

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA**



**“EVALUACIÓN METALÚRGICA PARA EL DISEÑO
DE ESPESADOR DE RELAVES ESPESADOS EN LA
PLANTA CONCENTRADORA DE LA UNIDAD
MINERA QUIRUVILCA - 2015”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA**

PRESENTADO POR:

Bach. Paolo Junior OSORIO ROJAS

CERRO DE PASCO – PERU

2015

RESUMEN

El tema de producción, manejo, transporte, disposición y caracterización reológica de relaves espesados, es un tema poco tratado en la currícula de nuestra especialidad, pero que resulta de vital importancia al optar por el espesamiento de relaves por encima de los niveles convencionales como solución tecnológica ante problemas tales como: escasa disponibilidad de agua para los procesos metalúrgicos en zonas áridas, de inestabilidad de presas por efectos de licuefacción de relaves, de reducidos volúmenes de almacenamiento disponibles en presas de relaves, y ante problemas ambientales por la generación de agua ácida, entre otros.

Esta investigación se centra en plantear una solución al primer problema mencionado, y pretende aportar una solución a este vacío académico, otorgando así al ingeniero de procesos, pautas en las metodologías disponibles para la caracterización reológica, así como la evaluación metalúrgica de sistemas de espesamiento y transporte de pulpas espesadas.

DEDICATORIA

A MIS PADRES QUE GRACIAS A SU SABIDURÍA INFLUYERON EN MI MADUREZ PARA LOGRAR TODOS LOS OBJETIVOS EN LA VIDA, ES PARA USTEDES ESTA TESIS EN AGRADECIMIENTO POR TODO SU AMOR Y CONFIANZA.

AGRADECIMIENTO

Mediante la presente expreso mis sinceros agradecimientos a:

- A Dios por darme salud y bienestar,
- A mis padres por darme lo mejor de mi vida que es la educación y profesión,
- A los docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Metalúrgica por la orientación y apoyo recibido durante el desarrollo académico de mi persona. En especial al Ingeniero Jonás Ramos Martínez, asesor de la presente investigación quien me brindo toda su confianza y sugerencias para que esto se haga realidad.
- Al personal Staff y a los trabajadores de la Unidad Minera Quiruvilca, por darme la oportunidad de realizar la presente investigación.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE	vi
INTRODUCCIÓN	x
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2.1. Problema general	6
1.2.2. Problemas específicos	6
1.3. OBJETIVOS	
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos específicos	7
1.4. IMPORTANCIA, LIMITACIONES Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.4.1. Importancia	8
1.4.2. Limitaciones	9
1.4.3. Justificación	10

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES	12
2.2. BASES TEÓRICAS	17
2.2.1. Marco contextual	17
2.2.2. Fases de un fluido	18
2.2.3. Clasificación de fluidos	25
2.2.4. Fluidos Newtonianos	27
2.2.5. Fluidos dependientes del tiempo	35
2.2.6. Fluidos Viscoelásticos	39
2.2.7. Resistencia a la fluencia	40
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	41
2.4. HIPÓTESIS	43
2.4.1. Hipótesis General	43
2.4.2. Hipótesis específicos	43
2.5. VARIABLES	
2.5.1. Variable Dependiente	44
2.5.2. Variable Independiente	44
2.5.3. Variables Intervinientes	44

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS RECOLECCIÓN DE DATOS.

3.1. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	45
3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	45

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN	45
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	46
3.4.1. Población	46
3.4.2. Muestra	47
3.5. TALMAGE & FITCH	47
3.6. MÉTODOS DE SOLIDS SETTING FLUX	49
3.7. JERNKVIST	50
3.8. REQUERIMIENTO DE TORQUE	51
3.9. VELOCIDAD DE LA CAJA DE ENGRANAJES	52
3.9.1. Motor eléctrico	52
3.10. DISEÑO DE ESPESADORES POR SIMULACIÓN MATEMÁTICA E INVESTIGACIONES ACTUALES	53
3.11. PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN UNA OPERACIÓN DE ESPESAMIENTO	55
3.12. TRANSPORTE HIDRÁULICO DE SÓLIDOS	55
3.12.1. Velocidad crítica	56
3.12.2. Modelos para predecir la velocidad crítica	58
3.12.3. Velocidad de flujo	60
3.12.4. Velocidad de transición	60
3.12.5. Altura dinámica total	62
3.12.6. Factor de corrección de altura dinámica total	63
3.12.7. Pérdidas por fricción en pulpas espesadas	64
3.12.8. Selección de tuberías espesor mínimo requerido	65
3.13. ESPESOR DE DISEÑO DE TUBERÍA	69

