra tienen algunas coincidencias geográficas que hacen factible transferir a nuestro País las experiencias Chilenas de transporte de pulpas a largas distancias.

Las principales semejanzas de la industria minera de ambos países son:

Ambos países tienen gran parte de su industria minera en lugares elevados o en la misma cordillera de Los Andes, debiendo conducir sus productos a puerto o fundiciones alejadas y sus residuos (relaves) a emplazamientos habitualmente no colindantes con el yacimiento minero.

Ambos países tienen una topografía adversa, con valles encajonados que dificultan el transporte vial y ferroviario, la construcción de depósitos de almacenaje de relaves y despacho permanente de los productos.

Ambos países son fundamentalmente exportadores de productos a granel (concentrados), que salen a los centros de consumo por vía marítima.

Ambos países tienen que adaptar su industria minera para evitar contaminación de causas naturales y del mar. En caso contrario la posibilidad de sufrir restricciones de compra de parte de los países industrializados es alta.

Ambos países tienen que aumentar la productividad de su industria minera para lograr sobrevivir en épocas de bajos precios de los productos mineros

En particular, la tecnología del transporte de pulpa a largas distancias permite las siguientes ventajas potenciales para ambos países.

- * Esta tecnología permite alejar las Plantas de Beneficio (flotación, lixiviación, por agitación y concentración gravimétrica o magnética) del yacimiento Minero propiamente dicho. El antiguo esquema de Mina-

Molienda-Planta y Embalse Residuos se cambia a Mina-Molienda y Planta-Embalse. En Chile existen tres ejemplos que pueden destacarse.

Mina Los Bronces - Planta Las Tórtolas de Cía. Minera Disputada (1992). La mina está a 3500 m.s.n.m. y la Concentradora está a 56 Km. y 750 m.s.n.m. y se conduce una media de 37,000 TPD.

Mina Teniente - Concentrador Colón de División el Teniente - Codelco (1984). La mina está a 8Km de la planta y se conduce un máximo de 40,000 TPD.

Mina Pelambres - Concentrador Cachay de Anaconda Chile (1992). La mina está a 11 Km. del concentrador y se conduce del orden de 5,000 TPD.

- * Esta tecnología permite conducir productos o concentrados desde la Planta de Beneficio a lugares cómodos de embarque, fundición, etc.

En Chile existen tres ejemplos relevantes:

Transporte Concentrado Colón a Caletones de Teniente - Codelco (1968). Permite conducir 4,000 Ton/día a 8 Km. de distancia.

Transporte Concentrado Andina de Codelco (1970). Permite conducir 2,000 Ton/día a 22 Km. de distancia.

Transporte de Concentrado de Escondida (1991). Permite conducir 4,000 Ton/día a 170 Km. de distancia.

- * Esta tecnología permite mantener una operación continua, de comando remoto, con detección temprana de fugas, e insensible a las condiciones climáticas.

Por ejemplo, el mineroducto de Disputada opera 6 meses al año con un 50 % de un trazado inaccesible por problemas de nieve.

Asimismo, la canaleta de relaves de Teniente puede derivar de inmediato en embalses de emergencia mediante comando radial en caso de alguna fuga detectada por sensores de nivel a lo largo de la misma.

- * Esta tecnología permite bajar los costos de operación del transporte de material molido frente a otras alternativas de transporte minero.

En un caso particular Chileno, correspondiente a una faena de cordillera fue posible efectuar la siguiente comparación.

Transporte por andarivel	0.320 US\$/TonxKm
Transporte en camión	0.140 US\$/TonxKm
Transporte por cinta	0.020 US\$/TonxKm
Transporte hidráulico	0.003 US\$/TonxKm

- * Esta tecnología permite embalsar los residuos de los sólidos en lugares seguros y de operación barata, aunque estén alejados de la mina. Dos ejemplos en Chile indican reducciones totales de costos de 3 a 5 veces en

el embalse en el valle frente al embalse en cordillera, incluyendo el costo de transporte en la comparación.

- * La tecnología de transporte de pulpa a largas distancias, por cualquiera de las vías posibles (bombeo, tuberías, canaletas, etc.) es de un nivel de desarrollo fácil de alcanzar ya sea para diseñar, operar o innovar, a nivel de profesionales latinoamericanos. vale decir, no es una tecnología solo de países desarrollados, puede ser enseñada y adaptada en nuestras universidades.

Finalmente, quiero destacar que a mi juicio en el campo del transporte hidráulico de sólidos a largas distancias tenemos mucho que desarrollar, y sería una fuente de natural transferencia tecnológica a nivel latinoamericano.

CAPITULO II

2.0 CONCEPTOS HIDRAULICOS FUNDAMENTALES

2.1 HIDRÁULICA CLÁSICA REFERENCIAL

En este capítulo se describirán las características de los fluidos, así como aspectos fundamentales de fluido dinámica y la hidráulica clásica, que forma parte del marco teórico indispensable para abordar el tema de transporte hidráulico de sólidos a grandes distancias.

21.1 Fases de un Fluido de varios Componentes

Los elementos y compuestos de la naturaleza, se presentan en 3 posibles fases: fase sólida, fase líquida y fase gaseosa. Un fluido puede contener más de una fase y seguir comportándose como tal.

Los fluidos pueden ser catalogados como.

Unifásicos	Líquido o gas como el agua o el aire.
Bifásicos	Líquido-gas, líquido-sólido o gas-líquido. Ejemplos de fluidos bifásicos son: líquidos espumosos, pulpas mineras (relaves, concentrados, y minerales) y aire con partículas, respectivamente.
Multifásicos	Fluidos que contienen los tres estados como pulpas espumosas (agua, aire y sólidos).

En este capítulo y para fines de comprensión de la hidráulica clásica, se asume que el fluido tiene el comportamiento propio de éste, sin importar la cantidad de fases que pudiese tener.

21.2 Propiedades de un Fluido

a) viscosidad

La viscosidad, es la propiedad que requiere mayor consideración en el estudio del escurrimiento de los fluidos. Es la propiedad de un fluido mediante la cual éste ofrece resistencia al esfuerzo tangencial. También se puede decir que es la resistencia al desplazamiento relativo entre dos moléculas adyacentes en un fluido y traduce en una mayor o menor deformación según el tiempo en que se adquiere esa deformidad.

normalmente, al aumentar la temperatura la viscosidad de un líquido disminuye exponencialmente. Asimismo para presiones normales, la viscosidad es siempre independiente de la presión y depende solo de la temperatura.

La viscosidad de los gases es muy pequeña; en los líquidos es mayor y en los sólidos es muy grande, así para el agua: Si la viscosidad del vapor es 1 la del líquido es 200 y del sólido es 10^{17} . Por eso la viscosidad tiene más importancia en el estudio de los líquidos.

Esfuerzo al corte (τ). "El esfuerzo al corte es proporcional a la velocidad relativa de una molécula con respecto a otra e inversamente proporcional a la distancia que los separa".

$$T = \mu \frac{dv}{dx}, \quad \text{donde} \quad T = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}}$$

dv = Velocidad relativa

dx = Espacio que las separa

μ = Coeficiente de viscosidad, viscosidad absoluta o viscosidad dinámica.

Sus unidades en el sistema CGS es el Poise donde

$$\text{Poise} = \frac{\text{dina} \times \text{seg.}}{\text{cm}^2}$$

b) **viscosidad cinemática.**

Es de uso frecuente, es el cociente entre la viscosidad y la densidad del fluido.

Este valor se define como viscosidad cinemática.

$$v = \frac{\mu}{\delta}, \quad \text{donde.}$$

v = Viscosidad cinemática ($\text{m}^2/\text{seg.}$)

μ = Viscosidad dinámica ($\text{kg.}/(\text{m} \times \text{seg})$)

δ = densidad ($\text{kg.}/\text{m}^3$)

c) **Densidad**

La densidad de un fluido como la razón de su masa por unidad de volumen.

$$\delta = M/V$$

Donde:

M: Masa [kg.]

V: Volumen [m³]

δ : Densidad [kg./m³]

d) **Peso Específico**

El peso específico de una sustancia es el peso por unidad de volumen.

$$\rho = \delta g$$

donde:

δ : densidad [kg./m³]

g : Aceleración de la gravedad [9 81 m/seg.²]

21.3 **Movimiento de los Fluidos.**

El movimiento de los fluidos se puede clasificar de muchas formas, atendiendo a algunas de sus diversas características. Por ejemplo: Se puede tener fluidos Turbulentos o Laminares, Permanentes o Impermanentes, Uniformes o no Uniformes, Etc.

a) **Flujos Laminares o Turbulentos**

El flujo laminar se caracteriza por tener las líneas de escurrimiento paralelas, es decir las partículas del fluido se mueven a lo largo de trayectorias bastante regulares, dando la impresión que se trata de láminas o capas deslizándose suavemente unas sobre las otras. En un flujo

laminar la acción de la viscosidad puede amortiguar cualquier tendencia turbulenta. En el caso de flujos en ductos circulares el perfil de velocidades es del tipo parabólico (Figura N° 2.1).

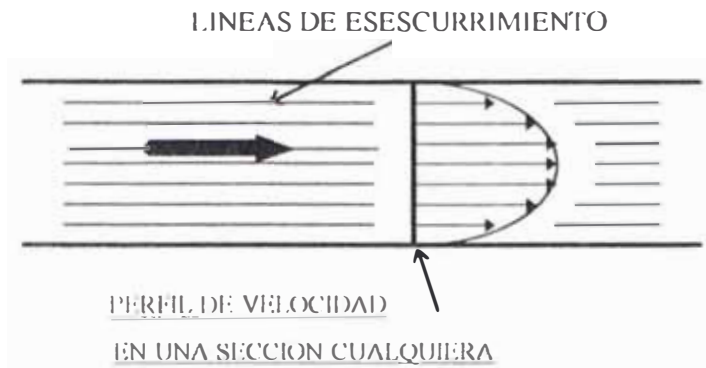


FIGURA N° 2.1

Por otra parte, el **flujo turbulento** no presenta líneas de escurrimiento paralelas y se caracteriza por la formación de torbellinos y por la alta inestabilidad puntual del flujo. Si se compara un flujo turbulento con un flujo laminar en igualdad de condiciones, se encontrará que la turbulencia desarrolla esfuerzos constantes mucho mayores en el fluido y ocasiona más pérdidas de energía. En este tipo de flujos el perfil de velocidades es bastante plano (Figura 2.2).

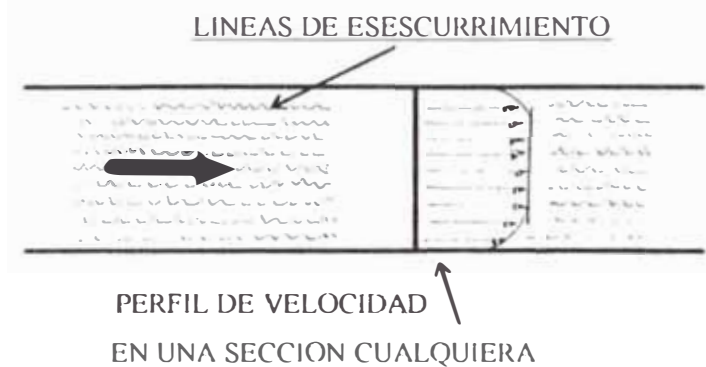


FIGURA N° 2.2

En el caso de flujo industrial de agua o pulpas en el interior de una tubería o en un canal, el flujo es generalmente de carácter turbulento, sin embargo, es posible detectar la existencia de flujos laminares en ductos de reactivos de flotación o floculantes.

En general, en el flujo laminar el movimiento de las partículas es regido por los esfuerzos viscosos mientras en el turbulento estos esfuerzos no tienen importancia mayor.

En escurrimiento en tuberías en presión, se puede determinar el tipo de régimen, mediante el cálculo del parámetro adimensional conocido como número de Reynolds.

$$Re = \frac{V \times Di}{\nu}$$

Donde:

V = velocidad media de la tubería (m/s)

Di = diámetro interno de la tubería (m)

ν = viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

Se cumple:

$Re < 2000$: flujo laminar

$Re > 4000$: flujo turbulento

Para valores de Re mayores a 2,000 y menores 4,000, se tiene un flujo intermedio entre laminar y turbulento.

El número de Reynolds, relaciona la inercia con la viscosidad cinemática.

b) Flujos Permanentes o Impermanentes

Un **flujo permanente** es aquel en que las condiciones de flujo en cualquier punto del escurrimiento no cambian con el tiempo. Estas condiciones son la velocidad, densidad, presión y temperatura.

En un flujo turbulento siempre existen fluctuaciones de estas variables, sin embargo si estas fluctuaciones oscilan en torno a algún valor medio determinado y constante, igualmente se considera a este flujo como permanente.

Un flujo es **impermanente** cuando las condiciones en cualquier punto cambian con el tiempo.

Como ejemplo de flujo permanente, se tiene la operación de una línea de pulpa cuyo estanque de cabeza tiene un nivel constante (es decir existe reposición de fluido) y el flujo impermanente, se puede asumir como ejemplo la misma línea pero considerando el nivel del estanque en descenso (es decir no hay reposición de fluido).

c) Flujos Uniformes o no Uniformes

Un **flujo uniforme** ocurre cuando, para un instante dado la velocidad en su magnitud y dirección es idéntica para los puntos de escurrimiento

En un ducto, esto ocurre cuando todas las secciones transversales paralelas entre sí son idénticas (conducto prismático) y la velocidad media en cada sección es la misma para un instante dado.

Debido a las curvas y accidentes propios de la topografía, normalmente se tiene escurrimiento uniforme por tramos. En un canal un flujo uniforme implica igual altura de escurrimiento a lo largo del canal para un cierto instante

Contrariamente a un flujo uniforme, un flujo no uniforme o variado, la velocidad varía de un lugar a otro para un instante dado.

21.4 Elementos de Análisis Hidráulico

Para el estudio de la fluidodinámica hay dos leyes básicas cuya comprensión es necesaria y que se revisarán a continuación.

Conservación de la masa o ecuación de continuidad

Conservación de cantidad de movimiento segunda ley de Newton.

A partir de los principios de estas leyes se desarrollarán las fórmulas de aplicación práctica para hidráulica de tuberías y canales, así como la aplicación a problemas tecnológicos de agua pura como el diseño de instalaciones industriales de distribución de agua, sistemas de bombeo, canales de aducción, etc.

i) Continuidad de flujos

La continuidad es consecuencia del "principio de conservación de la masa", el cual establece que la masa dentro de un sistema permanece constante con el tiempo.

En la práctica esto significa que la cantidad de masa del fluido que entra en un volumen de control en un determinado intervalo de tiempo, debe

ser equivalente a la suma de la masa de fluido que sale de este volumen de control más la masa de fluido que se almacena en este volumen en el mismo intervalo de tiempo.

Masa que Entra = Masa que Sale + Masa que Acumula

En régimen permanente, no existe acumulación de masa, por esto se cumple:

Masa que Entra = Masa que Sale

En el caso de fluidos como el agua pura, cuya densidad se puede considerar invariable, o sea, el fluido es incompresible, y considerando régimen permanente, se llega, para el caso de un tubo de flujo a:

$$Q = V_i \times S_i$$

Donde:

V_i = Velocidad media en la sección i (m/s)

S_i - Sección i del tubo (m^2)

Q = caudal (m^3/s)

Este valor de Q debe ser constante, por lo cual si se disminuye la sección de flujo, su velocidad debe de aumentar, para así obtener el mismo caudal.

normalmente, la expresión para el caudal se escribe sin hacer referencia a la sección, pero se debe tener en cuenta que tanto la velocidad como la superficie deben ser medidos en la misma sección:

$$Q = V \times S$$

Donde:

V = Velocidad media (m/s)

S = Superficie de flujo (m²)

Q = Caudal total (cte.) (m³/s)

La expresión anterior es de uso práctico como ecuación de continuidad. Es frecuente el uso de esta ecuación para el cálculo de la velocidad media, conocidos Q y S ($V=Q/S$).

Aplicando este concepto a un tubo de flujo (Figura N° 2.3), se obtiene un caudal constante.

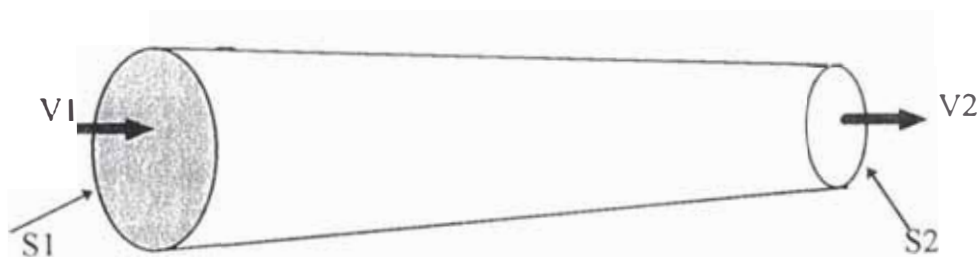


FIGURA N° 2.3

$$Q_1 = Q_2$$

$$V_1 S_1 = V_2 S_2$$

Calculo de Superficies de Flujo

En la aplicación práctica de la hidráulica, es recomendable, efectuar los cálculos de las superficies de flujo con mucha precisión. Se analizarán por separado, las superficies de flujo en tuberías y en canales.

a) Tuberías en Presión

Para el caso del fluido en presión en tuberías circulares el cálculo es bastante simple.

$$S = \frac{\pi}{4} D_i^2$$

Donde

D_i = Diámetro interno de la tubería

La determinación del diámetro interno de una tubería depende del diámetro nominal de la tubería, la norma de fabricación, el tipo de tubería y su espesor.

Cabe hacer notar que las tuberías de acero pueden presentar revestimientos interiores como ser bitumen anticorrosivo (2 a 3 mm), goma antiabrasiva (¼" a ½"), revestimiento de poliuretano (2 a 6 mm), o incrustaciones calcáreas en aguas de pH alto (1 a 2 mm por año en condiciones extremas).

En este caso, el cálculo del diámetro interno, debe de considerar la reducción por efecto del revestimiento:

$$D_i = D_{it} - 2e$$

Donde:

D_{it} = Diámetro interno sin revestimiento (mm)

e = Espesor del revestimiento (mm)

Por otra parte la abrasión propia del escurrimiento provoca un aumento continuo de la sección que puede ser estimado mediante las tasas de abrasión propias de cada material y su envejecimiento.

En este caso el diámetro interno aumenta en función de la tasa de desgaste de la tubería

$$D_i = D_{it} + 2 \times TD \times A$$

Donde:

TD = Tasa de desgaste (mm/año)

A = Vida efectiva (años)

Finalmente en los flujos bifásicos o trifásicos puede ocurrir que la parte sólida del fluido provoque una sedimentación parcial que entorpezca en forma importante la sección de escurrimiento disminuyéndola substancialmente (Figura N° 2.4)



FIGURA N° 2.4

b) Tuberías con Flujo en Superficie Libre

Para el caso del flujo a superficie libre o flujo en acueducto la integración de superficie de flujo puede no ser simple de resolver.

Supongamos un flujo en un tubo circular, donde se puede definir:

D_i : Diámetro interno (m)

Y : Altura de escurrimiento (m)

θ : ángulo inscrito (radianes)

Geoméricamente se puede calcular el área de flujo en una sección como la indicada (Figura N° 2.5), de la siguiente forma:

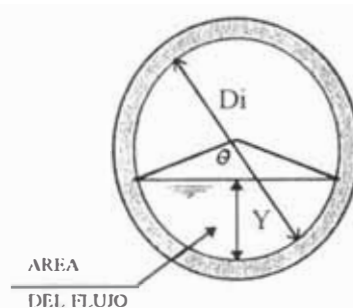


FIGURA N° 2.5

$$A = \frac{D_i^2}{8} (\theta - \text{sen}\theta) \quad (\text{m}^2)$$

Donde:

$$\theta = 2 \text{ arc cos } (1 - 2y/D_i)$$

La integración del área en función de la altura es engorrosa y resulta más cómodo usar tablas

c) Canales

En el caso de un canal rectangular, el área es fácil de calcular, como el área de un rectángulo (Figura N° 2.6).

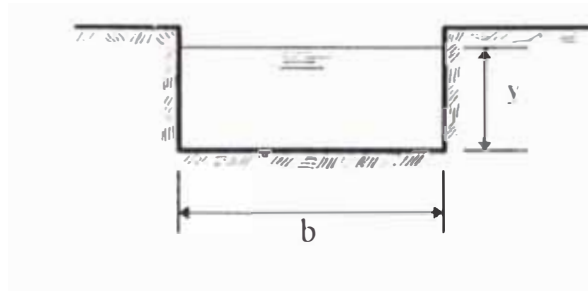


FIGURA N° 2.6

$$A = b \times y = \text{área de flujo (m}^2\text{)}$$

$$b = \text{ancho interno del canal (m)}$$

$$y = \text{altura de escurrimiento del flujo (m)}$$

En escurrimiento libre normalmente las velocidades son bastante más bajas que en flujo en presión, por esta razón el riesgo de embanque es mayor y así también la ocurrencia de un cambio de presión.

ii) Conservación de la Cantidad de Movimiento

Esta ecuación corresponde al principio físico de la segunda ley de Newton de la Dinámica: fuerza igual a masa por aceleración.

La ecuación de Conservación de Cantidad de Movimiento aplicada a un fluido tiene relación con la fuerza que se le debe aplicar a un flujo para

modificar su velocidad, fuerza que además es afectada por el caudal y la densidad del flujo señalado.

Esta ecuación tiene una expresión de tipo integral que puede simplificarse mediante las siguientes suposiciones:

Flujo incompresible y homogéneo ($\delta = \text{cte}$)

Flujo permanente

Flujo unidimensional

Así se llega a la ecuación:

$$\sum F_e = \delta Q (V_{\text{salida}} - V_{\text{entrada}})$$

Como fuerzas externas se consideran las fuerzas que ejercen las paredes del conducto sobre el flujo, las fuerzas sobre la superficie de control del fluido y la fuerza de gravedad. Algunas aplicaciones de esta ecuación son:

Cálculo de las fuerzas que ejerce un flujo en los cambios de sección de una tubería o un canal sobre las paredes de este conducto.

Cálculo de la fuerza ejercida por un chorro de agua sobre los alabes de una turbina.

Cálculo de la fuerza ejercida por el fluido sobre un anillo de disipación de energía.

iii) Conservación de la energía

A partir del mismo principio de Conservación de la Cantidad de Movimiento, pero con un enfoque energético, es posible formular expresiones tendientes a cuantificar la energía total disponible del sistema.

Dichas expresiones requieren de ciertas simplificaciones para cobrar aplicabilidad práctica.

Para aplicaciones clásicas de movimiento de fluidos estas consideraciones son:

Fluido incompresible ($\delta = \text{cte}$)

Flujo permanente

Sólo existen fuerzas gravitacionales

El roce con las paredes del conducto se considera nulo (fluido ideal)

Viscosidad nula ($\mu = 0$). Es decir un fluido sin fricción interna (situación cercana para flujos turbulentos).

El desarrollo matemático en concordancia con lo anterior permite encontrar la ecuación de la energía, definida como:

Ecuación de Bernoulli o energía total

$$B - z + p/\delta + V^2/2g$$

Donde:

B = Bernoulli o energía total (medida en mca)

z = Cota del fluido (m)

δ = Peso específico del fluido

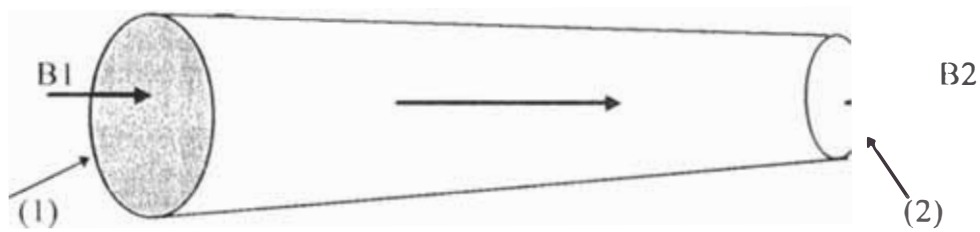
p = Presión interna (kgf/m^2)

g = Aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2)

V = Velocidad del flujo (m/s)

Esta ecuación, establece que bajo las consideraciones indicadas, la energía de cualquier punto de un flujo es la misma y se puede medir en m.c a

Para un tubo de flujo cualquiera (Figura N° 2.7) y bajo las consideraciones anteriores, se cumple



FUGURA N° 2.7

Y bajo las consideraciones anteriores, se cumple:

$$B_1 = B_2$$

$$\dots\dots> z_1 + p_1/\delta + V_1^2/2g = z_2 + p_2/\delta + V_2^2/2g$$

Lo que se conoce como "Conservación de la energía o Bernoulli".

Bernoulli en Escurrimientos en Presión.

En una tubería en presión, el Bernoulli de una sección, se calcula aplicando directamente su definición

El valor de z , está referido a un cierto plano horizontal referencial, por lo que el valor de B , siempre es relativo a un plano.

Un ejemplo de Conservación de Bernoulli, es el cálculo de la velocidad de un chorro de líquido, que sale por el orificio de un estanque con una altura de agua constante (Figura N° 2.8).

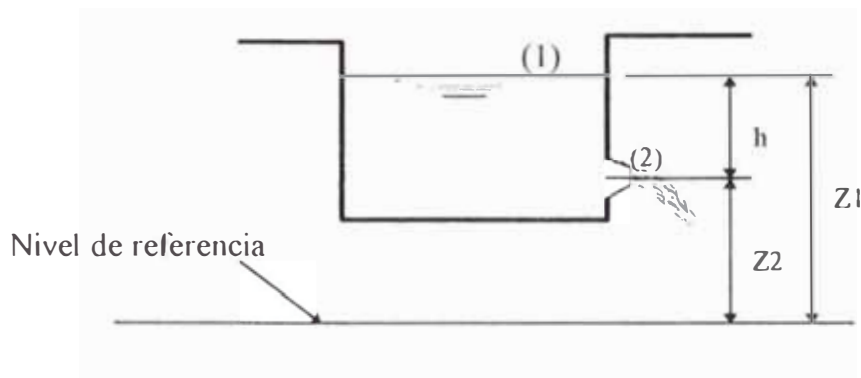


FIGURA N° 2.8

$$B_1 = Z_1 + p_1/\delta + V_1^2/2g$$

pero:

$$p_1 = 0 \text{ (atmosférica)}$$

$$V_1 = 0 \text{ (estanque en reposo)}$$

entonces:

$$B_{(1)} = z_1$$

$$B_{(2)} = Z_2 + p_2/\delta + V_2^2/2g$$

pero:

$$p_2 = 0 \text{ (atmosférica)}$$

entonces:

$$B_{(2)} = Z_2 + V_2^2/2g$$

Por conservación del Bernoulli: $B_{(1)} = B_{(2)}$

entonces

$$z_1 = z_2 + V_2^2/2g \quad \therefore V_2 = \sqrt{2g(z_1 - z_2)}$$

pero:

$$z_1 - z_2 = h$$

finalmente : $V_2 = \sqrt{2gh}$ velocidad de salida del chorro. Se recuerda que en este ejemplo, el fluido es ideal (sin viscosidad).

Bernoulli en escurrimiento libre

Si en un canal, se usa como plano de referencia, el fondo de este, se cumple:

$$B = z + p/\delta + V^2/2g = h + V^2/2g$$

en que h , es la altura de escurrimiento (Figura N° 2.9).

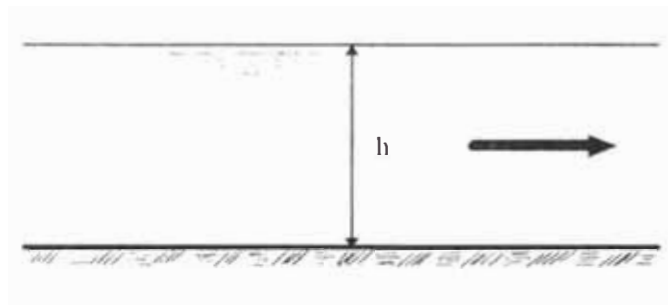


FIGURA N° 2.9

Por esta razón, la expresión anterior se refiere exclusivamente al Bernoulli en un canal, medido a partir de su fondo.

2.2 TRANSPORTE DE SÓLIDOS POR TUBERIAS

Transportar hidráulicamente partículas sólidas por tuberías, consiste en movilizar por el interior y a lo largo de ellas materiales sólidos, haciendo uso de un fluido energizado (agua) que servirá de vehículo de transporte. Es a esta mezcla a la que en adelante denominaremos "pulpa".

Este tipo de transporte permite la manipulación de una gran variedad de materiales que van desde polvos hasta sólidos de varios centímetros de diámetro.

Por lo tanto, en este capítulo trataremos de explicar los diferentes tipos de pulpas y sus características, así como los principales parámetros empleados; velocidad límite, número de Reynolds, etc. Finalizando con una exposición de los métodos de cálculo del coeficiente de fricción en tuberías, detallando las particularidades para cada tipo de pulpa.

22.1 Definición de una Pulpa

Una pulpa es una mezcla de cualquier líquido con partículas sólidas en suspensión, la naturaleza, tamaño, forma, y cantidad de las partículas sólidas junto con la naturaleza, densidad y viscosidad del líquido de transporte, determinan las características y propiedades de la pulpa.

El flujo de las pulpas difiere del flujo de los líquidos homogéneos. Con estos es posible un abanico completo de velocidades, y la naturaleza del flujo (laminar, transitorio o turbulento) puede determinarse del conocimiento de las propiedades físicas del líquido y la conducción.

22.2 Tipos de pulpas y sus características

La caracterización de una pulpa no es tan simple como la de un líquido, por que superpuestas sobre las propiedades del líquido están las de las partículas sólidas y su efecto sobre la mezcla.

De un modo muy general las pulpas podrían dividirse de acuerdo a su comportamiento, en dos grupos: sin sedimentación y con sedimentación.

- * Las pulpas **sin sedimentación** están formadas por partículas finas (menores de 50 micras) las cuales forman una mezcla homogénea y estable, por lo que en adelante nos referiremos a ellas como **pulpas homogéneas**. Provocan, generalmente, bajos desgastes pero requieren un tratamiento muy cuidadoso cuando se seleccionan las bombas y su accionamiento, ya que debido al aumento de su viscosidad a menudo no se comportan como un líquido normal. Cuando el contenido de partículas es relativamente elevado, se comportan en cuanto a su reología como líquidos no-Newtonianos. Ejemplos típicos de este tipo de pulpas son las lechadas de cemento, pulpas de caolín y lodos de perforación.

- * Las pulpas **con sedimentación** son formadas por partículas gruesas que tienden a formar una mezcla inestable, y se comportan como líquidos Newtonianos causan generalmente elevados desgastes y precisan de una selección cuidadosa de las conducciones, debido a su tendencia a sedimentar produciendo bloqueos. Constituye la mayoría de las aplicaciones de transporte de pulpas, refiriéndonos en adelante a ellas como **pulpas heterogéneas**, ya que los sólidos no se distribuyen regularmente, las fases sólida y líquida mantienen su propia identidad y el incremento de la viscosidad es usualmente de escasa importancia.

Las pulpas heterogéneas tienden a ser de menor concentración de sólidos y con partículas de mayor diámetro que las pulpas homogéneas. Ejemplos típicos son las pulpas en plantas de tratamiento de minerales, equipos de dragado, etc

22.3 Propiedades físicas

Densidad.- Existen tres densidades en la especificación de cualquier suspensión:

δ_s = La densidad de las partículas sólidas

δ_l = La densidad del líquido portante

δ_p = La densidad de la propia pulpa

La densidad del sólido y líquido pueden ser fácilmente evaluadas por métodos convencionales, si bien son generalmente muy conocidas.

La densidad de la suspensión puede también ser medida; sin embargo requiere de un cierto cuidado, especialmente en pulpas con sólidos de tendencia a sedimentar rápidamente.

En la práctica es mejor, conociendo las densidades del sólido y líquido, emplear las ecuaciones existentes en función de la concentración de los sólidos:

$$\delta_p = \delta_l + C_v \times (\delta_s - \delta_l)$$

$$\delta = \frac{\delta_l}{1 - C_w \cdot (\delta_s - \delta_l) / \delta_s}$$

Usualmente la concentración de sólidos se expresa como porcentaje en peso C_w , si bien la mecánica de fluidos está más directamente relacionada a la concentración en volumen C_v . La relación entre ésta y las densidades de sólido y líquido se refleja en la ecuación siguiente:

$$C_v = \frac{\delta_s}{\delta_s / C_w \times (\delta_s - \delta_l)}$$

C_v y C_w expresados en fracción

Viscosidad.- Antes de comenzar al estudio de cualquier pulpa es imprescindible establecer claramente su comportamiento como fluido y su régimen. El comportamiento de un líquido está ligado al comportamiento de su viscosidad.

Como ya mencionáramos en el Capítulo N° 2, llamamos viscosidad a la resistencia de un fluido a su deformación o movimiento, cuando es sometido a una fuerza externa. Un líquido perfecto es aquel que no ofrece ninguna resistencia, es decir que tiene viscosidad "cero".

Al coeficiente de proporcionalidad entre la acción externa, tensión de cortadura, y la relación de deformación d_v/d_y se le llama coeficiente de viscosidad μ .

La viscosidad en la mayoría de los líquidos varía con la temperatura, mientras que, prácticamente se mantiene invariable con los cambios de presión. A estos líquidos se les conoce como **líquidos reales o Newtonianos**

Cuando la viscosidad de un fluido varía con la presión, se le conoce como no-Newtoniano. A diferencia de los Newtonianos requieren para su caracterización más de un parámetro (viscosidad), y al estudio de estos se le llama Reología.

La viscosidad en suspensiones diluidas de sólidos fue objeto de un análisis teórico por Einstein en 1905 quien concluyó que la viscosidad podía representarse como sigue:

$$\mu_p = \mu_l (1 + 2.5 C_v)$$

donde:

μ_p : Viscosidad absoluta de la pulpa

μ_l : Viscosidad absoluta del líquido

Esta ecuación es aplicable a pulpas muy diluidas (hasta 1% en volumen), en régimen laminar y con partículas esféricas en suspensión.

Un trabajo posterior de VAND, para suspensiones más concentradas (hasta 10% en volumen), concluyó con la ecuación siguiente:

$$\eta_p = \eta_l (1 + 2.5 C_v + 7.35 C_v^2)$$

ELRICH añadió un tercer término:

$$\eta_p = \eta_l (1 + 2.5 C_v + 8 C_v^2 + 40 C_v^3)$$

y TRAWINSKI en experiencias con esferas de vidrio de 1mm. suspendidas en agua llegó a la ecuación:

$$\eta_p = \eta_l (2/3 + 5/2 C_v + 1/3 e^{20C_v/3})$$

Analizando la gran cantidad de información publicada, THOMAS sugirió una ecuación que extiende la validez de aplicación, para pulpas con concentraciones de hasta 40% en volumen:

$$\eta_p = \eta_l (1 + 2.5 C_v + 10.05 C_v^2 + 0.00273 e^{16.6 C_v})$$

Existe otra serie de ecuaciones desarrolladas por EILERS, GAY-NELSON y AMSTRONG, que introducen un nuevo parámetro C_m , que es la máxima concentración en volumen posible considerando el empaquetado de partículas

$$\eta_p = \eta_l \left(1 + k_1 \left(\frac{C_v}{C_m - C_v} \right) + k_2 \left(\frac{C_v}{C_m - C_v} \right)^2 \right)$$

iendo k_1 y k_2 constantes con valores de 1.5 y 2.5 respectivamente.

La concentración máxima C_m oscila entre 72.5% para partículas de forma hexagonal y 52 % para partículas cúbicas, pudiendo adoptarse un valor medio de 62% para las partículas minerales más usuales.

η_p = Viscosidad aparente de la pulpa

η_l = Viscosidad aparente del líquido

Número de Reynolds .- En 1883 OSBORNE REYNOLDS, como resultado de sus trabajos observando el movimiento de los fluidos en tuberías, concluyó que la naturaleza del movimiento en una tubería dependía del diámetro interior de ésta y de la densidad y viscosidad del fluido, así como de la velocidad media del movimiento, y que todas estas variables podrían ser combinadas en un número, sin dimensiones, al que se le llamó, en su honor, Número de Reynolds Re , que puede definirse como:

$$Re = \frac{D \times V}{\nu}$$

Siendo D el diámetro, V la velocidad, y ν la viscosidad cinemática ($\nu = \mu/\rho$).

El trabajo de Reynolds mostró que la transición del flujo laminar al flujo turbulento ocurría, generalmente, a números de Reynolds cercanos a 2000, y a este valor se le llamó el Número Crítico, de extrema importancia en el cálculo de las pérdidas de carga en conducciones

Posteriormente, trabajos experimentales de REYNOLDS y otros investigadores mostraron que el número crítico puede variar substancialmente, y en la práctica se establece que el flujo laminar ocurre por debajo de un valor de 2300, mientras que el flujo turbulento ocurre por encima de 4000, existiendo una zona de transición entre estos valores.

Frecuentemente en el transporte de pulpas nos encontramos con conducciones no circulares, y en estos casos, en el cálculo de Número de Reynolds, debe cambiarse el diámetro D por un diámetro equivalente. Se denomina radio Hidráulico a la relación entre la sección del conducto transversal al movimiento A , y el perímetro mojado P ($R = A/P$) el diámetro equivalente a considerar para el cálculo del Número de Reynolds queda determinado por $D_e = 4 R$.