3.14. BOMBEO	69
--------------	----

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. DIRECTRICES DEL DISEÑO	71
4.1.1. Espesamiento	72
4.1.2. Espesadores de última generación	73
4.1.3. Outotec	74
4.1.4. Transmisión	77
4.1.5. Diseño de rastra	79
4.1.6. Alternativas para el montaje de espesadores	80
4.1.7. Reología	81
4.2. DISPONIBILIDAD DE AGUA FRESCA	81
4.3. ANÁLISIS HIDRÁULICO	84
4.4. VELOCIDAD CRÍTICA	85
4.5. VELOCIDAD DE TRANSICIÓN	86
4.6. TASAS DE ABRASIÓN Y REVESTIMIENTO EN HDPE	87
4.7. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN	88
4.8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	88
4.8.1. Distribucion de relaves	89
4.8.2. Espesadores de relaves	89
4.8.3. Sistema de emergencia	91
4.8.4. Floculación	91
4.8.5. Tanque de almacenamiento de relaves espesados	92

4.8.6. Bombeo de relaves espesados	92
4.8.7. Tanque de almacenamiento de agua de rebose	93
4.8.8. Bombeo de agua de rebose	94
4.8.9. Bomba para dilución y recirculación	94
4.8.10. Bombas de agua recuperada	95
4.9. PRUEBA DE HIPÓTESIS	95
4.9.1. Descripción del proceso	95
4.9.2. Filosofía de control	96
4.9.3. Diagrama de flujo del proceso y balance de masa	97
4.9.4. Servicios	100
4.9.5. Arreglo general	101
4.10. ESTIMADO DE COSTO DE CAPITAL	101
4.11. ESTIMADO DE COSTO DE OPERACIÓN	103
4.11.1. Distribución por periodos trimestrales	
del costo de capital	103

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de investigación se propuso el empleo de la tecnología de relaves espesados como alternativa ante el problema de disponibilidad de agua destinada para procesos minero-metalúrgicos, en zonas áridas; para ello se consideró una planta de flotación de minerales de cobre con un producción 10 000 t/d de relaves, con el propósito de aplicar el mismo concepto y filosofía a operaciones de altos tonelajes.

Las pruebas de caracterización metalúrgica, espesamiento y reología, realizadas a nivel laboratorio, a partir de una muestra sintética de relave de cobre, reportaron como floculante óptimo al Praestol 2530, de alto peso molecular y carga aniónica media, el cual presentó la mejor respuesta de velocidad de sedimentación y compactación frente al Floerger PHP20, Floerger PHP30, Floerger PHP40, Magnafloc 351 y Orifloc 2052. La concentración de sólidos de alimentación óptima de la pulpa fue determinada en 8 % w de sólidos, empleando una dosificación de floculante de 10 g/t. La tasa de alimentación se calculó en 0,7 t/m²/h mediante las metodologías de Coe & Clevenger, Talmage & Fitch y Solids Settling Flux, lo cual significan el uso de 4 espesadores HCT de

41 m de diámetro. La máxima compactación (forzada) alcanzada después de 24 hr en laboratorio fue de 82 % w.

En cuanto a la limitación de porcentaje de sólidos para que sea manejable por bombas centrifugas, los resultados indican que una descarga de 66 % w presentaría valores adecuados de resistencia a la fluencia para que sea manejable por bombas centrifugas, a la vez maximizando la recuperación de agua. Reológicamente los relaves espesados presentan fácil cizallamiento de valores alrededor de 150 Pa a valores cercanos e inferiores a 60 Pa.

En materia hidráulica, la velocidad crítica calculada fue de 2,50 m/s, mientras que la velocidad de transición se calcula en 4,0 m/s para una pulpa de 66 % w. Con el objetivo de mantener una velocidad nominal de 4m/s, una tubería de 24" acero al carbono cédula 40 con revestimiento de 1,3" de HDPE es la mejor decisión ante el alto desgaste asociado a estas altas velocidades. Este revestimiento permitiría una operación durante 20 años sin cambio alguno de la tubería. Por otro lado, y de acuerdo a la ecuación de Darby, la pérdida por fricción calculada es 0,6 kPa/m.

Para expresar la intención de la investigación manifiesto lo siguiente:

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, donde se ha considerado la descripción del problema, formulación del problema, los

objetivos de la tesis, las hipótesis, las variables y la justificación e importancia de la tesis.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO, donde se ha considerado los antecedentes de la investigación, estudio de la reología y el uso de los reactivos floculantes, seguido de las bases teóricas de espesamiento.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y RECOLECCIÓN DE DATOS, se da a conocer la metodología que se aplica para la realización de la investigación y poder demostrar la investigación que si es factible realizar, así mismo captar la información necesaria para realizar las pruebas experimentales.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, en este capítulo se han considerado las evaluaciones hechas de las muestra tomadas en las pruebas experimentales en laboratorio para el espesamiento del relave.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, se han desarrollado principalmente las conclusiones del estudio de investigación y dar sugerencias para continuar con la investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

El suministro de agua se ha convertido en un problema que las empresas mineras abordan desde las fases iniciales de sus proyectos, o que deben afrontar al evaluar una ampliación de sus operaciones. Sumado esto a las cada vez mayores exigencias medioambientales para el otorgamiento de los derechos por el aprovechamiento del recurso natural, hacen hoy que el agua en estas zonas tenga un elevado costo.

Específicamente en la pequeña, mediana y gran minería de nuestro país, el agua se emplea con intensidad en el proceso tradicional

de concentración por flotación, y en los procesos hidrometalúrgicos: lixiviación, extracción por solventes y electro-deposición. De acuerdo a la experiencia minera, el consumo de agua en una planta concentradora varía entre 0,4 a 1,6 m³ por tonelada de mineral procesado, con una media del orden de 0,7 m³.

Pese a la problemática en estas zonas sobre la disponibilidad de agua, persiste aún la práctica convencional en el tratamiento y manejo de los relaves, los cuales son los subproductos mineros que contienen la mayor proporción del recurso hídrico. Se estima que del total de agua que ingresa a una planta concentradora, generalmente más del 95% va a dar a la presa de relaves, mientras que el resto o bien se evapora o es recuperado parcialmente o está contenida en los concentrados. Es aquí que la tecnología de relaves espesados como solución ante el problema de disponibilidad de agua para los procesos metalúrgicos adquiere un papel decisivo.

De manera general, podemos indicar que durante las últimas tres décadas la tecnología de pasta y relaves espesados ha pasado de ser un objeto de investigación y conceptualización a ser una solución aceptada mundialmente y que ha adquirido práctica extensiva para el manejo de desechos minerales. Operaciones actuales en operación y muchos proyectos aplicando esta tecnología indican esta tendencia.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La minería polimetálica está frente a la limitada disponibilidad de agua fresca en zonas áridas donde la mayor parte de la pequeña, mediana, y la gran minería se desarrollan a mayor escala y ante la potencial posibilidad de extraer el recurso hídrico a partir del desaguado de los relaves. En otras partes del mundo, especialmente Europa, África y Australia, a medida que el agua limpia y potable se vuelven más escasos, todo aquel proceso que reduzca su consumo o que permita su re-uso en la minería, gana más importancia. Se estima que el proceso metalúrgico requiere el uso entre 0,4 a 1,6 m³ por tonelada de mineral procesado, con una media del orden de 0,7 m³. En el caso de minería aurífera el consumo medio está alrededor de 1 m³ por tonelada de mineral.

Entre otras ventajas técnicas que representa el espesamiento de relaves tenemos:

1. Disminución de pozas de agua sobre la presa de relaves, reduciendo así, el riesgo de colapso de presas por licuefacción. La Comisión Internacional de Presas de Gran Envergadura (ICOLD) ha reportado a la fecha que de los 221 incidentes reportados, 135 de ellos fueron por causas de este tipo [licuefacción], los que significan al menos 41,9 millones de

metros cúbicos de relaves que viajaron considerables distantes. Por otro lado, se señala que la tasa de falla de presas era de 1,7 por año, tasa que se ha incrementado a 2,0 entre los años 1995 a 2001.