2.3 SIDEMENTOLOGIA DEL SÓLIDO A TRANSPORTAR

Una partícula sólida, aislada, en un fluido de menor densidad, tiende a caer aumentando su velocidad hasta llegar a una velocidad de equilibrio entre las fuerzas de gravedad y las fuerzas de resistencia del fluido, como se indica en la (Figura N° 2.10) Esta velocidad de equilibrio se denomina **velocidad de sedimentación**.

**FIGURA N° 10**

La velocidad de sedimentación (W) es función del tamaño y diámetro de la partícula que sedimenta (d), del peso específico relativo entre el sólido y el fluido (S) y de la viscosidad del fluido (μ).

$$W = W(d, S, \mu)$$

Por otra parte, dependiendo de las características del fluido y de la velocidad de sedimentación, es posible que las partículas sólidas decanten en régimen laminar o estratificado o en régimen turbulento o con formación de remolinos.

23.1 Sedimentación de Esferas

En una esfera de densidad δ_s , la fórmula general de la velocidad de sedimentación es:

$$W = \frac{1}{\sqrt{C_d}} \times \sqrt{\frac{4}{3} g d (S-1)}$$

donde.

C_d : coeficiente de arrastre

g : aceleración de la gravedad

En el caso de un flujo de sedimentación muy lenta, partículas muy pequeñas y/o livianas, existe una solución analítica denominada ecuación de Stokes:

$$W = \frac{1}{18} \times \frac{gd^2(S-1)}{\nu} \quad \text{con } C_d = \frac{24}{Re}$$

Experimentalmente, se comprueba que la solución de Stokes, es válida sólo para $Re < 0.1$ ($Re = Wd/\nu$). El error sin embargo, todavía es pequeño para $Re < 2$. Para valores mayores de Re estas ecuaciones son enteramente inaplicables. Dado que no existen soluciones analíticas para $Re > 2$, debe de recurrirse a observaciones empíricas. Correlacione aproximadas que pueden usarse son las siguientes.

Régimen de transición:

$$C_d = 18.5 Re^{-0.6} \quad \text{válida para } 2 < Re < 5 \times 10^2$$

Régimen turbulento:

$$C_d = 0.44 \quad \text{válida para } 5 \times 10^2 < Re < 2 \times 10^5$$

La ecuación del régimen de transición requiere de cálculo iterativo. Esto puede evitarse, transformando la función.

$f(C_d, Re) = 0$, a las nuevas variables $(C_d Re^2)$ y (Re/C_d)

$$(C_d Re^2)^{1/3} = \left[\frac{(\delta_s - \delta)}{3\mu^2} \right]^{1/3} \quad d = \alpha d$$

$$(Re/C_d)^{1/3} = \left[\frac{3\delta^2}{4g(\delta_s - \delta)\mu} \right]^{1/3} \quad W = \beta W$$

Los factores α y β correspondientes a los corchetes en estas ecuaciones son funciones solo de las propiedades físicas del sistema sólido-fluido, de modo que las nuevas variables equivalen a correlación directa de d & W .

23.2 Partículas naturales

Las partículas naturales que se encuentran en los procesos industriales tienen habitualmente formas irregulares, cuya caracterización es difícil, incluso en términos estadísticos. En los términos más simples, la especificación de una partícula requiere por lo menos una medida de su tamaño y una medida de su forma.

La forma más usual de medir el tamaño es hacer pasar una muestra del material granulado a través de una serie de tamices o mallas, cuya abertura es decreciente. De ese modo, se separa el material en fracciones de tamaños comprendidos entre cada dos mallas sucesivas y, por pesada, se puede obtener un tamaño promedio.

Habitualmente se supone de que el tamaño representativo de cada fracción es el promedio geométrico de las aberturas de mallas extremas. Llamaremos al tamaño así determinado el diámetro nominal de la partícula.

Respecto al coeficiente de forma, hay una variedad de métodos propuestos, todos los cuales son de difícil aplicación práctica. Se presentará a continuación el método de Heywood, basado en sus propias mediciones de la velocidad de sedimentación de partículas de forma variada. Heywood estableció curvas corregidas para la función Ad & βW , escogiendo como parámetro un factor de forma k definido por: $k = \text{volumen de la partícula}/d^3$.

En esta relación d está definido como el diámetro de un círculo de igual área que la mayor sección de la partícula.

Factor de forma $K = K_e \sqrt{ab}$, en que:

$a > b > c$	=	son las dimensiones triaxiales de la partícula.
k_e	=	0.38 para partículas angulosas de forma piramidal
	=	0.47 para partículas angulosas de forma prismoidal
	=	0.51 para partículas sub angulosas
	=	0.54 para partículas redondeadas

23.3 Influencia del conjunto de partículas

Anteriormente se ha considerado el caso de partículas aisladas. Para altas concentraciones de sólidos, es necesario además la interacción entre partículas.

Si las partículas están muy cerca unas de otras, la estela de una partícula tiende a arrastrar a las vecinas, las partículas más rápidas chocan con otras más lentas. Por otra parte, el fluido debe desplazarse por entre las partículas en movimiento para dejarles lugar. Todos los factores configuran la llamada sedimentación obstruida o sedimentación de pulpas, cuyo efecto global es el de reducir la velocidad de sedimentación. Es como si cada partícula estuviera sedimentando en un pseudofluido (la mezcla sólido-fluido) de mayor densidad y viscosidad que el fluido puro. De las diversas correlaciones empíricas propuestas para el cálculo de la sedimentación obstruida, una de las más utilizadas es la fórmula de Richardson y Zaki

$$w_i/w_0 = (1 - C_v)^n$$

En que w_0 es la velocidad de sedimentación de una partícula aislada y w_i es la velocidad de sedimentación obstruida cuando la concentración en volumen del sólido es: C_v .

El exponente n es una función empírica del número de Reynolds de la partícula, dada por.

$$n = 4.65 \text{ para } Re < 0.2$$

$$n = 4.35 Re^{-0.03} \text{ para } 0.2 < Re < 1$$

$$n = 4.45 Re^{-0.1} \text{ para } 1 < Re < 500$$

$$n = 2.39 \text{ para } 500 < Re$$

Las dos expresiones intermedias representan una transición gradual de n entre los valores extremos 4.65 y 2.39

23.4 Sedimentación Forzada

En ciertos casos, en un conjunto de partículas, se produce el fenómeno llamado floculación de origen electroquímico, consiste en que las partículas individuales se agrupan para formar una de mayor tamaño. Esto hace aumentar la velocidad de sedimentación

Es así, como la sedimentación se puede "forzar" artificialmente mediante la adición de sustancias que al reaccionar con la pulpa, dan origen al **fenómeno de floculación**. Estas sustancias reciben el nombre de "floculantes"

En la práctica, el aumento de la velocidad de sedimentación, mejora notablemente el rendimiento de espesadores o decantadores.

2.4 VELOCIDAD MÍNIMA O LIMITE DE FLUJO

La velocidad límite (V_L) es el parámetro que determina la mínima velocidad de flujo para que no exista riesgo de deposición y obstrucción en la tubería.

Anotamos, que el concepto de velocidad límite ha sido definido de diversas formas, como por ejemplo:

Velocidad de transición entre el régimen de suspensión heterogénea y el arrastre de fondo

Velocidad a la cual la pérdida de carga en un flujo por tubería presenta un mínimo.

Velocidad a la cual los sólidos gruesos permanecen detenidos por periodos importantes en el fondo de la tubería (formación de dunas móviles y/o lecho de fondo).

De estas definiciones nos parece que la tercera sería la definición más correcta dada su fácil determinación experimental y práctica.

24.1 Tuberías en Presión

i) Parámetros que influyen en la Velocidad Límite

La velocidad límite en el flujo de pulpas depende fundamentalmente de las siguientes variables.

granulometría de las partículas sólidas

densidad relativa de las partículas sólidas
 diámetro de la tubería
 concentración de los sólidos en la mezcla
 inclinación de la tubería
 pH de la pulpa

En menor grado, también depende de:

factor de forma de las partículas sólidas
 temperatura de la mezcla

Analizaremos como varía la velocidad límite con respecto a cada uno de los parámetros principales, suponiendo las demás constantes.

a) **Influencia de la Granulometría**

La velocidad de sedimentación (W) depende del tamaño de las partículas de la forma siguiente:

$$W = 1/18 \, g d^2 (S-1) / \nu \quad \text{para esferas en régimen laminar} \quad \text{o sea, } W \propto d^2.$$

en cambio, en régimen turbulento,

$$C_d = 0.44 ; \quad W = 1/\sqrt{C_d} \sqrt{4/3 \, g d (S-1)}$$

lo que implica que : $W \propto d^{1/2}$

Luego, un aumento parejo del tamaño de los sólidos provoca un aumento de la velocidad de sedimentación y en la velocidad límite este aumento es menor que lineal

Los resultados experimentales indican, para el caso de partículas sedimentadas en régimen de transición o turbulento, que:

$$V_L \propto d_{50}^{0.4 \text{ a } 0.8} \text{ o también } V_L \propto (\%+65\#)^{0.2 \text{ a } 0.4}$$

d_{50} = tamaño de abertura de malla que deja pasar el 50% en peso de la muestra granulométrica.

$$\%+65\# = \text{porcentaje en peso retenido sobre malla 65}$$

Por otro lado, un espectro granulométrico demasiado ancho presenta una velocidad límite superior que una curva granulométrica normal. Se tiene así que

$$V_L \propto (d_{80}/d_{50})^{0.05 \text{ a } 0.25}$$

d_{80} = tamaño de abertura de malla que deja pasar el 80% en peso de la muestra o que requiere el 20% de ella

b) Influencia de densidad relativa de los sólidos

Obviamente, la velocidad límite es nula para partículas boyantes y ella crecerá con el aumento de la densidad relativa entre el sólido y el fluido portante. Este comportamiento lo observamos en la (Figura N° 2.11).

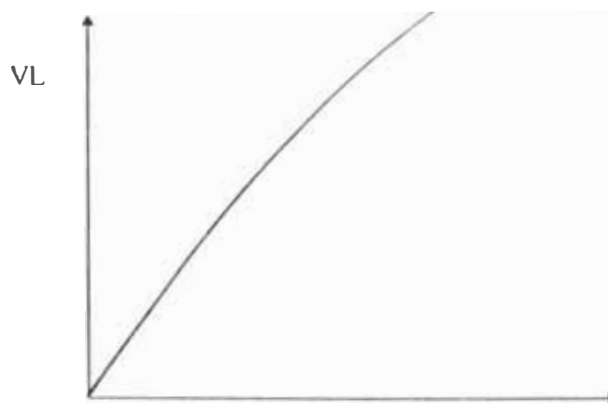


FIGURA N° 2.11 (S-1)

Experimentalmente se ha podido encontrar que.

$$V_L \propto (S-1)^{0.25 \text{ a } 0.5}$$

c) Influencia del diámetro de la tubería

La capacidad portante de un fluido a una velocidad dada decrece con el aumento de diámetro de la tubería. Este efecto puede traducirse en que la velocidad límite crece con el diámetro de la tubería, es decir:

$$V_L \propto D^n$$

La magnitud de esta dependencia ha sido determinado experimentalmente y para tuberías industriales vale:

$$V_L \propto D^{0.3 \text{ a } 0.5} \text{ para tubería de pequeño diámetro (1" a 6").}$$

$$V_L \propto D^{0.1 \text{ a } 0.3} \text{ para tubería de pequeño diámetro (8" a 24").}$$

Esta relación es una de las más importantes en el diseño y operación de sistemas de flujo de pulpas por tuberías, puesto que es el parámetro más importante en el diseño o en la ejecución de modificaciones en las líneas.

d) Influencia de la concentración de los sólidos en la mezcla.

Se ha determinado experimentalmente que la velocidad límite puede crecer, ser constante o decrecer con la concentración de sólidos en la mezcla, dependiendo del tipo de sólido que se este transportado y del rango de concentraciones de trabajo. Sin embargo la generalidad es que para el rango de concentraciones en volumen, entre un 5 y un 25%, V_L aumenta junto con el aumento de la concentración de sólidos en volumen (C_v), pero esta dependencia es poco significativa en los rangos de pulpa a nivel industrial, con dispersiones de V_L menores que un 10%.

e) Inclinación de la tubería

Para un fluido puro no existe ninguna influencia hidrodinámica de la inclinación del conducto. Sin embargo, en el flujo de pulpas la pendiente del ducto influye notablemente en la formación anticipada de dunas sobre el fondo de la tubería.

Esta dependencia para el flujo en tubería a presión podemos sintetizarla en la (Figura N° 12).

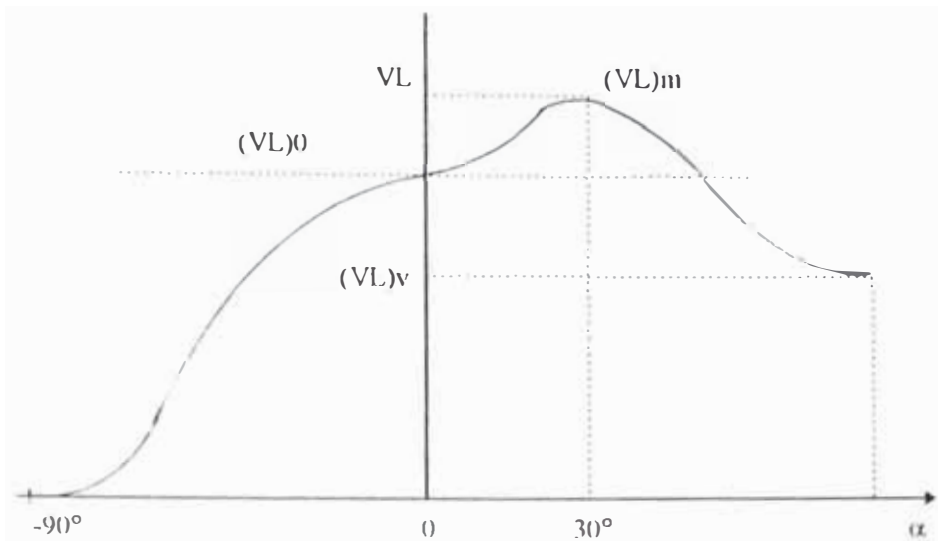


FIGURA N° 2.12

donde:

- α = inclinación de la tubería, (+) para contrapendiente.
- $(V_L)_0$ = velocidad límite de tubería horizontal
- $(V_L)_m$ = velocidad límite máxima (para contrapendientes del orden de 30°).
- $(V_L)_v$ = velocidad límite de la tubería vertical ascendente. Ella corresponde a la velocidad de sedimentación de la mayor partícula del espectro granulométrico.

Esta curva indica que para trabajar con contrapendientes es necesario mayor velocidad de flujo. Sin embargo, para un flujo de pulpa totalmente vertical la velocidad límite es menor que la horizontal.

Es necesario que el incremento de la velocidad límite en las contrapendientes puede alcanzar valores de hasta un 15% sobre la velocidad límite horizontal. Cabe aclarar que este valor es solo de referencia.

Se ha comprobado que para valores de la pendiente, tanto positivas como negativas menores al 4%, los efectos sobre la velocidad límite horizontal son totalmente despreciables.

f) Influencia del pH de la Pulpa

La influencia del pH en la velocidad límite, esta directamente relacionada con la concentración de la pulpa. Para concentraciones en peso del orden de un 45% y menores, el valor del pH prácticamente no influye en V_L , pero para valores de C_p entre 45 y 60% existe una notable influencia del pH. Es así como, para valores de pH entre 11 y 11.5 se obtienen los menores valores de V_L , alcanzando estos una disminución de hasta un 20% con respecto a las velocidades límites que se obtienen para un pH igual a 10. Por lo tanto se recomienda transportar las pulpas de estas características con un pH cercano a 11.5.

ii) Modelos para predecir la velocidad límite

Las pulpas homogéneas con baja concentración de sólidos, no requieren especial cuidado en cuanto al cálculo de la velocidad límite, si bien con altas concentraciones estas pulpas por su reología no-Newtoniana no requieren consideraciones especiales.

Las pulpas heterogéneas conteniendo partículas mayores de 50 micras, deben transportarse a velocidades superiores a la límite para evitar problemas de bloque.

La mayoría de los estudios están basados en la fórmula de DURAND, presentada en 1952:

$$V_L = F_L \sqrt{2gD ((\delta_s - \delta_l) / \delta_l)}$$

DURAND desarrolló su fórmula, de estudios con pulpas con partículas de granulometría cerrada, llamando granulometría cerrada a aquella cuya relación entre el tamaño de partícula mayor y menor no excede de 2:1 para, al menos, el 90% en peso del total de los sólidos. El parámetro F_L depende del tamaño de partículas y de la concentración de sólidos (Figura N°. 2.13)

Posteriormente y a partir de información recogida de diferentes aplicaciones comerciales, se ha demostrado que en la fórmula de DURAND los valores del parámetro F_L son demasiado conservadores para pulpas comerciales con un rango amplio de partículas y conteniendo una proporción importante de partículas inferiores a 100 micras.

En la Figura N°. 2.14 recoge los valores del parámetro F_L para partículas de granulometría amplia, según los estudios de Mc. ELVAIN. Es interesante resaltar que el parámetro F_L se incrementa con la concentración de sólidos hasta valores del 30%, a partir de los cuales decrece. debido principalmente a la interferencia de las partículas en la sedimentación obstaculizada, por lo cual los valores de F_L para concentraciones del 40% son los mismos que para concentraciones de 20%.

Existen publicadas varias ecuaciones para determinar la velocidad límite en función de las densidades del sólido y líquido, tamaño medio de partícula d_{50} , concentración de sólidos en volumen C_V y diámetro interior de la conducción. Entre otras mencionaremos las siguientes:

Fórmula de Voccadlo y Sago (1972)

$$V_L = 8.4 C_v (S-1)gDW)^{1/3}$$

en que W: velocidad de sedimentación de las partículas (m/s)

Fórmula de Mc.Elvain y Cave (1972)

$$V_L = F_L \sqrt{2gD (S - 1)}$$

en que: $F_L = f(d_{50}, C_v)$

el valor de F_L se determina de la Figura N°. 2.14

Debido a que esta fórmula no es representativa de una pulpa con sólidos de densidad alta, el autor realizó varias correcciones a esta fórmula.

- a) Para sólidos de granulometría fina y aspecto granulométrico angosto (en ductos de pequeño diámetro).

$$V_L = 1.1 F_L \sqrt{2gD (S - 1)^{0.6}}$$

- b) Para sólidos de granulometría gruesa y aspecto granulométrico ancho (en ductos de pequeño diámetro)

$$V_L = F_L \sqrt{2gD (S - 1) (d_{80}/d_{50})^{0.1}}$$

- c) En sólidos de granulometría fina y aspecto granulométrico angosto para tubos de gran diámetro.

$$V_L = 1.25 f_i (2gD(S - 1))^{0.25} \quad (\text{en unidades MKS})$$

Adicionalmente, se puede usar los valores de diseño usados por consultores extranjeros que indican que la velocidad límite tiene un valor de 1.5 m/s para relaves y/o mineral con 5% sobre 65 mallas. 2.1 m/s para 15% sobre 65 mallas. 2.4 m/s para 20% sobre 65 mallas y 2.7 m/s para 25% sobre 65 mallas, en el valor medio de la granulometría.