2. Además, la menor agua contenida en los relaves reduce las filtraciones subterráneas y la segregación de partículas, esto último indica que la pasta o relaves espesados no presenta velocidad de sedimentación en la tubería de transporte, ni potencial riesgo de taponamiento. Además, “la propiedad de no-segregación de los relaves espesados es responsable del agrupamiento de partículas, por ende se reduce el potencial de erosión y emisión de polvo” .

3. Reducción de volúmenes de presa, y mejor aprovechamiento del área disponible al permitir mayores ángulos de disposición. Este ángulo es típicamente entre 2 a 6 % en climas poco agrestes, sin embargo, para climas mucho más secos, es posible incluso inclinaciones mayores, mientras que los relaves convencionales no tienen ángulo de disposición. Por otro lado, permite la posibilidad de disposición con otros materiales de desecho, y el uso como material para bases de sostenimiento civil.

Los relaves pueden ser almacenados de diferentes maneras dependiendo de su naturaleza físico-química, la topografía, condiciones climáticas y el contexto socio-económico, sin embargo el requerimiento básico de un depósito de relaves es proveer almacenamiento seguro, estable y económico con mínimo impacto a la salud y ambiental durante su operación y después de ella.

La razón por la cual una presa de relaves convencional falla no es por la presa en sí, sino por el hecho de que una presa convencional retiene una gran masa de sólidos poco consolidados y una cantidad elevada de agua de proceso, elementos que sumados a una fuerza externa producen el más catastrófico de los fenómenos: La licuefacción. Se define la licuefacción como el proceso de pérdida de resistencia de ciertos tipos de suelos saturados en agua cuando son sometidos a fuerzas externas (como por ejemplo un movimiento sísmico). La pérdida de resistencia del suelo hace que la masa se comporte como un líquido, y una vez en este estado líquido, los relaves pueden viajar varios kilómetros aguas abajo, como ocurrió en la catástrofe de Stava en Italia en 1985 donde 250 000 m³ de relaves licuefactados arrasaron el valle de Stava, alcanzando una velocidad de hasta 90 km/h, y sepultaron dos pueblos con ellos 268 muertes, convirtiendo así este suceso como al peor

desastre ocurrido en una instalación de manejo de relaves en Europa. Sólo en el año 2000, nueve fallas de presa de relaves han sido reportadas en China, Rumania, Suecia y Nueva Guinea.

La principal contribución en seguridad, es que incluso si una presa de relaves espesados falla, el material bien consolidado y sin contenido de agua, no podrían fluir grandes distancias desde su lugar de confinamiento.

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cómo realizar la evaluación metalúrgica para el diseño espesador de los relaves espesados de la planta concentradora en la Unidad Minera Quiruvilca?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

1. ¿Cómo realizar una evaluación metalúrgica para el diseño del espesador de relaves mediante tecnologías de espesamiento?
2. ¿Cómo caracterizar metalúrgicamente la gravedad específica de sólidos, distribución de partículas, viscosidad y resistencia a la fluencia de los relaves espesados en el rango de porcentaje de sólidos en evaluación?

3. ¿Cómo analizar el efecto en la dosificación de floculante sobre la velocidad de sedimentación, determinar el floculante óptimo y su consumo esperado, además del rango de tasa de alimentación para este material?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar la evaluación metalúrgica para el diseño del espesador de los relaves espesados de la planta concentradora de la Unidad Minera Quiruvilca.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una evaluación metalúrgica para el diseño del espesador de relaves espesados mediante tecnologías de espesamiento.
2. Caracterizar metalúrgicamente la gravedad específica de sólidos, distribución de partículas, viscosidad y resistencia a la fluencia de los relaves espesados en el rango de porcentaje de sólidos en evaluación.

3. Analizar el efecto en la dosificación de floculante sobre la velocidad de sedimentación, determinar el floculante óptimo y su consumo esperado, además del rango de tasa de alimentación para este material.

1.4. IMPORTANCIA, LIMITACIONES Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. IMPORTANCIA:

Hace ocho años era impensable la extracción y tratamiento de minerales con leyes menores al 3,0 %, ya que resultaba económicamente inviable. Sin, embargo, hoy en día, la escasez del recurso minero y el aumento en la demanda, ha motivado al tratamiento de depósitos con contenidos no mayores a 0, 2%, y que son factibles económicamente sólo si son explotados a gran escala, lo cual, a su vez, requiere un mayor uso de agua y genera una mayor cantidad de relaves como desecho.

En nuestro país, hay región árida y de poca disponibilidad de agua, en la mayor parte de las plantas de concentración de minerales polimetálicos el suministro de agua limita en muchos casos las operaciones y/o restringe la ampliación de éstas. Uno de los componentes de una solución global, la cual ha llegado a

ser mayormente aceptada, es el uso de la tecnología de espesamiento como alternativa de recuperación de agua a partir de cualquier pulpa, el ahorro de agua es un punto ambiental muy favorable en el uso de la tecnología de “pasta”, lo cual es muy atractivo en zonas áridas, ya que permite recuperar agua para el proceso, a diferencia de las grandes cantidades que son perdidas por evaporación en presas de relaves convencionales.

Además, una menor huella de relaves significa una menor área impactada, menor área de monitoreo durante y posterior a la operación de la mina. “Por otro lado, el incremento legislativo así como demanda social por una consiente disposición de los residuos mineros, afectan no solo a la comunidad minera, sino también al costo de las operaciones”.

En el presente estudio, se pretende obtener información para determinar la viabilidad técnica para la aplicación de relaves espesados.

1.4.2. LIMITACIONES

La investigación a realizarse tendrá como la evaluación de pre factibilidad para la recuperación de agua mediante el espesado de relaves, teniendo en cuenta que la bibliografía es escasa en

el mundo de la minería, así como también se llevará a cabo en un lapso de 6 meses de estudio.

1.4.3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación está enmarcada para el uso de la tecnología de relaves espesados, existe actualmente un compromiso ambiental y social en la reducción del impacto de toda operación minera. Hoy en día, las tecnologías de disposición de relaves convencionales, aguas arriba, aguas abajo y centrales, son vistas por el público como instalaciones inestables, como lo evidencia el gran número de incidentes reportados en este tipo de instalación.

Las ventajas ambientales y sociales más importantes de los relaves espesados son:

1. Disminución del área de impacto requerida para la disposición de grandes volúmenes de relaves; disminución de la contaminación de suelos y aguas subterráneas. Reducción y/o eliminación de la generación de agua ácida y transporte de contaminantes. Disminución de la exposición de vida salvaje a agua potencialmente contaminada o a relaves blandos donde pueden quedar atrapados.
2. Recuperación de mayor cantidad de agua para uso en los procesos y por ende reducción del consumo de agua fresca, lo

cual genera que la percepción del público sobre las presas de relaves mejore al ser considerada una instalación estructuralmente más estable.

Los relaves espesados pueden ser incluso mezclados con suelo, semillas y fertilizantes, y en el caso de disposición con descarga central en pilas, se propicia la recuperación de la tierra, incluso antes del cierre de la operación minera.

El atractivo de reducir los costos de la gestión de relaves en el corto plazo debe ser sopesado cuidadosamente contra la posibilidad de incrementar los costos sociales y ambientales en la clausura y más allá. Esto requiere un modelo robusto y flexible de riesgos, asociado a un análisis de beneficio-costos para tomar la decisión correcta durante la vida de todo el proyecto. La salud pública, así como los riesgos de seguridad e impactos sociales y ambientales deben ser considerados, incluyendo aquellas situaciones en las que se podrían liberar contaminantes en el largo plazo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente estudio de investigación se desarrollara con el uso adecuado del laboratorio químico metalúrgico de la Unidad Minera Quiruvilca.

2.1. ANTECEDENTES

Se define a la pasta como una mezcla de agua y partículas sólidas que posee alto porcentaje de sólidos, alta viscosidad, alta resistencia a la fluencia, produce slump de acuerdo a la norma ASTM C143, no posee velocidad crítica de sedimentación, se mueve a través de una tubería como un “plug flow” y no como flujo turbulento, exuda poca o nada de agua una vez depositada o en reposo, y debe contener al menos 15% de partículas menores a 20 μm .