2.5 PERDIDAS DE CARGA

La deducción de la ecuación de conservación de Bernoulli, no considera otro tipo de fuerzas, como la fricción en las paredes, con las cuales, no se cumple esta ecuación de conservación.

Para llevar esta ecuación a la situación real, se evalúan de diversas formas estas pérdidas de Bernoulli

Estas pérdidas, llamadas también "pérdidas de carga", pueden presentarse, repartidas a lo largo de todo un conducto (pérdidas lineales) y también, concentradas en un punto (pérdidas singulares).

Luego para un tubo de flujo, se cumple:

$$B_1 = B_2 + Ah_{12}$$

en que h_{f12} es la pérdida de carga desde la sección (1) hasta la sección (2).

25.1 Pérdidas de carga lineales

La disipación de energía total por efecto de la fricción, en un conducto como el de la (Figura N° 2.15) tanto interna del fluido como la debida al roce del mismo con las paredes, se puede evaluar como:

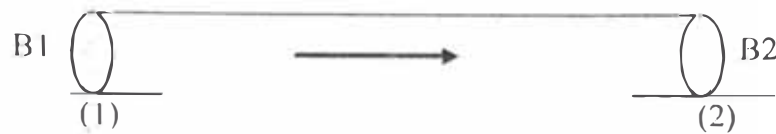


FIGURA N° 2.15

$J = dB/dx$ · Variación del Bernoulli con respecto al largo del conducto.

De esta forma, la pérdida total por fricción se calcula como.

$$H_f = JL$$

en que L , es el largo del conducto entre las 2 secciones a evaluar la pérdida.

a) Tuberías en Presión

En el campo del transporte de pulpas minerales por tuberías existen básicamente dos procedimientos de cálculo. El primero basado en la ecuación de DARCY - WEISBACH adaptada a su aplicación práctica por MOODY en forma de ábaco o diagrama y el segundo basado en la

relación empírica de HAZEN y WILLIAMS, ampliamente usado en el transporte de pulpas en U.S.A

Ecuación de Darcy.

$$J = f(1/D) (V^2/2g)$$

Donde "f" es denominado coeficiente de fricción el cual es función del número de Reynolds y de la rugosidad "ε" de la tubería.

$$f = f(Re, \epsilon/D)$$

La rugosidad ε, depende del material del conducto y representa la rugosidad media de éste, medida generalmente en mm.

Los valores de la rugosidad, para distintos materiales, pueden verse en la Tabla N° 2.1.

Los valores de f, se pueden calcular por medio de fórmulas, ábaco de Moody o el ábaco de Moody modificado por Warman, los cuales aparecen adjuntos (Figuras N° 2.16 y 2.17).

Para cálculos habituales y rápidos de pérdidas de carga en agua o pulpas mineras, el coeficiente f oscila en torno a 0.02.

El coeficiente de fricción f, se puede calcular por la **fórmula de Colebrook - White**.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{0.27\epsilon}{D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right]$$

En esta fórmula, no se puede despejar el valor de f en forma explícita, por eso, puede resultar más cómodo obtener f de los ábacos de Moody y Warman que se incluyen o disponer del software adecuado.

Ecuación de Hazen y Williams.

Es ésta una ecuación empírica que expresada en unidades británicas es:

$$H_f = 0.2083 (100/C)^{1.85} Q^{1.85}/D^{4.8655}$$

Donde H_f es la pérdida de carga expresada en pies por cada 100 pies de tubería, D es el diámetro interior expresado en pulgadas y Q es el caudal en galones americanos por minuto. El parámetro C es una constante que depende de la rugosidad de la tubería, los valores de C varían entre 60 y 150 según sea la superficie interior de la tubería más o menos rugosa. La Tabla N° 2.2 muestra valores de la constante C para diferentes tipos de tuberías, tanto nuevas como usadas.

i) Pérdida de carga en tuberías de Pulpa (Jm)

La resistencia al flujo en una mezcla sólido-líquido (pulpa) que fluye por una tubería puede ser levemente menor, igual, mayor o considerablemente mayor que la resistencia en el caso de un líquido puro.

La experiencia actual, tanto a nivel de laboratorio como industrial, indica que la pérdida de carga de la pulpa tiene el comportamiento mostrado en la (Figuras N° 2.18 y 2.19)

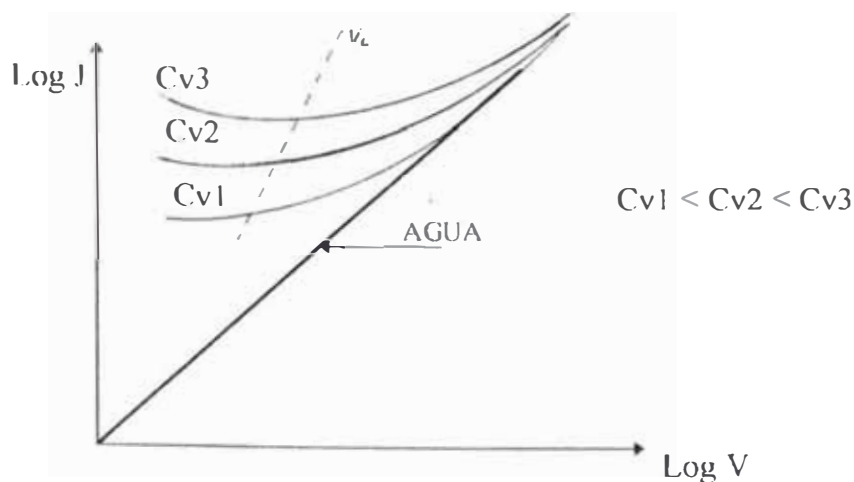


FIGURA N° 2.18

Este comportamiento puede explicarse de la siguiente manera:

El aumento de concentración, para una velocidad dada, implica un aumento en la energía gastada en mantener las partículas sólidas en suspensión.

El aumento de la velocidad homogeneiza la suspensión y la mezcla tiende a comportarse como un líquido puro.

Si la velocidad es muy elevada, la presencia de partículas sólidas tiende a amortiguar los efectos turbulentos en el fluido y la pérdida de carga de la pulpa puede ser menor que para el caso de agua pura.

Al producirse deposición de las partículas sobre el fondo, el choque de estas partículas contra la pared provoca una disipación muy fuerte de energía, y la pérdida de carga aumenta considerablemente aunque la velocidad de flujo disminuya.

Para lograr una mejor comprensión del fenómeno definiremos el parámetro adimensional (θ) clásico denominado diferencial unitaria de pérdidas de carga:

$$\theta = \frac{J_m - J_o}{C_v J_o}$$

Donde J_m , J_o son las pérdidas de carga de la pulpa y del agua pura y C_v la concentración de sólidos en volumen.

Este parámetro es función de las siguientes variables:

granulometría de las partículas sólidas.

densidad relativa de las partículas sólidas.

diámetro de la tubería

concentración de sólidos.

velocidad de flujo.

ii) Modelos para Predecir la Pérdida de Carga

La mayoría de los métodos se basan en la definición del parámetro adimensional.

Método de Durand (1953)

Es el método empírico más antiguo que existe y ésta basado en aproximadamente 2,000 experiencias con granulometrías superiores a la malla 325.

$$\phi = 176 (v^2 \sqrt{cd/gD})^{-1.5}$$

Método de Newit (1955)

Este método está basado en un análisis semiteórico e introduce la gravedad específica de los sólidos y se aplica en flujos heterogéneos.

$$\phi = 1,100 \frac{gDW(S-1)}{v^3}$$

Método de Mc Elvain y Cave (1972)

Estos investigadores a partir de monogramas y diagramas que construyeron empíricamente, proponen calcular la pérdida de carga de una pulpa, tomando como base el siguiente postulado, que dice que si "una pulpa posee una velocidad de flujo cercano a un 30% sobre la velocidad límite, entonces la pérdida de carga de la pulpa es aproximadamente un 10% superior a la pérdida de carga del agua" (en metros)

$$V > 1.3 V_L - J_m = 1.1 J_0$$

Otro autor, basado en un conjunto de datos de granulometrías finas y para velocidades de flujo superiores en un 5% a la velocidad límite, propone

Calcular la pérdida de carga como si fuese un líquido puro pero considerando el valor de la densidad y viscosidad de la pulpa. Además se

debe considerar el efecto del alisamiento de las paredes de la tubería, producto del flujo de la pulpa

25.2 Pérdidas de Carga Singulares

Cualquier variación brusca de la forma o dirección del conducto origina una pérdida de carga adicional, que se denomina pérdida singular. Estas ocurren por el hecho que cualquier modificación en un conducto altera al uniformidad del flujo.

Casos frecuentes de pérdidas singulares, son las válvulas, curvas, codos, cambios de sección bruscos o paulatinos, e incluso uniones entre tramos de tubería.

Para evaluar estas pérdidas, en las mismas unidades que el Bernoulli, se acostumbra usar un coeficiente adimensional K, propio de cada singularidad, de tal forma que la pérdida queda expresada como:

$$h_s = K \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

h_s : pérdida singular (m.c.a)

K : coeficiente de pérdida

v : velocidad media del ducto (m/s)

Cabe hacer notar que el valor de K puede oscilar entre 0.01 y 5.00 dependiendo del tipo de singularidad.

Se debe prestar atención a la definición del valor de v, en el sentido de su correspondencia con la velocidad antes o después de la singularidad.

Los valores de K de las singularidades que se presentan con mayor frecuencia, pueden verse en la Tabla N° 2.3.

Tabla 2.4 .- Pérdidas de Carga Singulares

DESCRIPCION	K
Codos	
45° Standard	0.35
45° Radio grande	0.20
90° Standard	0.75
90° Radio grande	0.45
90° Angulo recto	1.30
180° U	1.50
Uniones	0.04
Válvulas (totalmente abiertas)	
Compuerta	0.17
Mariposa	0.24
Diafragma	2.30
Angulo	3.00
Globo	6.40
Seguridad (Válvula Check)	2.00
Retención (de pie)	15.00

2.6 ALTURAS DE CARGA EN BOMBEO

26.1 Bombas de Agua

A menudo en las líneas de abastecimiento industrial se requiere energía electromecánica para la impulsión del líquido. Esta energía es proporcionada por las bombas de agua.

Dentro los criterios de diseño de selección de bombas juega un papel preponderante la determinación de la altura de impulsión del sistema.

Se define la altura de impulsión como la sumatoria de la pérdida de carga por fricción, la pérdida de carga por singularidades, y el desnivel geométrico.

$$H = h_f + h_s + H_g \text{ (mca)}$$

h_f pérdida de carga lineal que corresponde al cálculo a través de la fórmula de Darcy.

h_s pérdida de carga por singularidades. Debe obtenerse de tablas.

H_g diferencia geométrica (m).

La altura de impulsión puede determinarse una vez escogida la tubería apropiada y permita, en conjunto con el caudal a impulsar, formar pares (H,Q) conocidos como Curva de Demanda del Sistema.

La intersección de esta curva con la curva de oferta del fabricante definen el punto de operación y con él, el equipo de bombeo requerido.

La altura de aspiración de la bomba, es la diferencia de cota entre la bomba y superficie libre del sistema al cual se le extrae el agua (napa, lago, estanque,

etc.). Si esta altura es muy alta, se producen presiones muy bajas con el consiguiente problema de posible cavitación.

Para evitar los efectos negativos de la cavitación, un factor importante a considerar en la selección de la bomba, es la **altura neta positiva de aspiración** o **NPSH** (Net Positive Suction Head).

La NPSH requerida para una bomba centrífuga, es la energía mínima neta (expresada en m.c.a. de presión absoluta) que debe tener el fluido en la admisión del rodete.

Las curvas de la NPSH requerida ($NPSH_r$), se incluyen generalmente en las curvas características de la bomba que proporciona el fabricante. Este valor es el mínimo valor del NPSH, que asegura un funcionamiento sin problemas.

Para calcular la NPSH disponible para una instalación de bombeo se puede emplear la fórmula siguiente:

$$NPSH_d = \frac{P_a - P_{vap}}{\delta} - Z_s - h_f - \delta h_s$$

Donde:

- P_a : Presión atmosférica (kgf/m^2)
- P_{vap} : Presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo (kgf/m^2).
- δ : Peso específico del líquido
- Z_s : Altura estática de aspiración (m)
(+) para aspiración positiva (bomba por sobre la superficie libre del líquido aspirado)

		(-) en caso contrario (aspiración negativa)
h_f	:	Pérdida friccional total (m)
h_s	:	Suma de pérdidas singulares (m)

La NP II disponible debe exceder a la NPSII requerida por la bomba con el fin de evitar cavitación.

$$\text{NPSHd} > \text{NPSHr}$$

Para el caso de bombeo de pulpa las expresiones siguiente teniendo validez. Sólo debe ponerse atención en emplear el valor del específico de la pulpa respectiva

26.2 Bombeo de pulpas

En la Figura N° 2 20 se presenta una instalación de bomba típica, la misma que se utilizará para describir parte de los cálculos hidráulicos asociados al diseño de un equipo de bombeo de pulpa.

Las características hidráulicas en cuanto a desniveles y pérdidas por fricción y singularidades involucradas en una estación de bombeo típica son las siguientes:

- 1) **Carga estática de succión.**- Distancia vertical desde el nivel del líquido en el estanque de succión hasta el centro de línea de la bomba.
- 2) **Pérdidas de entrada.**- $0.5 V_{H_s}$, $V_{H_s} = V_s^2/2g$; altura de velocidad en la succión.
- 3) **Pérdida de carga en línea de succión.**- (Pérdida de carga unitaria) x (longitud de cálculo de la tubería de succión).

4) Altura estática de descarga .- Distancia vertical desde el centro de línea de la bomba hasta el punto de descarga.

5) Pérdida de carga en línea de descarga.- (Pérdida de carga unitaria) x (longitud de cálculo de la tubería de impulsión).

6) Pérdida de carga en la descarga.- $VH_d = V_s^2/2g$

7) Presión requerida en el punto de descarga (m.c.a.)-

Descarga a la atmósfera = 0

Descarga a un ciclón:

$$\frac{\text{p.s.i (ciclón)} \times 0.7}{\delta_p}$$

8) Altura Dinámica total H.D.T. : (2+3+4+5+6+7)-1 m.c.a.

Denominando:

H = altura de impulsión de la pulpa

H_w = altura de impulsión en el bombeo de agua pura (corresponde a la altura en los catálogos).

La corrección consiste en determinar el factor HR tal que:

$$H_w = H/HR \quad (HR < 1)$$

Para la determinación de HR puede usarse diversos métodos empíricos:

Modelo de Mc Elvain y Cave:

Propone la siguiente corrección para HR:

$$IIR = 1 - (K \times C_v) / 20$$

Donde K se obtiene de un ábaco parametrizado por la densidad relativa S y el tamaño medio d_{50} de los sólidos (Figura N° 2.21).

Modelo de Sillgren:

La ecuación empírica propuesta por este investigador es más rigurosa y tiene la siguiente forma.

$$IIR = 1 - RH$$

Donde

$$RH = \frac{0.32 C_p^{0.7} (S-1)^{0.7}}{C_d^{0.25}}$$

Donde:

C_p = concentración de la pulpa en peso.

C_d = coeficiente de arrastre

A través de este modelo, según Sillgren, es posible obtener predicciones confiables hasta concentraciones en volumen de 20 %.

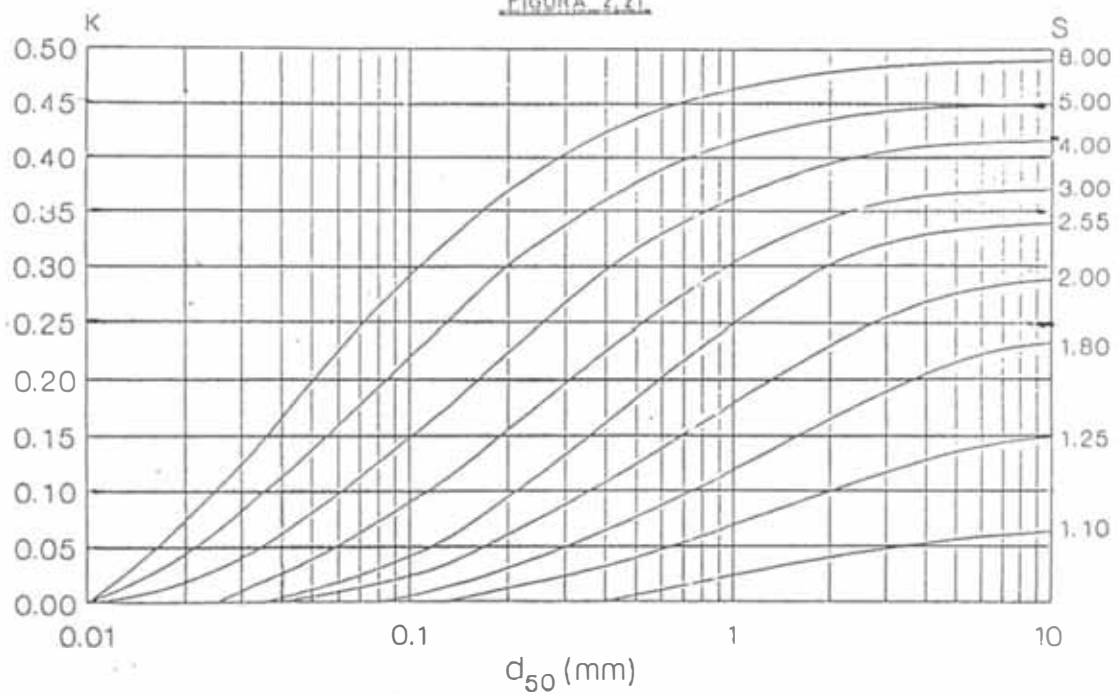
2.7 DESGASTE EN LÍNEAS DE PULPA POR ABRASIÓN Y/O CORROSION

El desgaste que sufren inevitablemente las instalaciones de flujo de pulpa tiene dos causas principales: La abrasión mecánica debido al choque continuo de las

MAC-ELVAIN Y CAVE

Bombas de Pulpa

FIGURA 2.21



Determinación de K

$$HR = 1 - (K \times Cv) / 20$$

partículas sólidas contra la pared de la tubería y la corrosión electroquímica debida a la diferencia de potencial electroquímico entre la pulpa y el ducto.

27.1 Abrasión

El desgaste por abrasión surge cuando las partículas sólidas son forzadas a pasar entre unas superficies sólidas en movimiento. Ejemplo son las chancadoras y molinos (Figura N° 2.22).

Las variables que influyen en la abrasividad de un flujo sólido-líquido son múltiples: tamaño, dureza, densidad y forma de las partículas, concentración de sólidos, velocidad y características geométricas mecánicas de la línea.

De todas estas variables, las más importantes de controlar para un sistema dado son: el tipo de tubería a usar, la velocidad media de la mezcla y los cambios bruscos en la dirección del flujo.

Para fines comparativos señalaremos una tabla de abrasión de mineral de cobre (60% + 200# y 25% + 65#) en distintos tipos de tubería (pH = 10).

Velocidad (m/s)	Tasa de Abrasión (mm/año)				
	Acero	Concreto	Goma	HDP	Poliuretano
2.00	1.00	2.00	0.10	0.40	0.05
2.50	1.50	3.00	0.10	0.60	0.06
3.00	2.50	5.00	0.15	1.00	0.08
8.00	20.00	50.00	1.00	7.00	0.70
10.00	35.00	80.00	1.50	15.00	1.20

También existen tasas de desgaste para tuberías de acero y de HDP de acuerdo a las velocidades que se indican, obtenidas de estudios experimentales y mediciones industriales.

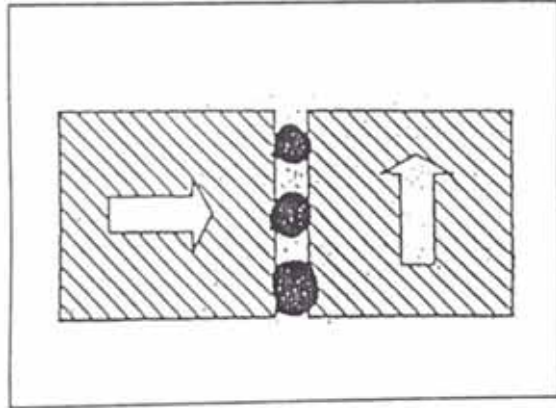


Fig. 2.22 Desgaste por abrasión

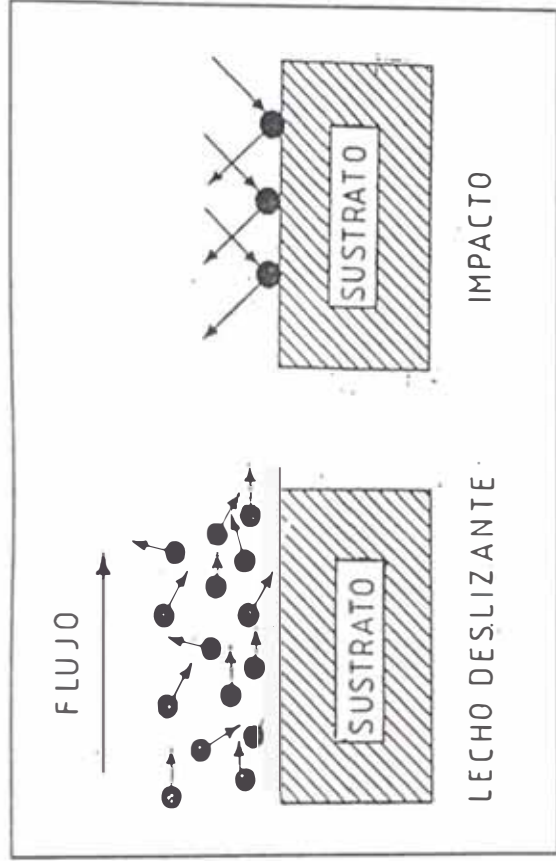


Fig. 2.23 Desgaste por erosión

Para el acero se incluyen las tasas para 18" Y 24" de diámetro. Las tasas para la línea de 24" consideran un 10% de coeficiente de seguridad por posible arrastre de fondo.

Velocidad (m/s)	Tasa de Desgaste (mm/año)		
	Línea de 18" y 20"	Línea de 24"	HDP
2.00	0.41	0.45	0.40
2.50	0.62	0.68	0.60
3.00	0.88	0.97	1.00
3.50	1.20	1.32	1.40
4.00	1.52	1.67	1.80
4.50	1.90	2.09	-

Se ha demostrado que en la generalidad de los casos la tasa de abrasión depende de la velocidad de la siguiente razón:

$$T.A \propto \sqrt{2.0 \text{ a } 3.0}$$

La abrasión local por cambios de dirección puede controlarse diseñando las curvas con radio amplio (superiores a 50 diámetros) o instalando protecciones antiabrasivas en codos y curvas.

27.2 Erosión

Es este el fenómeno de desgaste predominante en las bombas centrífugas. La erosión es una forma de desgaste que provoca la pérdida de material por la acción de las partículas sólidas en suspensión en la pulpa (Figura N° 2.23).

La erosión comporta una transmisión de energía cinética que no existe en la abrasión. La energía cinética cedida por la partícula en movimiento a la superficie trae consigo un alto esfuerzo cortante (ver Figura no 2.29).

27.3 Corrosión

La corrosión electroquímica puede tener varias causas: presencia de oxígeno y otros gases en el fluido, influencia catalítica de los reactivos, pH ácido, etc. siendo prácticamente imposible de predecir su orden de magnitud sin las pruebas experimentales adecuadas.

En todo caso, el efecto conjunto de la abrasión, erosión y corrosión amplifica el efecto del desgaste al eliminar, por abrasión y/o erosión mecánica las capas al interior de la tubería. Debido a ello, el sistema más utilizado de prevenir dicha corrosión es proteger catódicamente la tubería, de modo de minimizar la variación de potencial que cause reacción química. Otras posibilidades es disminuir la corrosión interna es controlar el pH o eliminar el oxígeno de la fase líquida mediante sulfito de sodio.

CAPITULO III

3.0 CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO

3.1 CARACTERISACION DEL SÓLIDO A TRANSPORTAR

En la industria minera, los sólidos habitualmente transportados son: mineral molino, concentrados de mineral o relaves.

En el transporte hidráulica de pulpas, las características del material, son altamente determinantes del diseño del sistema de conducción. Por ello, es importante tener bien definidas las siguientes cualidades:

*** Densidad del Sólido**

Es muy importante la definición exacta de los sólidos, debido a ello determina su comportamiento hidráulica en lo que se refiere a la sedimentación valores típicos oscilan entre 1.4 (gr./cm³) para carbón y 5.6 para concentrados de fierro.

*** Granulometría del Sólido**

Se debe conocer la curva granulométrica del sólido para condiciones de operación medias y extremas y determinar valores característicos de ella como son el d_{50} , d_{85} , d_{90} , etc.

*** Forma de las Partículas**

conocer la forma media de las partículas (esférica, angulosa, redondeada, etc) Existe coeficientes que las caracterizan.

*** Velocidad de Sedimentación**

El diseño hidráulico de transporte de sólidos, requiere conocer los valores de la velocidad de sedimentación de los sólidos contenidos en ella.

Además de las características del sólido, la mezcla sólido-liquido tiene un cierto comportamiento hidráulico en función de los siguientes parámetros, propios de una pulpa en particular.

*** Concentración de Sólidos**

Este parámetro, indica la cantidad de sólidos presentes en la mezcla (pulpa) y se puede definir en términos de volumen o peso.

C_v : concentración en volumen de sólidos en la mezcla.

$$C_v = \frac{\text{Volumen de sólido}}{\text{Volumen de la mezcla}}$$

C_p : Concentración en peso de sólidos en la mezcla.

$$C_p = \frac{\text{Peso de sólido}}{\text{Peso de la mezcla}}$$

Estos valores pueden ser muy diferentes, por lo que hablar de concentración, debe especificarse, si se refiere a la concentración en volumen o en peso

En pulpas absolutamente homogéneas, la concentración es un valor constante para toda la pulpa, de lo contrario, la concentración solo indica valores medios.

Habitualmente, tanto la concentración como la concentración en volumen se expresa en (%).

Densidad Relativa

La "densidad relativa" o "gravedad específica" es un parámetro que relaciona la densidad de los sólidos o de la pulpa con la del agua en condiciones standard (4°C y presión de 1 atmósfera).

S : Densidad relativa del sólido

$$S = \delta_s / \delta$$

S_p : Densidad relativa de la pulpa

$$S_p = \delta_p / \delta$$

Donde:

δ : densidad del fluido (agua)

δ_s : densidad del sólido

δ_p : densidad de la pulpa

* **Temperatura**

La temperatura media de la pulpa define valores importantes como son la viscosidad, compresibilidad, etc.

* **Viscosidad**

Al igual que en la densidad, al agregar sólidos al agua pueden existir grandes variaciones en el valor de la viscosidad, tanto dinámica como cinemática. Las variaciones de estos parámetros pueden influir Notoriamente en el comportamiento físico de la pulpa, por eso, el valor de la viscosidad de la pulpa debe ser medido o estimado en la forma más exacta posible

Algunas de las fórmulas más tradicionales para evaluar el valor de la viscosidad de la pulpa son.

Fórmula de Thomas:

$$\mu_p/\mu = 1 + 2.5C_v + 10.05C_v^2 + 0.00273e^{16.6C_v}$$

Donde:

μ_p : viscosidad dinámica de la pulpa

μ : viscosidad dinámica del fluido (agua)

Esta fórmula es empírica, pero basadas en experiencias con esferas.

Fórmula de Wellman (1977)

$$\mu_p/\mu = \frac{e^{-10.4C_v}}{(1 - C_v/0.62)^8}$$

Esta se basa en experiencias con flujos de relaves chilenos y arroja mejores resultados que la fórmula anterior en el caso de pulpas mineras.

El de estas fórmulas, es que no consideran otras variables cuya influencia en la viscosidad es importante, como es el valor del pH.

La empresa Betchel, con amplia experiencia en transporte de pulpas, recomienda valores para la viscosidad en los cuales considera al pH y han dado buenas resultados en las pulpas mineral en Chile.

Cp (%)	Viscosidad Cinemática (10 ⁻⁶ x m ² /seg)	
	pH = 10	pH = 11.0
30.0	1.70	1.80
35.0	2.00	2.20
40.0	2.40	2.50
45.0	2.80	3.10
50.0	3.50	4.10
55.0	4.80	5.60
57.5	6.30	7.60
60.0	7.30	8.50
65.0	17.50	19.30

pH

Como ya se mencionó el pH puede tener una incidencia en la viscosidad de la pulpa, por lo tanto, la importancia de su definición resulta obvia.

3.2 DETERMINACIÓN DE RANGOS DE FLUJO

Definidas las características del sólido y la pulpa que se desea transportar la determinación del caudal constituye la base del diseño industrial.

La producción minera tiene variaciones Normales menores, los que el sistema de transporte de pulpa debe ser capaz de adaptar.

La fórmula que determina el caudal de pulpa requerido para transportar una cierta cantidad de sólidos es la siguiente:

$$Q = \frac{\text{TMSPH}}{3600} (1/C_p - 1 + 1/S) \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Donde:

TMSPH :	Toneladas métricas de sólidos transportadas por hora.
C_p :	Concentración de sólidos en peso.
S :	Densidad relativa de sólidos.

De la fórmula se puede concluir, que si no existe variaciones en la concentración y en la densidad, el caudal varía en forma directamente proporcional al tonelaje transportado

En sistema de transporte muy flexible lo anterior no constituye un problema, sin embargo, en sistemas más restringidos como el transporte en una tubería en presión, el caudal de equilibrio resulta sólo uno. Por ello ante las bajas de producción se requiere diluir más allá de lo habitual y en caso contrario espesar a niveles que podrían resultar peligrosos por riesgos de sedimentación.

Como conclusión primera de lo anterior, lo atractivo que resulta la flexibilización de un sistema de transporte en presión, de manera de adecuarse al caudal que se requiera transportar por la vía de implementación de pérdidas de carga regulables (anillos variables).

Como segunda conclusión, se ve lo importante que resulta en cualquier caso determinar en forma correcta en rango de caudales a transportar.

El caudal mínimo estará dado, por la mínima producción con la densidad de sólidos y concentración máxima esperada.

Por el contrario, el caudal máximo se presentará, con la producción máxima y la densidad de sólidos y concentración mínima esperada.

Con los parámetros anteriores puede hacerse un gráfico representativo de la zona de operación normal del sistema de transporte de pulpa (Figura N° 3.1).

Los caudales mínimos transportables resultan definidos por la condición de velocidad mínima de flujo que presenta peligro de deposición.

3.3 SELECCIÓN DEL TIPO DE DUCTO DE CONDUCCIÓN

La tecnología de equipos y materiales para los sistemas de transporte de pulpa también ha evolucionado favorablemente. Se puede señalar entre otros:

* **Tubería de Acero**

Son adecuadas para transporte de pulpas alcalinas, en larga distancia y altas presiones (sobre 250 psi). La fabricación de aceros de alta resistencia X-60 a X-75, ha implicado reducciones substanciales de costos de adquisición.

* **Tuberías en HDPE**

Son muy adecuadas para conducciones de pulpa, alcalinas o ácidas, de baja presión (bajo 200 psi), o en escurrimiento libre, y se caracterizan por su fácil y rápido montaje.

* **Canaletas de Hormigón**

Son adecuadas para la conducción de grandes tonelajes de sólidos diluidos y caudales variables. Se ha desarrollado procedimientos de construcción acelerada, como son el uso de prearmaduras, moldajes deslizantes, hormigón prefabricado, etc. Los cuales han abaratado los costos.

En zonas de fuerte pendiente ha dado buenos resultados el recubrimiento con mampostería de piedra.

Para la selección del tipo de ducto, es altamente determinante la geografía del lugar.

Para el transporte de sólidos de 2 puntos de similar cota, y obviamente en casos en que el punto destino es más alto, se requiere de conducción en presión en tuberías de acero, debido a que es necesario el bombeo.

En casos de que la topografía permite la conducción gravitacional, nuevamente la geografía es determinante y se debe considerar lo siguiente:

El trazado para el transporte en tubería en presión, Normalmente resulta de longitudes bastante Menores a las del trazado en canaleta o tubería en acueducto, por otra parte, el metro lineal de canaleta, para transportar un cierto caudal es bastante más económico que el metro lineal de tubería adecuada para la misma capacidad de transporte

Es por lo anterior, que dependiendo de cuanto sea la longitud adicional que deba agregarse por el hecho de implementar una canaleta, se puede sobrepasar el límite en que ella resulte más conveniente, y comienza a ser más económica la conducción en tubería.

Como una referencia aproximada, se puede decir, que para conducciones con caudales mayores a 200 l/s, cuando la geografía determina trazados en canaleta

mayores al doble de la longitud del trazado para tubería en presión, resulta más conveniente la utilización de tuberías.

Para caudales menores que 200 l/s, en muchos casos las conducciones en presión tienen mayor posibilidad de resultar más conveniente.

La afirmación anterior es solamente como una referencia global, ya que obviamente, existen múltiples factores que pueden determinar algo distinto. Estos factores pueden ser, la necesidad de construcción de túneles (tanto para canaletas como para tuberías), la necesidad de liberación de energía tanto en trazado en canaleta, por vía de drop boxes o en tuberías mediante anillos disipadores, o múltiples otros factores.

Finalmente después de un profundo análisis de las posibles alternativas de conducción se puede llegar a la conclusión que lo más conveniente resulta la construcción de un sistema mixto, con una o más partes en tubería y el resto en canaleta.

Con respecto a la decisión de utilizar tubería en presión de acero o de HDPE, ello está totalmente determinado por la presiones existentes ya que como se mencionó, las tuberías de HDPE, sólo son técnicamente factibles para presiones de trabajo menores a los 200 psi

3.4 SELECCIÓN DEL TIPO DE BOMBA A USAR

En el mercado de las bombas de pulpa, existen 2 tipos muy destacables, ellas son:

* **Bombas Centrifugas de Pulpa**

Diversas fábricas de bombas tienen un muy alto grado de desarrollo de investigación hidráulica y de materiales, de modo de obtener equipos de eficiencia razonable sobre 60% en pulpas, presiones hasta 700 psi, en operación en serie y duración de elementos desgastables muy superior a las 1,000 horas. Cabe destacar los siguientes fabricantes: ASH, GIW, y WARMAN, ordenados alfabéticamente

* **Bombas de Desplazamiento Positivo para Pulpas (Pistón).**

Esta Tecnología de reciente instalación en Sudamérica es muy conocida y confiable a nivel mundial. Permite la obtención de eficiencias efectivas del orden del 80 a 90% en pulpas y presiones hasta 3,000 psi, por lo que son muy convenientes para grandes alturas de impulsión. Las marcas más usuales son GEHO, MARS, WIRTH y WILSON-SNYDER, ordenadas alfabéticamente.

Al seleccionar entre ambos tipos de bombas, resultan relevantes los aspectos de costos y altura de impulsión.

Cuando es factible la impulsión con bombas centrífugas generalmente resulta más económico. Es por ello que las bombas de desplazamiento positivo resultan convenientes para grandes alturas de impulsión o para pulpas extremadamente viscosas.

3.5 TECNOLOGÍA DE INSTRUMENTACIÓN Y DE CONTROL A USAR

la TECNOLOGÍA de instrumentación y de control es función del tipo de conducción, dependiendo ella, si se trata de conducción en superficie libre (canaletas y tuberías en acueducto) o tuberías en presión.

Tuberías en Presión

La instrumentación más apropiada para las mediciones en flujo de pulpa en tuberías en presión son del tipo no obstructiva, es decir, deben ser externas a la tubería o parte de ella misma. Las variables más importantes a controlar son:

- caudal de pulpa (o bien velocidad de pulpa)

- densidad de pulpa

- presión relativa o absoluta

Adicionalmente se puede monitorear:

- espesor de la tubería

- pH de la pulpa

- temperatura de la pulpa y ambiental

Medición de Caudal de Pulpa

Los equipos de medición de caudal más confiables o utilizados para las pulpas son los flujómetros magnéticos.

Estos equipos constan de un tubo de flujo, el se instala como una pieza de la tubería

Este tubo de flujo está recubierto al interior por algún elastómero resistente a la abrasión, como son goma natural, neoprene o poliuretano entre otros.

En las ocasiones que no se puede considerar un medidor magnético de flujo, se utilizan medidores ultrasónicos, estos no requieren necesariamente de un tubo de flujo si no que los sensores de ultrasonido se montan directamente sobre el exterior de la tubería existente.

Los flujómetros magnéticos modernos pueden garantizar precisiones de + 2% si están bien revestidos y calibrados, lo que los posibilita para detectar fugas en mineroductos.

Densidad de Pulpa

La medición de densidad puede realizarse mediante densímetros de absorción, radioactiva o ultrasónica, o por pesaje de un ramal de la tubería.

Los densímetros de absorción radioactivos son los más usuales y se instalan directamente sobre la tubería y consisten básicamente en una fuente radioactiva y de un detector instalado al lado opuesto de la cañería, este detector recibe la señal y la transforma en señal eléctrica, esta señal eléctrica se envía al transmisor de densidad el cual procesa la señal medida en el detector y genera una señal de salida proporcional a la densidad de la pulpa.

Un densímetro nuclear moderno, bien mantenido y calibrado puede tener una precisión de + 2% en pulpas de minerales.