En general se puede indicar que el contenido de humedad típico de una pasta se encuentra entre el 10 a 25 %, de manera tal que la

consistencia puede ser medida mediante asentamiento de cono (ASTM slump cone test), sin embargo el porcentaje de sólidos resulta un criterio muy pobre para la definición de relaves espesados o en pasta, pues la consistencia de un material depende de su mineralogía, gravedad específica, morfología de partículas y química, entre otros.

La aparición de las primeras investigaciones y aplicaciones de la tecnología de disposición de relaves espesados se remontan a hace unos cuarenta años, con los trabajos de Shields (1974) y posteriormente, de manera independiente, por Robinsky en el año 1976. Este último fue un ingeniero geotécnico quien propuso para la mina Kidd Creek, propiedad de Falconbridge Limited, y por primera vez a escala industrial, la idea que reducir el volumen de disposición de relaves mediante la remoción de agua de proceso, ante la reducida área disponible para sus disposición, de tal manera que el producto pueda autosostenerse por sí solo sin la necesidad de una presa con una pendiente de $\pm 3^\circ$ respecto a la horizontal. De esta manera Kidd Creek se convirtió en la primera operación minera en usar relaves espesados a partir del año 1976, operando con éxito hasta la fecha.

Pese a la oposición de sus detractores, y la negación que encontró en publicar sus trabajos, Robinsky publicó él mismo su libro en el

año 1999, mismo año en que la primera planta de pasta destinada únicamente para la disposición superficial de relaves espesados a razón de 158 t/h fue comisionada en Australia.

“El objetivo de un sistema de disposición de relaves espesados o en pasta, es crear una estructura auto-soportante, de tal manera que se optimice los requerimientos de confinamiento. Para lograr esto, los relaves deben ser espesados mediante el uso de floculantes y equipos mecánicos (espesadores ó filtros), resultando un material no segregable con una distribución de sus partículas uniforme, en la que no se produce segregación granulométrica de partículas, y que una vez dispuesto no presenta exudación significativa de agua”. Esta última característica, la hace atractiva, además, para su uso como relleno subterráneo con la adición de cemento, agregado y cal. Por otro lado, como resultado de la densificación del material se pueden obtener mayores ángulos de disposición en superficie, entre 2 % a 6 % por ejemplo, lo cual significa una gran ganancia en términos de volumen de presa.

Es así que hoy en día las dos principales aplicaciones de la tecnología de desaguado de relaves pueden clasificarse en dos grandes tendencias: disposición subterránea (ó relleno en pasta), y disposición superficial.

Actualmente existen muchas operaciones que emplean la tecnología de relaves espesados y en pasta, se estima en cerca de 30 plantas similares alrededor del mundo que han entrado en operación o se encuentran en etapas de diseño o construcción.

Este número vendrá en aumento, ya que las limitaciones del pasado, principalmente costo y falta de tecnología, se han adelgazado. Hoy en día, la tecnología de espesadores permite la producción de descargas altamente densificadas, a la vez que los costos se han reducido significativamente.

Disposición subterránea (Relleno en pasta)

El campo de la disposición subterránea tiene como concepto producir un material altamente densificado para el llenado de los vacíos ocasionados por los procesos de minado.

La aplicación se oponía así a la tendencia tradicional de emplear relleno hidráulico sin densificar para el mismo propósito.

En ambos casos los materiales empleados comúnmente son relaves, arena, roca y cemento.

Entre los principales beneficios, en el aspecto técnico y económico, de la tecnología de relleno en pasta, frente a los métodos de relleno hidráulico tenemos:

1. Menor consumo de cemento para lograr la misma resistencia mecánica, comparado con el relleno hidráulico convencional, debido a la menor cantidad de agua contenida en el producto de relleno. Esto a su vez reduce el número de barricadas en interior mina al permitir mayores ángulos de disposición, reduce el ciclo de tajeos al permitir un secado más rápido, y reduce el volumen de manejo y costos de tratamiento de agua en interior mina.
2. Aprovechamiento más eficiente de todos los relaves totales, ya que mediante el relleno en pasta es factible la utilización total. El relleno hidráulico, por lo general, considera únicamente el uso de la fracción gruesa contenida en los relaves con el propósito de incrementar la resistencia mecánica.

Disposición superficial

La disposición de relaves mineros históricamente ha sido en forma de pulpa, y en grandes extensiones destinadas para tal propósito, las cuales requieren de grandes inversiones asociadas a infraestructura y obras de ingeniería, y además en la mayoría de casos representan un alto costo operativo.

Sin embargo, la tecnología de relaves en pasta y espesados no sólo generó el interés de la industria minera en el campo de la disposición superficial desde el punto de vista económico (costos de inversión y de operación) sino también desde el aspecto ambiental y geotécnico.

2.2. BASES TEÓRICAS

Para plantear el marco teórico debemos de manifestar lo que entendemos sobre las pruebas que se realizan a un determinado mineral y de esa manera poder plantearnos el sistema de evaluación

2.2.1. MARCO CONTEXTUAL

Las operaciones de la Unidad Minera Quiruvilca comprende dos zonas principales: “Quiruvilca” y “Shorey” y algunas áreas satélites menores, tales como la Central Térmica “Plazapampa”, los campamentos e instalaciones antiguas en Samne. Políticamente, el área de operaciones Quiruvilca se ubica en el distrito de Quiruvilca, en provincia de Santiago de Chuco, departamento de La Libertad.

El área donde se ha desarrollado la unidad minera ocupa una extensión de 3 963,14 Ha, y se ubica geográficamente en las vertientes del flanco occidental de la Cordillera Occidental

de los Andes, entre los 3 600 msnm y 4 000 msnm.

Ubicación de la Unidad Minera Quiruvilca.

Desde Lima se accede a la ciudad de Trujillo (capital del departamento de La Libertad) vía la Carretera Panamericana, mediante un recorrido de 560 km, en un tiempo de aproximadamente 8 horas, o mediante vuelos aéreos comerciales de 40 minutos de duración.

2.2.2. FASES DE UN FLUIDO

Los elementos y compuestos en la naturaleza se presentan en 3 fases: fase sólida, líquida y gaseosa.

Un fluido puede contener más de una fase y seguir comportándose como tal. De acuerdo a este criterio, los fluidos pueden ser clasificados como:

1. Unifásicos: Líquido o gas.
2. Bifásicos: Líquido-gas, líquido-sólido o gas-sólido.
3. Multifásicos: Fluidos que contienen los tres estados.

En el caso que nos compete, los relaves son considerados fluidos bifásicos compuestos de una fase sólida (mineral) y una fase líquida (agua).

En el presente estudio haremos referencia a este tipo de fluidos simplemente como “pulpas”.

Reología

Uno de los pre-requisitos fundamentales para el diseño e implementación de un sistema de relaves espesados es un entendimiento completo de las características reológicas del material. Se define la reología como el estudio de las relaciones de deformación que experimenta un fluido al aplicársele una fuerza externa.

El origen de esta ciencia se estima en la segunda mitad del siglo XVII, cuando Robert Hooke e Isaac Newton daban a conocer las primeras ideas acerca del sólido elástico y del fluido viscoso ideales, respectivamente. La Reología moderna, además de los comportamientos elástico y viscoso, estudia los sistemas complejos de aquellas sustancias viscoelásticas las cuales presentan simultáneamente propiedades elásticas y viscosas.

En el campo minero-metalúrgico, la reología es aplicada al estudio de la dependencia del comportamiento hidráulico de pulpas minerales en relación al tamaño de sus partículas, de la

química de sus superficies, de las características y dosificación de floculante (si se trata de un producto espesado), de su concentración y de la energía (generalmente mecánica) que se le aplica a la suspensión.