Presión

Para la medición de la presión en la cañería de pulpa se utilizan medidores de presión electrónicos de diafragma u otros similares con sellos remotos, lo que permite aislar la medición de la presión de las vibraciones de la línea y evitan la creación de zonas de sedimentación en la tubería.

Los transductores de presión pueden tener precisión de + 3% si están bien calibrados

Canaletas

Para el transporte de pulpas en canaletas, la instrumentación más adecuada y quizás la única relevante, es la medición de niveles. Adicionalmente también se pueden monitorear el pH y la temperatura de la pulpa.

Para la medición de niveles en canaleta conduciendo pulpa, también se requiere de instrumentación que no este en contacto con ella, evitando así la abrasión y corrosión. Por ello, la instrumentación utilizada es del tipo ultrasónica, con la cual se mide directamente el nivel de escurrimiento. El censors conecta a una unidad electrónica que envía una señal directamente proporcional al nivel de la pulpa. Puede agregarse una unidad de cálculo que convierta la medición de nivel, en medición de caudal mediante la relación hidráulica propia de la canaleta en cuestión.

Las precisiones globales del sistema pueden alcanzar sin dificultad valores de + 1.5% en la medición del nivel

3.6 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA RIESGO AMBIENTAL

Los sistemas de protección contra riesgo ambiental se insertan totalmente en el contexto de lo que es la instrumentación y control de las líneas de transporte de pulpas.

Los sistemas de protección se basan principalmente en la detección temprana de fugas o de cualquier otro comportamiento (caudal, presión), diferente al esperado

Los medidores de caudal y presión debiesen indicar un valor conocido y constante para cada situación de flujo establecido salvo pequeñas oscilaciones en torno a este valor.

Relacionado con lo anterior, las situaciones de mayor cuidado y que podrían calificarse de emergencia, por los imprevistos son:

- a) Los medidores de caudal (a nivel en canaleta) indican valores diferentes a lo largo de la conducción, señalando la posibilidad de una fuga intermedia.
- b) Los medidores de presión y caudal indican grandes variaciones, más allá de las oscilaciones normales, en el momento que se está operando en régimen establecido.

- c) Los medidores de presión y caudal indican magnitudes diferentes a las esperadas al ejecutar una operación programada.

Los lugares en que necesariamente debe existir control, son todo tipo de singularidades de riesgo como: puntos altos y puntos bajos, puntos contiguos a válvulas, tramos de baja o alta pendiente en canales, anillos, bombas, bifurcaciones, etc.

A un buen sistema de protección contra riesgos ambientales, además del control permanente y continuo del caudal y presión de la línea se le debe implementar un estricto programa de monitoreo del estado de sus componentes y de la conducción misma

Para ello, se debe controlar el desgaste de la línea (espesor residual), con énfasis en las zonas de alta velocidad como son las curvas y los tramos de alta pendiente. También requiere un estricto control, el estado de las válvulas, compuertas, los anillos disipadores, etc.

Para minimizar aún más el riesgo de daños ambientales resulta conveniente la implementación de mecanismos proyectados para liberar sobrepresiones, mayores a las aceptables, como pueden ser los discos de ruptura y válvulas de seguridad, que operan las primeras rompiéndose y las segundas abriéndose. al sobrepasar las presiones de diseño.

Por último, para completar el cuadro de control de riesgos ambientales, se pueden construir embalses de seguridad, cuya función es la de recibir derrames en

caso que exista la posibilidad de conducirlos hacia ellos y la de recibir pulpa en tránsito cuando exista alguna fuga o derrame hacia aguas abajo.

3.7 FILOSOFÍA GENERAL DE OPERACIONES

Un sistema de transporte de pulpa debe de tener una guía filosófica operacional muy clara para cumplir su objetivo de transportar un producto minero en forma continua, barata y segura.

En especial, debe enfatizarse que por la naturaleza de la operación minera ninguna operación unitaria, y en especial el transporte de pulpas a largas distancias, puede ser vulnerable ya que paraliza la operación global minera.

Alguna de las pautas de filosofía de operación que hay que considerar en el diseño y operación de un sistema de transporte Hidráulico de sólidos a largas distancias son:

- * El sistema de transporte Hidráulico debe ser capaz de transportar la totalidad del producto de la industria minera. Es decir, el sistema debe ser diseñado para soportar la máxima producción posible y nunca debe constituirse en un "cuello de botella" de la producción del complejo minero.
- * El sistema de transporte Hidráulico debe tener la flexibilidad para adaptarse a los cambios de ritmos de la producción de la faena minera, en especial a los macro-cambios como ser la paralización de una o varias

líneas de producción (molienda), el by-pass de un sistema de recuperación de aguas (espesadores)

- * El sistema de transporte hidráulico debe tener procedimientos o elementos de control para adaptarse a todas las situaciones eventuales que pueden ocurrir en el complejo minero (corte de suministro de energía eléctrica, paralización total imprevista, acciones terroristas, temporales, terremotos, etc.). Para cada una de estas situaciones debe existir una respuesta clara, confiable y Conocida.

- * El sistema debe disponer de una razonable capacidad de almacenaje de reserva para casos especiales o d emergencia. Tanto en la cabecera como a lo largo del mismo y en el terminal.

- * Un sistema de conducción de pulpas debe requerir la mínima cantidad de personal para operar. El ideal de disponer de un comando remoto centralizado (en algún punto de la línea) y en el campo sólo tener actividades de patrullaje y mantenimiento programado.

- * Es prácticamente imposible diseñar un sistema a prueba de todas las eventualidades posibles de ocurrir, al igual que los oleoductos (que son de mayor riesgo), lo único que puede implementarse es un sistema de control de detección temprana de fugas. Estos sistemas no evitan las fugas sino que las minimizan, de ese modo evitan molestias con la comunidad (juicios, etc.).

- * Por la naturaleza del material sólido a transportar, con diferentes grados de abrasividad y/o corrosividad, es normal esperar desgaste de piezas o partes sometidas a alta velocidad de flujo (bombas, válvulas, anillos de disipación de energía, etc.). Por tanto resulta imprescindible disponer de elementos de reserva (by-pass y/o stand by) para evitar pérdidas de capacidad de transporte por motivos de mantención programada o de emergencia.

- * Es fundamental que los operadores de conducción de pulpas estén bien capacitados, motivados y que tengan una clara concepción de los problemas eventuales que podrían sufrir los sistemas hidráulicos en algún momento de su vida útil.

Como ejemplo de operaciones exitosas se tiene el caso del Mineroducto de Disputada, de más de 56 Km. de largo, de muy alta presión de trabajo y condiciones extremas de invierno, que ha operado más de 2 años con personal mínimo y sin fallas.

Otro ejemplo lo constituye el relaveducto de División el Teniente de Codelco, de más de 100 Km de largo, que en unos 6 años de vida no ha tenido un sólo embanque.

Finalmente, un ejemplo latinoamericano importante, como es el Mineroducto de Samarco en Brasil, de 400 Km. de longitud que permite bombear 12,0 millones de toneladas de fierro por año, ha presentado sólo un evento con pérdida de 3 días de operación en 13 años de vida.

Luego es factible decir que la tecnología de transporte de pulpas a largas distancias es una "tecnología probada" y que no es posible esperar sorpresas mayores en la operación.

Lo anterior no implica de que no exista ningún tipo de vulnerabilidad en el transporte de pulpas sino que con la tecnología existente es factible prever y minimizar el impacto de dichas vulnerabilidades hasta hacerlas despreciables.

3.8 PLANIFICACIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE OBRAS

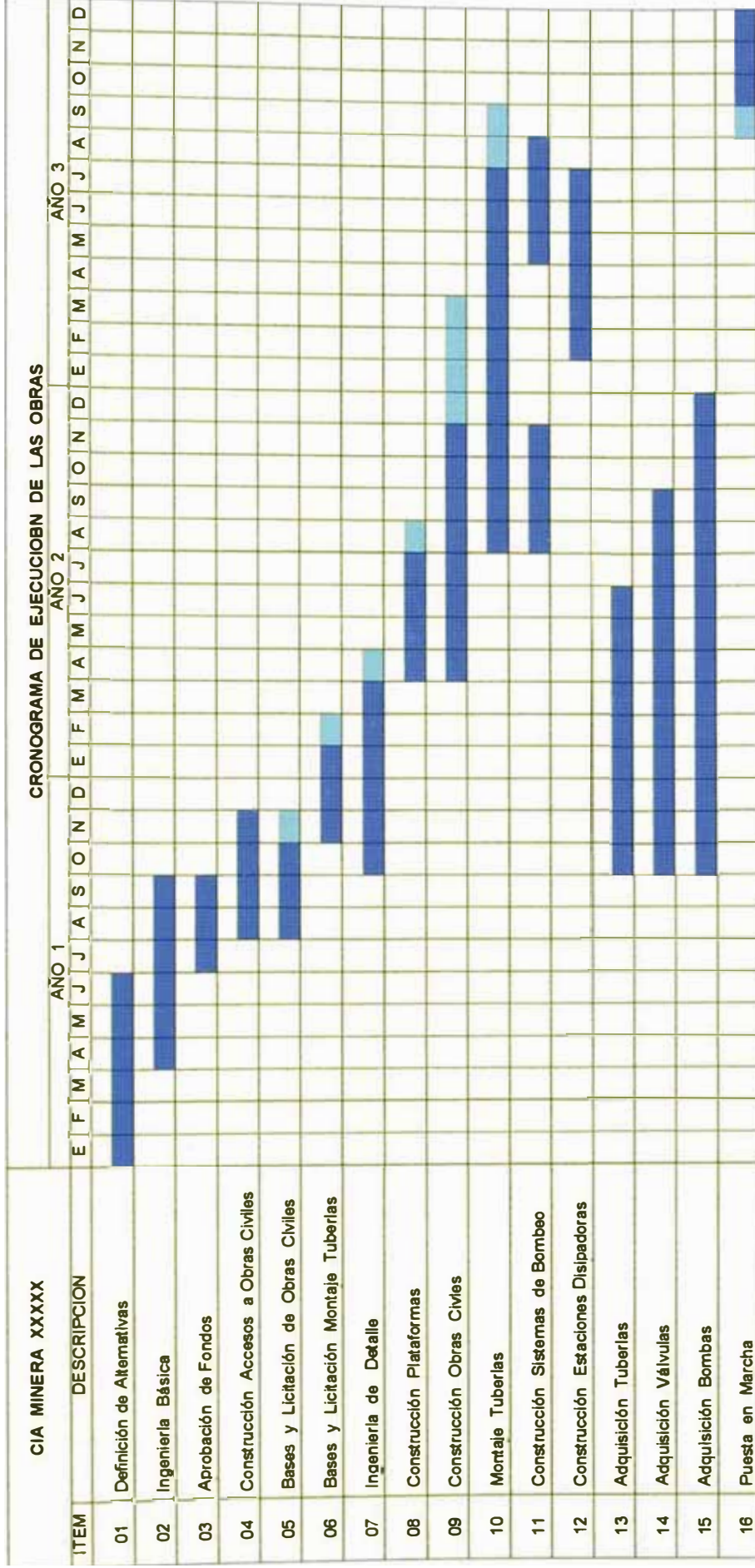
la construcción de las obras asociadas a sistemas de transporte de pulpas, también ha tenido desarrollo Notables en los últimos años, lo que ha redundado en acortar los plazos de construcción.

Una obra mayor de conducción de pulpas, que en la década del 70 se demoraba de 4 a 5 años incluidas todas las actividades de diseño, adquisiciones y construcción, ahora puede planificarse para su puesta en servicio en alrededor de 2 años.

Las grandes innovaciones que han surgido son:

- * Los cálculos pueden realizarse con apoyo de paquetes computacionales (cálculos hidráulicos / de esfuerzos / anclajes / etc.) y los diseños pueden ser realizados en sistemas AutoCAD, minimizando los chequeos cruzados y agilizando la emisión de planes de montaje y fabricación).

PROGRAMACION DE OBRAS



Simbología : ■■■■■> En Ejecución
 ■■■■■> Holgura

- * La fabricación de tuberías, con recubrimientos exteriores epóxicos colocados en fábrica, permite disponer de decenas de miles de toneladas de tuberías en puerto de recepción en menos de 6 meses después de emitida las respectivas ordenes de compra.

- * La construcción de plataformas para instalación de tuberías y canales es extremadamente rápida con el apoyo de la actual maquinaria pesada (Tractores D-8, etc). Es usual conseguir 5 a 10 Km. de avance por mes y por frente de trabajo en zonas de cordillera con un razonable porcentaje de rocas (hasta un 25 %).

- * La construcción de túneles, con el uso de perforadores hidráulicos (jumbos), ventilación forzada, etc. permite proyectar rendimientos hasta de 200 m/frente/mes si la roca no requiere sostenimiento continuo.

- * La construcción de canaletas de hormigón para pulpas, con la técnica de moldajes deslizantes o de hormigón premoldeado puede ser extremadamente rápida dependiendo de los frentes de trabajo.

- * La construcción de zanjas, desfile de tuberías, doblado de tuberías, presentación, soldadura, bajada y pruebas hidrostáticas pueden realizarse a ritmos entre 6 a 8 Km./mes/frente, con el apoyo de maquinaria adecuada como retroexcavadoras, tiende-tubos, dobladoras, etc.

Como ejemplo de una planificación acelerada de obras en un sistema de transporte hidráulico, en la Figura no 3.1 se simula una planificación para una faena minera de transportar mediante bombeo, un flujo de 40,000 ton/día de

concentrados de fierro a una distancia de 300 Km, incluyendo la construcción de 4 túneles de 2 Km de largo entre ambos, 1 Km. en puentes y 295 Km. de plataformas, 50,000 toneladas de tuberías, 2 estaciones de bombeo de 16,000 IIP y 4 estaciones de disipación de energía, con una inversión total de 100 millones de dólares.

CAPITULO IV

4.0 TECNOLOGÍA DE EQUIPOS Y MATERIALES

4.1 SELECCIÓN DE TUBERIAS

Gran parte de las líneas de flujo de pulpas pueden operar en forma gravitacional, el equipo principal de la línea es la tubería misma, por tanto, es de suma importancia que su selección, diseño y montaje permitan un funcionamiento adecuado y una vida útil razonable. Las tuberías de uso más corriente son:

a) Acero Comercial

Es la tubería más usada por su versatilidad y facilidad de construcción. El inconveniente de usar estas líneas radica en que su ritmo de desgaste es relativamente alto frente a otras alternativas y adicionalmente presenta problemas de corrosión interno y externo.

b) Aceros Especiales

Existe la posibilidad de diseñar las líneas con tuberías de acero de bajo contenido de carbón y/o aleaciones de manganeso y/o níquel. Por ejemplo, tuberías Transol, cuyas características son:

Carbón	0.30 a 0.35%
Manganeso	1.05 a 1.35%

Fósforo máx.	0.02%
Azufre máx.	0.02%
Silicona máx.	0.10%
Cobre	0.15 a 0.25%
Níquel	0.25 a 0.35%

Características físicas:

Presión de trabajo	3,600 psi
Dureza	180 (Brinell)

Estas características le otorgan a la tubería alta resistividad a la presión abrasión y corrosión. Sin embargo, estas tuberías son algo más caras que las tuberías corrientes y hay que comprarlas a pedido.

c) Plásticas

Es una de las alternativas que mayor éxito ha tenido hoy en día, puede ser de PVC, polipropileno o polietileno, siendo las últimas las más usadas en sus tipos de alta densidad. Estas tuberías son livianas y fáciles de instalar. La ventaja mayor radica en su resistencia a la corrosión y, en la mayoría de los casos su resistencia a la abrasión. Sus desventajas son: no pueden operar con presiones altas, sobre 100 - 200 psi, pueden ser inflamables o rotas por equipo pesado, son más caras que las líneas de acero en su adquisición, se desgastan fuertemente por el fondo. Más adelante mostraremos tablas de selección de tuberías plásticas en su tipo de alta densidad (HDP).

d) Asbesto - Cemento

Esta alternativa sólo es aplicable a pulpas de granulometría fina y baja velocidad. Tiene una aplicación importante en líneas gravitacionales y son baratas y fáciles de instalar. En Chile por ejemplo se construyó la mayor parte de sus líneas de relave con este material.

e) Acero Revestido en Goma

Es una alternativa cara, Sin embargo, ha resultado muy exitosa en diseños de alta velocidad de flujo, cambios de dirección y sólidos abrasivos. Tiene el inconveniente del envejecimiento de la goma.

f) Acero Revestido en Poliuretano

Es más caro que la alternativa de acero revestido en goma pero da mejores resultados.

4.2 SELECCIÓN DE VÁLVULAS

Dadas las características abrasivas de la pulpa no es conveniente instalar en estas líneas, Válvulas de agua, de mariposa o de compuerta por su fuerte deterioro.

La selección de la válvula a usar debe realizarse considerando si ella va actuar como válvula de estrangulamiento o como válvula de corte.

a) Válvula Pinch

Las válvulas de estrangulamiento, llamadas generalmente "tipo pinch", consisten en una manga de goma flexible que se reduce su área de flujo mediante la acción de pinzas o mediante aire comprimido (Figura N° 4.1).

Estas válvulas pueden ser usadas con éxito siempre que tengan una coraza metálica exterior para absorber las sobre presiones y que no entre en resonancia.

b) Válvula Compuerta

Las Válvulas de corte son generalmente de compuerta (Figura N° 4.2) con diseño especial antiabrasivo y tolerancias tales que impiden las fugas.

c) Válvulas de Bolas

Estas válvulas son especialmente aplicables en el caso de fluidos viscosos o con sólidos en suspensión, donde se produce deposición de residuos que dificulten la operación normal de una válvula corriente (Figura N° 4.3)

d) Válvulas en T

Una válvula especial sería la llamada válvula Tech-Taylor o válvula en T. (Figura N° 4.4).

Todo diseño de instalaciones de flujo de pulpa con válvulas debe contemplar la forma de prevenir o solucionar los embanques que provoca el cierre de la válvula. Es posible por ejemplo, tener una red de alta presión de agua para desatascar válvulas obstruidas.

En escurrimientos en acueducto por tuberías se emplean válvulas de compuerta (de corte), abiertas o cerradas, para evitar cambiar el régimen de escurrimiento. En caso de secciones rectangulares, deben emplearse compuertas cuyo diseño es similar al empleado en hidráulica tradicional con agua.

4.3 SELECCIÓN DE ANILLOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y DISCOS DE RUPTURA.

Cuando un sistema de flujos de pulpas dispone de energía potencial en exceso para el transporte, o lo que lo mismo, le sobra altura de carga; debe procederse a diseñar sistemas que permitan disipar energía para que el flujo no aumente excesivamente su velocidad.

Un sistema muy usado es el de "Anillos de Cerámica".

Estos anillos (Figura N° 4.5), se introducen en el interior de la línea provocando estrechamientos y ensanches bruscos en el flujo. Los torbellinos aguas abajo del anillo provocan una disipación fuerte de energía.

En general, pueden diseñarse orificios que disipen hasta 50 m de pulpa. Con la tecnología de montaje adecuada. Existen dos métodos de cálculo para estos anillos que son:

$$H = K \times Q^2 / d_1^4$$

Donde:

H = Pérdida de presión en (mcp)

Q = Flujo volumétrico de pulpa en (m³/seg)

d₁= Diámetro interior del orificio en (m)

K = Constante a determinar por medio de pruebas (varia entre 0.06 a 0.08).

Disposición de los anillos

Anillos Fijos.- Los anillos ubicados en forma permanente en la línea, originan una pérdida de carga que no puede ser regulada y depende exclusivamente del caudal de pulpa ($H = kQ^2$, con k cte. propia de anillo).

Anillos Variables.- La disposición es la que se indica en la Figura N° 4.6.

La ventaja de este sistema, es su posibilidad de optar entre, pérdida de carga equivalente a la suma de las pérdidas de ambos anillos del loop al operar con la válvula de control cerrada o pérdidas de carga casi nula con la válvula abierta.

De esta forma, para un mismo caudal, se puede aumentar la pérdida de carga total, conforme se cierran las válvulas de un sistema de anillos variables dispuestos en serie.

43.1 Control de Caudal con Anillos Disipadores

Para controlar el caudal, compatibilizándolo con la pérdida de carga total deseada, generalmente se diseñan "estaciones disipadoras", en las cuales se combinan sistemas de anillos variables, con anillos fijos.

De esta manera, para regular la estación a un cierto caudal y a una determinada pérdida de carga, existirá una configuración en la posición de las válvulas de los anillos variables que logrará el objetivo deseado.

Los anillos fijos se dimensionan para disipar la energía excedente asociada al caudal máximo de diseño.

Los anillos variables se dimensionan para disipar en conjunto con los anillos fijos la energía excedente asociada al caudal mínimo de diseño. Cada par de anillos variables son controlados por una válvula.

43.2 Cavitación en Anillos Disipadores

El gran aumento de velocidad, producto de la disminución de la sección en el anillo, provoca una fuerte disminución de presión, con el consiguiente peligro de cavitación.

Por esta razón, todo el sistema de transporte de pulpa, en las estaciones disipadoras, se recubre interiormente con goma o poliuretano.

43.3 Discos de Ruptura

Los discos de ruptura son dispositivos de uso frecuente en transporte de pulpas, consisten esencialmente en una membrana que se ubica cerrando un arranque de las tuberías. Esta membrana que normalmente es de metal, está diseñada para resistir hasta una cierta presión que es menor que la presión que causaría daño a la línea.

Por sobre esta presión la membrana se rompe y el flujo podría quedar en contacto con la presión atmosférica (drenaje) por lo que disminuye su presión y la transiente es amortiguada rápidamente (Figura N° 4.7).

4.4 SELECCIÓN DE BOMBAS DE PULPA

A menudo, las condiciones topográficas de un sistema de flujo de pulpas obligan a construir estaciones de bombeo para elevar las pulpas o vencer las pérdidas de carga. en este caso, las bombas utilizadas son de características distintas que las bombas de agua pura, debido a la alta densidad, viscosidad y abrasividad del fluido a transportar. Los tipos de bombas más usuales son:

Bombas Centrífugas: En que la rotación de la máquina produce un gran aumento de velocidad en el fluido, o sea, energía cinética, la que se convierte en presión a la salida de la máquina.

Bombas de Desplazamiento Positivo: En que el flujo recibe un aumento de presión en forma directa por el desplazamiento de un émbolo u otro dispositivo similar.

Bombas Espaciales: Corresponde a algunas variaciones de los tipos anteriores.

a) Bombas Centrífugas

Las bombas centrífugas de pulpa corresponden a una adaptación de la bomba de agua corriente, con modificaciones para resistir la erosión, la carga extra por el

peso de la pulpa y los problemas mecánicos de sellos. Las bombas centrífugas son más utilizadas, sobre todo para distancias cortas y circuitos de planta.

Los diseños de este tipo están limitados a una altura de impulsión menor de 60 m y la presión de varias bombas en serie no debe exceder una presión final de 600 psi.

Por otro lado, para evitar la destrucción prematura, los impulsores y carcazas deben estar revestidos interiormente mediante fundas de goma sintéticas, poliuretano o ser construidas de aleaciones niqueladas o acero al manganeso.

Para la selección de la bomba debe considerarse el efecto de la pérdida de eficiencia de la bomba debido a los sólidos. en todo caso, debe contemplarse la posibilidad de aumentar o disminuir las revoluciones.

Los catálogos de bombas presentar las curvas de funcionamiento para agua pura. Estas curvas deben ser corregidas para las características de la pulpa a impulsar.

Como criterio general de diseño se plantea primeramente la definición de la tubería a utilizar.

no es recomendable que la velocidad de flujo en su interior sea mayor que 3.0 m/seg, ni puede ser menor que la velocidad límite. En el caso de instalaciones importantes se debe determinar el diámetro óptimo por análisis económico de inversión versus costo de operación.

Determinada la tubería se define la curva de demanda del sistema, es decir la altura de impulsión (H) versus el caudal a impulsar (Q).

Se debe considerar la corrección para altura de impulsión en pulpa, lo que ya fue explicado en capítulos anteriores.

Cálculo Sistema de Bombeo

Se debe elegir aquella bomba en la cual el punto de funcionamiento del sistema se encuentra sobre una de las curvas de oferta de catálogos y este sea un punto de buena eficiencia. generalmente el caudal de operación debe estar comprendido entre $1/2$ y $2/3$ del caudal máximo que puede impulsar la bomba.

Se determina el punto de funcionamiento, como la interacción entre la curva de oferta y demanda del sistema (Figura N° 4.8).

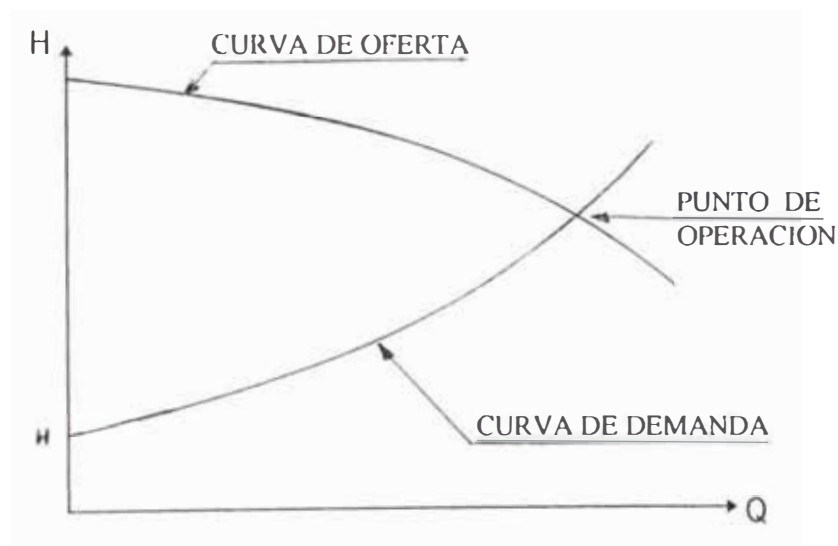


FIGURA N° 4.8

De catálogo se determina la eficiencia de la bomba en el punto de operación (n) y las revoluciones a la que debe operar (R.P.M.).

Si la altura de impulsión requerida (H) es muy grande y no se puede utilizar una sola bomba, se requerirá colocar las bombas en serie (Figura N° 4.9).

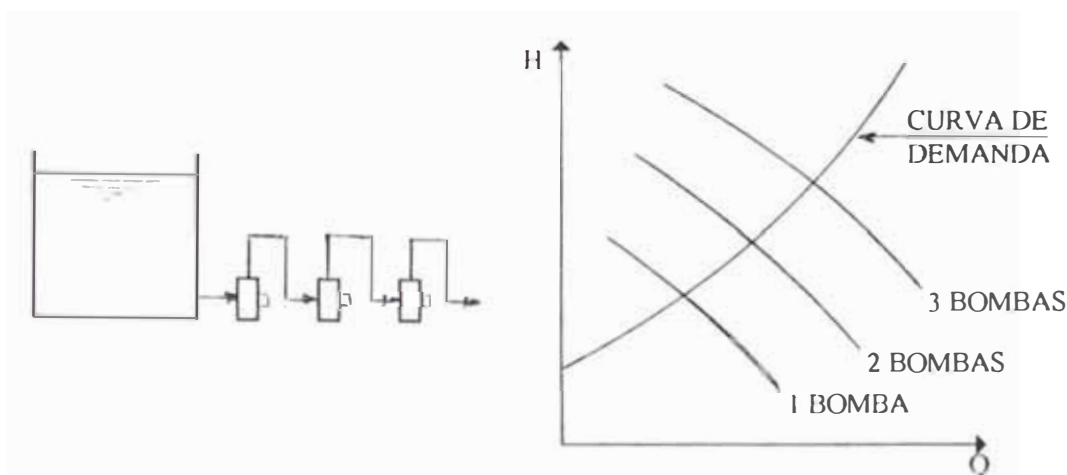


FIGURA N° 4.9

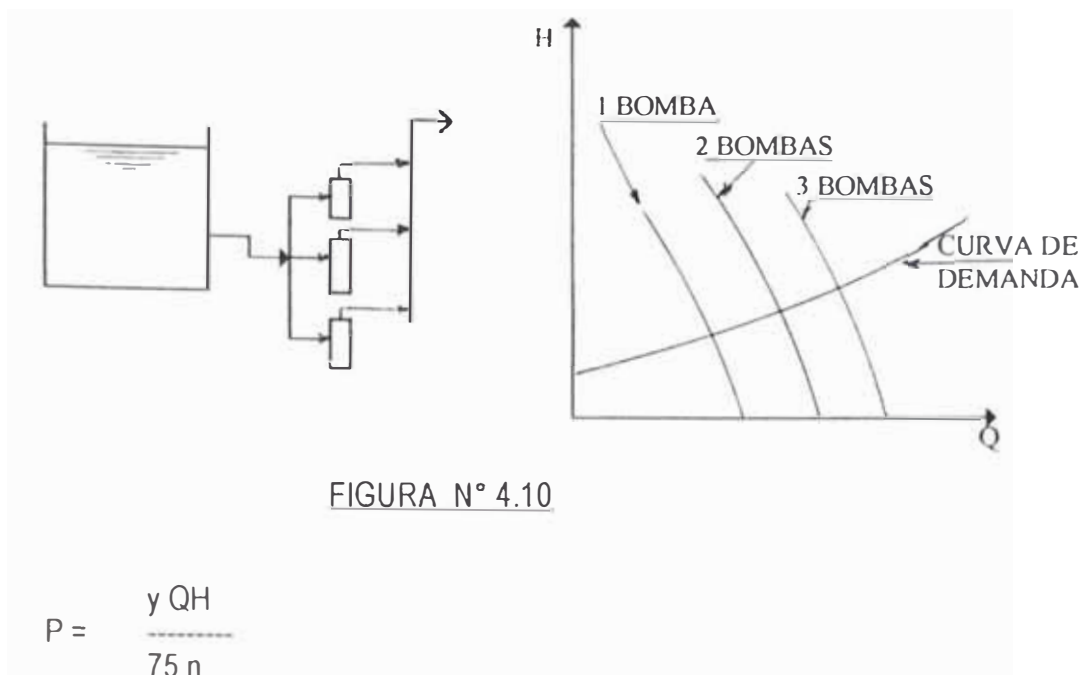
El número de bombas en serie requerido, estará dado por:

$$n = \frac{H \text{ requerida}}{H \text{ catálogo}}$$

Si el caudal es muy grande y no se puede utilizar una sola bomba, se deberá colocar bombas en paralelo (Figura N° 4.10).

$$n = \frac{Q \text{ (a bombear)}}{Q \text{ (catálogo)}}$$

La potencia requerida por un sistema de bombeo (1 o varias bombas) estará dado por:



Donde:

γ : En Kgf/m³

Q : en m³/seg

H : en m.

Cabe hacer notar que los datos de catálogo de las bombas no deben ser usados en forma rigurosa para predecir en forma más segura la operación real. Se recomienda multiplicar la altura de impulsión y la eficiencia de catálogo por un factor de corrección comprendido entre 0.90 y 0.95.

b) Bombas volumétricas o de desplazamiento positivo

Estas bombas, denominadas también bombas de pistón, se utilizan para impulsión de pulpas a grandes distancias o con fuertes diferencias de nivel. Es posible alcanzar con ellas presiones de hasta 3,000 psi.

Otras de características de estas bombas es la alta eficiencia en el bombeo (del orden del 90%) y la posibilidad de tomar carga por encima de las condiciones de trabajo, esto último le permite reiniciar la operación de una tubería después de una detención no programada.

El diseño de las bombas permite no tener demasiados problemas de abrasión en el interior de la bomba y en la zona más difícil, como son las válvulas de entrada y salida, la velocidad de flujo esta limitada a 4 m/s según las normas de los fabricantes.

Los inconvenientes que presentan estas bombas son sus altos costos de instalación y mantención, que a veces lo hacen poco atractivas frente a bombas centrífugas en serie.

Clasificación de	Bombas según tamaño de (S = 2.65)	partículas
Tamaño partículas	Tipo de Bomba	Material
Malla 3/8" (10 mm)	* Bomba dragadora * Bomba de arena y grava Impeler cerrado	Acero, manganeso Fierro duro revestido en goma
Malla 8 (2.5 mm)	* Bombas arena Impeler cerrado	Revestido en goma
Malla 16 (1.0 mm)	*Bombas de pulpa Impeler abierto, bomba de desplazamiento positivo	Revestido en goma

El control de velocidad de las bombas, es bastante más importante en las bombas de pulpa que en las bombas de agua clara, debido a las variaciones que se producen en la fase sólida. Es necesario entonces, variar la velocidad del sistema para permitir una flexibilidad de operación, ante eventuales cambios en le flujo de la pulpa.

4.5 AGITADORES DE PULPA

La agitación de los líquidos, es uno de los procesos industriales más frecuentes. Es así como en el flujo de pulpas, se pueden encontrar agitadores para mantener algún grado de homogeneidad.

En el flujo de pulpas existen zonas de muy baja velocidad y tiempos de residencia adecuados para la sedimentación de las partículas. Es en estas zonas, se hace necesario la presencia de agitadores que mantengan la pulpa como tal.

Los agitadores (Figura N° 4.11), consisten en un eje, el cual termina en un impulsor en forma de hélice, que es el mecanismo que le entrega la energía necesaria a la pulpa para mantener sus partículas en suspensión.

Para el diseño de un agitador es necesario definir un objetivo en cuanto al grado de agitación deseado.

45.1 Escala de Agitación

Grado 1 - 2

Se caracteriza por la mínima suspensión de los sólidos necesaria para que el proceso resulte.

Existe algún movimiento de todas las partículas, teniendo las del fondo del estanque, sólo un movimiento periódico de suspensión.

Grado 3 - 5

Se caracteriza por la suspensión total de todas las partículas del estanque.

Se logra homogeneidad de la pulpa, en por lo menos $1/3$ de la altura del fluido.

La pulpa se encuentra en un estado adecuado para su extracción por una boquilla en la parte baja del estanque.

Grado 6 - 8

Se caracteriza por una suspensión muy próxima a la homogeneidad (95 % de la altura del fluido).

Se tiene un estado adecuado para una boquilla ubicada a un 80% de la altura del fluido.

Grado 9 - 10

Se logra prácticamente el máximo posible de la homogeneidad en la suspensión (98% de la altura del fluido).

La pulpa puede ser extraída por rebose.

45.2 Dimensionamiento del Agitador

El dimensionamiento depende, además del grado de agitación deseado, del volumen y dimensiones del estanque, de la velocidad de sedimentación de las partículas (que a su vez depende de la concentración de la pulpa) y de la densidad de pulpa. Los parámetros más importantes a determinar en el diseño de un agitador son:

La potencia del motor (P)

Las revoluciones por minuto del impulsor (N)

El diámetro del impulsor (D)

Muchos métodos de diseño arrojan resultados bastante diferentes, por eso, se recomienda pedir al fabricante que sugiera las dimensiones, sobre la base de su experiencia.

4.6 SELECCIÓN DE INSTRUMENTOS EN LÍNEA Y CONTROLADORES

La instrumentación y control de las líneas de transporte de pulpas se encuentra fundamentalmente compuesta por instrumentos medidores de caudal, densidad y presión para el caso de tuberías a flujo lleno y de medidores de nivel para el caso de canaletas.

Entre los primeros se encuentran con frecuencia instrumentos como flujómetros, densímetros y presostatos, en tanto que para canaletas se usa los sensores de nivel.

CAPITULO V

5.0 EVALUACION ECONOMICA

5.1 INTRODUCCION

Los sistemas de transporte de pulpa a largas distancias pueden ser valorizadas con un alto grado de certeza, lo que hace favorable la gestión de los fondos para los proyectos que incluyen esta tecnología.

En el presente capítulo describiremos los costos unitarios referenciales para la construcción de obras, la valorización global de inversiones, la preparación de flujos de caja, la valorización de los costos de operación y el cálculo del costo total del transporte.

Cabe destacar que las conclusiones que en el presente capítulo se arriben, son meramente estimativas en base a un proyecto modelo. Pero sin embargo creemos que sirviera como guía para evaluar un proyecto cualquiera relacionado con esta tecnología.

5.2. COSTOS UNITARIOS DE INVERSION

A continuación presentamos, un resumen de los costos unitarios de las partidas más relevantes y de uso frecuente, en la valorización de inversiones en sistemas de transporte de pulpas.

a) COSTOS DE TUBERIAS

En general, el precio unitario de las tuberías necesario para la aplicación de esta tecnología se maneja en dólares por kilogramo o tonelada, y, necesariamente hay que impórtalos de los países desarrollados. Asimismo, dicho precio varia de acuerdo a la clase de material de la tubería (grado, norma, etc)

El rango de precios FOB de adquisición de tuberías de acero y HDP es.

Tubería acero ASTM-A53 G-B	φ 18"	0.5-0.7 \$/Kg.
Tubería acero API 5L-X65	φ 18"	0.7-0.9 \$/Kg.
Tubería HDP	φ 18"	2.5-3.0 \$/Kg.

Los costo de flete y seguros hasta el puerto de Callao están en el orden de 100 \$/TM

En relación al montaje de tuberías el costo directo de instalación, incluyendo el carguio, transporte, doblado soldadura, oscila entre los siguientes valores.

Tubería de acero	0.90 - 1.20 US \$/Kg.
Tubería de HDP	0.50 - 0.70 US \$/Kg.

Calculo del costo unitario suministro + instalación

Tubería de _ 18" ASTM-A53 grado B standard

Peso específico = 139 Kg./Mt.

DESCRIPCION	COSTO \$/Kg.	COSTOS \$/Mt.
Costo FOB tubería	0.600	83.40
Flete + Seguro (Callao) (10%)	0.060	8.34
Costo CIF tubería	0.660	91.74
Advaloren (10%)	0.099	13.76
IGV. (18%)	0.119	16.54
Otros (Almacenaje, descarga, Gastos Operativos) (2%)	0.013	1.83
Costo Almacén (Callao)	0.891	123.85
Flete hasta la obra	0.050	6.95
Costo de tubería en obra	0.941	130.80
Costo directo de instalación	1.000	139.00
Costo indirecto de instalación 3%	0.030	4.17
COSTO TOTAL SUMIN. + INST.	1.971	273.97

b) COSTO DE OBRAS CIVILES

En general el costo unitario de obras civiles involucra el costo de los equipos, materiales y mano de obra que el contratista puede usar en la etapa de construcción.

Los valores del costo directo para contratistas de reconocida trayectoria en nuestro medio varían según el rango que se muestra en el siguiente cuadro.

DESCRIPCION LABOR	UNIDAD	COSTO US\$
Excavación abierta en terreno común	US\$/m ³	1.50 - 2.0
Excavación abierta en roca	US\$/m ³	7.0 - 9.0
Excavación zanja terreno común	US\$/m ³	3.0 - 5.0
Excavación zanja en roca	US\$/m ³	14.0 -16.0
Rellenos y terraplenes	US\$/m ³	3.0 - 4.0
Rellenos estructurales	US\$/m ³	7.0 - 9.0
Hormigón H5 (sin acero de moldaje)	US\$/m ³	50.0 - 60.0
Hormigón H20 (sin acero de moldaje)	US\$/m ³	60.0 -90.0
Hormigón H30 (sin acero de moldaje)	US\$/m ³	80.0 - 100.0
Acero de refuerzo para hormigón	US\$/Kg.	1.0-1.50
Túneles sección 8' x 9'	US\$/Mt	500.0 - 800.0

En general para estas obras se debe de considerar un costo indirecto de 25% a 30% . Una exepción lo puede constituir las obras de túneles que podrían tener un indirecto de 45% a 50% según la longitud del tunel a escalar.

A manera de ilustración mencionaremos, la construcción de una plataforma para conducción de pulpas en las cordilleras de Chile varian entre 50 y 250 US\$/Mt.

c) **COSTO DE CANALETA**

El costo de la canaleta de hormigón variará dependiendo de la pendiente de ésta, pues hará necesario un hormigón más resistente a la abrasión o a utilizar algún tipo de revestimiento o mampostería de piedra.

Se podría estimar que el costo unitario del revestimiento de piedra a utilizar en una canaleta de transporte de relaves, oscila entre 45 - 55 US\$/m². Sin embargo el costo unitario de la canaleta revestida con mampostería de piedra fluctúa entre 200 - 300 US\$/Mt para una sección inferior de (0.80 m x 1.0 m)

d) **COSTO DEL SISTEMA DE BOMBEO**

En relación al sistema de bombeo asociado al transporte de pulpas, se debe considerar la estimación de inversión de bombas centrífugas y de desplazamiento positivo.

Una manera de estimar en forma sencilla el costo de bombeo, sería determinando un costo unitario por HP de la bomba. Este costo debe incluir el suministro, flete y seguros, desaduanaje, flete hasta la obra y instalación.

Bombas Centrífugas 250 - 300 \$/HP

Bombas de desplazamiento positivo 500 - 700 \$/HP

e) COSTO DE ELEMENTOS PIPING

En lo que concierne al costo unitario de estos elementos, generalmente se consideran los costos unitarios que involucre todos los piping y cañerías menores y cuyo precio por lo general se establece por Kg.

A continuación mostramos un cuadro del costo directo unitario estimado de los elementos piping más relevantes. Cabe aclarar que dichos costos incluyen la instalación.

DESCRIPCION LABOR	UNIDAD	COSTO US\$
Fittings y cañerías menores	US\$/Kg.	2.0 - 2.5
Anillos cerámicos Φ 18"	US\$/Kg.	1.5 - 2.0
Anillos cerámicos Φ 20"	US\$/Kg.	2.2 - 2.8
Anillos cerámicos Φ 24"	US\$/Kg.	3.0 - 3.7
Válvula de bola Φ 18" CL 150	US\$/Unid	4,000 - 5,000
Válvula de bola Φ 18" CL 300	US\$/Unid	5,500 - 65,000
Válvula de bola Φ 18" CL 600	US\$/Unid	7,500 - 8,500
Válvula de bola Φ 18" CL 900	US\$/Unid	10,500 -11,000
Válvula de bola Φ 24" CL 150	US\$/Unid	11,500 -12,500
Válvula de bola Φ 24" CL 300	US\$/Unid	15,000- 16,000
Válvula de bola Φ 24" CL 600	US\$/Unid	16,000 -17,000
Válvula de bola Φ 24" CL 900	US\$/Unid	17,000 -18,000
Revestimiento poliuretano	US\$/m2	80.0 - 120.0
Discos de ruptura	US\$/Unid	4,000 - 6,000

Como ejemplo, en un mineroducto importante el piping de cada estación disipadora, incluyendo válvulas, piezas especiales, anillos, discos de ruptura, etc. Costó entre 1.0 a 2.0 millones de dólares.

5.3 VALORIZACION TOTAL DE INVERSIONES

En relación a aspectos económicos asociados a los sistemas de transporte de pulpa, se puede señalar en base a las experiencias de nuestro vecino del sur (Chile) que los costos de inversión tienden a comportarse en forma parecida, sea el flujo gravitacional o mediante bombeo, según una relación directa al ritmo de producción y longitud de transporte

En la Figura N° 5.1 se ha graficado el valor del parámetro US \$ (Ton/día x Km), en función de la producción nominal de sólidos a conducir, para 10 casos industriales de información en algunos pública y en otros reservada.

Ahora bien, de los valores graficados nos permitimos definir la siguiente fórmula de predicción simple, y que considera una dispersión de + 50%.

$$I(\text{US \$}) = 190 \times \text{Km} \times \text{Ton/día}(\text{Ton/día}/100)^{-0.35}$$

Cabe indicar que esta relación es solo aproximada y su objetivo es meramente estimativa del orden de magnitud de la inversión.

5.4 FLUJOS DE CAJA

Para realizar un flujo de inversiones es necesario considerar por lo menos los siguientes criterios de evaluación económica.

- * Separar las inversiones en moneda extranjera y moneda nacional a fin de establecer aquellos equipos que tienen que pagar por ejemplo el advaloren aduanero
- * Fijar un año base de actualización, el cual normalmente se le denomina año 0
- * Establecer una tasa de descuento, la cual permita actualizar las inversiones que se realicen diferidas en el tiempo. En nuestro país se usa normalmente un 12%.
- * Incorporar una estimación de inversiones relativas a la ingeniería, inspección, gestión de adquisición y puesta en marcha. Habitualmente se considera del orden de un 10% del costo total de las obras.
- * Estimar un costo de contingencias para dar igual probabilidad a gastar más o menos de lo presupuestado, dando holgura para cambios imprevistos durante la ejecución del proyecto

A continuación en la Cuadro N° 5.1 se presenta un flujo de inversiones de un proyecto ejemplo.

5.5 VALORIZACION DEL COSTO DE OPERACION

Los costos de operación asociados a un sistema de transporte de pulpa, son muy variables dependiendo de su ubicación geográfica (limpieza de acceso, mano de obra, etc) y la tecnología empleada (anillos de disipación, energía, bombeo, agitación, reposición de tubería y válvulas, etc.).

En algunos casos el costo de agua requerida para el transporte puede llegar a ser muy significativo frente al resto de los costos de operación.

En general, se puede indicar que el costo de operación total oscila entre 0.10 y 1 50 US \$/Ton por cada 100 Km de longitud de transporte.

Dentro de los criterios generales a considerar en la valorización de los costos de operación, encontramos los siguientes ítems: mano de obra, insumos, energía, agua, mantenimiento de equipos, reposición de tuberías, válvulas, costo financiero, otros.

Mano de obra

Al valorizar la mano de obra involucrada en la operación, debe tenerse presente la cantidad, dada por la dotación de personal por categoría, y por otro lado, el costo por categoría. El departamento de Ingeniería debe proponer el organigrama de dotación de personal.

PROYECTO EJEMPLO

FLUJO DE INVERSIONES

DESCRIPCION	UNID.	CANT.	PRECIO UNIT. US \$	AÑO 1 K US \$	AÑO 2 K US \$	AÑO 3 K US \$	AÑO 4 K US \$	TOTAL K US \$	
SUMINISTROS									
Tubería de acero 18"	Kg	27,800,000	1.971	13,698	13,698	13,698	13,698	54,794	
Bombas de 250 HP c/u	HP	500	700				350	350	
Agitadores de 200 HP	HP	200	500				100	100	
Elementos Piping (3 est.desip.)	Gbl	3	2,000,000	1,500	1,500	1,500	1,500	6,000	
Otros	Gbl	1	500,000				500	500	
OBRAS CIVILES									
Plataforma para conducción	Mt	191,000	250	15,917	15,917	15,917		47,750	
Tuneles	Mt	9,000	1,000	3,000	3,000	3,000		9,000	
TOTAL SUMINISTROS Y OBRAS >>>>>									
INGENIERIA/INSPECCION				10.0%	34,115	34,115	16,148	118,494	
					3,412	3,412	1,615	11,849	
SUB - TOTAL					37,527	37,527	17,763	130,343	
CONTINGENCIAS				15.0%	5,629	5,629	2,664	19,551	
TOTAL CON CONTINGENCIAS					43,156	43,156	20,428	149,895	
TOTAL ACTUALIZADO				12%	43,156	38,532	34,403	14,540	130,631

TASA DE ACTUALIZACION 12%

TABLA # 5.1

Insumos

Al momento de valorizar este ítem, se debe conocer los consumos por periodo y cuál es su costo en almacén en obra. En especial debe analizarse el costo de anillos, piezas especiales, revestimientos, reactivos, etc..

*** Energía**

De igual modo, se debe conocer el consumo de los equipos y su factor de potencia, y por otro lado, el precio unitario, que en este caso se trata de precio de **KWH**. Debe prepararse tablas de cálculo que permitan estimar con una precisión de $\pm 10\%$ el monto anual de **KWH** a consumir.

*** Agua**

Al igual que los ítems anteriores, debe considerarse el costo y la cantidad de agua utilizada. El costo puede ser variable dependiendo de las restricciones del consumo.

*** Mantenimiento de los equipos**

Para valorizar este ítem, se considera un valor equivalente entre el 20-50 % de la energía eléctrica consumida por los equipos, lógicamente dependerá de la abrasividad del mineral a tratar o transportar. Además es importante tener un programa definido de mantenimiento, los costos de repuestos, de mano de obra y de equipos y materiales asociados.

* **Costo financiero**

La valorización del costo financiero se determina a través del concepto de costo de oportunidad del capital, en nuestro medio puede estimarse en 15%. Dependiendo si el capital proviene de recursos propios, de la banca nacional o de la banca extranjera.

* **Otros costos**

Se debe valorizar los costos de operación relacionados con el mantenimiento de los túneles, canaletas y caminos de alta cordillera. Para el primer y segundo caso se considera de 1 a 2% de la inversión directa anual; mientras que para el caso de los caminos se define entre 300 y 400 US \$/Km/Año para mantenimiento, 1,000 a 2,000 US \$/Km/Año para reparación y entre 5,000 y 8,000 US \$/Km/Año para limpieza de nieve.

5.6 COSTO TOTAL UNITARIO EN TRANSPORTE DE SÓLIDOS

El costo total unitario en transporte hidráulico de sólidos está dado principalmente por el monto de amortización asociado a los equipos y obras principales más el costo de operación efectivo o real.

La amortización de los equipos y obras se establecen en base a la vida útil de éstos.

En la siguiente tabla presentamos un resumen de las vidas útiles de equipos y obras de un sistema de transporte típico.

ITEM	ANOS
Plataformas y Túneles	50
Canaletas de Hormigón	20
Sistemas de Bombeo	15
Elementos de Piping	15
Tuberías	10 - 15
Instalaciones Eléctricas	15 - 20
Instrumentación	5 - 10

5.7 PROYECTO EJEMPLO

Existen más de 70 localidades con mineral de hierro de diversa magnitud, 13 de las cuales son potencialmente grandes y de importancia económica.

Marcona-Nazca, Acari-Caraveli, Cerro Morito-Tacna, Rondoni-Ambo, Chacña-Aymaraes, Pampachiri-Andahuaylas, Huarquisa-Aymaraes, Capacmarca-Chumbivilcas, Livitaca-Chumbivilcas, pomaconchi-Acomayo.

Dentro del grupo descrito solo Marcona se encuentra en operación y Acari que ya se encuentra prácticamente agotado.

Las mayores reservas de hierro en el Perú se encontrarían en la zona de Apurímac con un tonelaje de 980 millones y en el cuadrángulo férrico Capacmarca, Santo Tomas y Livitaca en el Cusco con una reserva probable de 2,474 millones de toneladas con leyes que varían de 60% a 70%.

DEPARTAMENTO DE APURIMAC

DEPOSITO	RESERVAS MTM	LEY
Huancabamba	580	62 % a 67 %
Chacña	400	61 % a 67 %

DEPARTAMENTO DE CUSCO

DEPOSITO	RESERVAS MTM	LEY
Capacmarca	500	66 % a 73 %
Colquemarca	600	66 % a 73 %
Livítica	1,043	60 % a 72 %

MTM : Millones de toneladas métricas.

En base a las consideraciones anteriores nos proponemos simular la explotación de cualquiera de los depósitos anteriormente descritos, a un ritmo de 50,000 TMD o 18 millones de toneladas al año; para lo cual se ha diseñado un sistema de transporte de pulpa con una inversión de 104.825 millones de dólares.

La vida útil media de todas las instalaciones es del orden de 25 años y el costo de operación proyectado del minero ducto será de 0.10 \$/TM.

El cálculo del costo total sería:

$$\text{Amortización : } \frac{104.825}{18 \times 25} = 0.23 \text{ \$/TM} \quad \checkmark$$

Costo de operación = 0.10 \$/TM

COSTO TOTAL TRANSPORTE = 0.33 \$/TM

En el presente análisis se está considerando la actualización de las inversiones, inversiones diferidas, costos financieros, etc.

CAPITULO VI

6.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

FORTALEZAS

- La industria minera para hacer frente a la aguda competencia internacional de los últimos tiempos, tiene que buscar la reducción de sus costos en las distintas operaciones como son: Explotación, procesamiento y transporte; siendo el transporte hidráulico de sólidos por tuberías una alternativa.
- Este sistema nos brinda mejor flexibilidad en la ubicación de las plantas de tratamiento de minerales, las mismas tradicionalmente subordinada a la ubicación del depósito mineral, pues minerales y concentrados pueden ser conducidos sin dificultad por tuberías a grandes distancias.
- Con este sistema nos permite pensar en ubicar las plantas de beneficio en zonas de infraestructura más adecuada a las necesidades de agua, energía, mano de obra; es decir podrían ubicarse junto a la fundición o al muelle de embarque.
- Esta tecnología permite embalsar los residuos sólidos en lugares seguros y de operación barata, asimismo se logra reducir el impacto sobre el medio ambiente

- El transporte hidráulico de sólidos por tuberías tiene un pequeño daño ecológico.
- La utilización de la mano obra y energía en el transporte por tuberías es mucho más baja en comparación con otros tipos de transporte.
- El sistema permite el trazado de una vía más corta entre dos puntos de transporte, pudiendo ser instalado en contrapendientes, además de minimizar la influencia de los factores climáticos adversos.
- La contaminación ambiental producida por los sistemas de transporte por la emisión de elementos nocivos a la vida es intensa, sin embargo; en el sistema de transporte por tuberías es nula.
- El tamaño de las partículas así como la distribución granulométrica tiene una fuerte influencia en el comportamiento hidráulico de las mezclas; pero un porcentaje adecuado de partículas finas disminuye la tendencia a una mayor sedimentación.
- En el transporte hidráulico en tuberías el material sólido debe mezclarse muy bien con el agua hasta forma una buena mezcla, esta luego requiere agitación natural o artificial para mantener las partículas en suspensión.
- Limpieza en el transporte y simplicidad de operación

- Finalmente la tecnología de transporte de pulpas a largas distancias, por cualquiera de las vías posibles (bombeo, canaleta, tuberías, etc.); es de un nivel de desarrollo fácil alcanzar ya sea para diseñar, operar o innovar

DEBILIDADES

- Dificultad de transportar un material diferente para el que fue diseñada la instalación
- Desgaste del equipo debido a la naturaleza abrasiva y corrosiva de los materiales a transportar.
- Necesidad de agua.

6.2 RECOMENDACIONES

- El sólido a transportar no debe reaccionar ni con el fluido ni con la tubería o canaleta, ya que se presentarían inconvenientes en el proceso posterior.
- Las partículas sólidas deben poder mezclarse y separarse fácilmente.
- No debe existir riesgo de interacción química entre las partículas sólidas, de modo que provoquen una aglomeración de ellas y una posterior obstrucción de la tubería.
- El desgaste y ruptura que podrían sufrir o ocasionar las partículas durante el transporte no deben tener efectos adversos para el proceso posterior del sólido.

- La velocidad de operación debe ser en todo instante mayor que de la sedimentación.
- Que el diámetro de la tubería sea igual o mayor al triple de la partícula sólida de mayor tamaño
- Evitar trabajar con partículas extremadamente gruesas.
- Incrementar la concentración de sólidos con partículas finas. Buenos resultados se han obtenido con la adición de arcilla y arena fina.
- Considerar un espesor adicional en los cálculos por efectos de desgaste, tasa (600 μm a 1200 $\mu\text{m}/\text{año}$).
- Emplear tuberías con recubrimiento interior

BIBLIOGRAFIA

- 1.- J. RAYO PRIETO. “Transporte hidraulico de sólidos a grandes distancias”
Abril, 1972.
2. E. ASSUREIRA. “Transporte de sólidos por tuberías” Pontificia Universidad
Católica del Perú
3. CABRERA, V.R. “Slurry Pipeline: Theory, Design and Equipment”. World
Mining, 1979.
4. INGERSOLL-RAND. “Cameron Hydraulic Data”.
5. KOCSANYI, L.: “Hydraulic Transport of Solids”. International Mining, 1986
6. McELVAIN, R.E. . “Selection of Slurry Pumps for Severe Applications”.
Mining Engineering, 1976
7. STREETER, V.L. “Mecánica de los fluidos”. De. Castillo 1963
8. WARREN SPRING LABORATORY: “Transporting Solids by Pipelines”.
TSP
9. DAVID J. and ERROL G. : “Procesamiento de minerales”, 1990.
10. G.R.MOORE. “Selección de sistemas de bombeo de pulpas”
11. HIDROSTAL: “Información Técnica”
12. SEMANARIO MINAS Y PETROLEO: “Información Técnica”