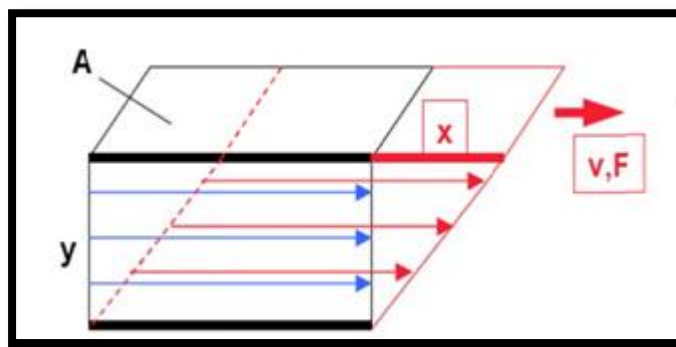
A nivel industrial, otras aplicaciones de la reología (Itescam 2010:4) son para el control de calidad, textura y consistencia de alimentos; producción de pegamentos, pinturas, cosméticos, y medicamentos; caracterización de elastómeros y de polímeros tipo PVC; estabilidad de emulsiones y suspensiones; caracterización de gasolinas y otros tipos de hidrocarburos; caracterización de metales (en situaciones de elevada temperatura) y de cristales líquidos; y control de sustancias que sean transportadas a lo largo de tuberías.

Por otro lado, Huynh ha estudiado las ventajas económicas que es posible alcanzar tras la modificación de las propiedades reológicas de un concentrado de cobre, comparando los costos de los reactivos empleados frente a los costos de bombeo resaltando de esta manera la importancia de la reología en este rubro.

Viscosidad

La viscosidad no puede medirse directamente, sin embargo su naturaleza se demuestra mediante un experimento sencillo: Se consideran dos superficies infinitas y paralelas entre sí, separados una distancia dada “y”, las cuales aíslan un fluido dado. Manteniendo la superficie inferior estática, se hace desplazar la superficie superior en la dirección x con una velocidad v (ver Figura N° 2.1).

Figura N° 2.1: Esquema de las fuerzas asociadas al fenómeno de viscosidad.



Fuente: Haake

Si definimos el esfuerzo de corte

- como la relación entre la fuerza F_A aplicada para generar el movimiento (Ec. 1) y el área de la superficie A , y la razón de corte.
- como el diferencial de velocidad dv que experimenta el fluido a lo largo de la distancia dy (Ec. 2), entonces la experiencia describe que existe una relación directa, sea constante o no, entre ambos la cual se define como la viscosidad del fluido contenido entre las superficies.

$$\tau = \frac{F_A}{A} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{dV}{dy} = \frac{dy}{dt} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{dx}{dy} \quad (3)$$

Donde:

τ = Esfuerzo de corte

F_A = Fuerza aplicada

A = Área superficial

γ = Deformación

x = Desplazamiento en la dirección y

y = Desplazamiento en la dirección x

La representación gráfica de ambas variables (esfuerzo de corte vs. la razón de corte) se denomina “curva de fluidez” y es característica de cada fluido en estudio. La curva de fluidez describe el comportamiento del fluido a distintas tasas de corte, de manera que brinda información muy útil para el dimensionamiento de la bomba, tubería, etc. de acuerdo a la tasa de corte que cada componente del sistema presente sobre el fluido. La generación de una curva de fluidez se consigue ya sea aplicando distintas tasas de corte o esfuerzos

de corte de manera que la variable contraria se registre como respuesta del material.

Tipos de viscosidad

Existen tres tipos de viscosidad: la viscosidad dinámica, la viscosidad aparente y la viscosidad cinemática.

La viscosidad dinámica: es la definición clásica de la viscosidad tal como fue definida en la sección anterior, es decir la relación entre el esfuerzo de corte y la razón de corte. Gráficamente es la pendiente en cada punto de la “curva de fluidez”. Según el tipo de fluido, puede ser o no una constante. *Si la relación es constante, tal como en la Ec. 4, se denomina viscosidad dinámica (μ):*

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma^{\circ}} \quad (4)$$

Si la relación no es constante, tal como en la Ec. 5, se denomina función viscosidad (η):

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma^{\circ}} \quad (5)$$

La viscosidad para pulpas diluidas (porcentaje de sólidos menor a 30 %) se considera como agua limpia, es decir 1 mPa. Para porcentajes de sólidos mayores a 30 %, la determinación de la viscosidad mediante reogramas será requerida.

La viscosidad aparente es calculada asumiendo que ésta es constante (Ec. 6), por lo tanto es una manera errónea de expresar la viscosidad para fluidos. De manera gráfica, es el cociente entre el esfuerzo de corte y la razón de corte:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (6)$$

La viscosidad cinemática ν : relaciona la viscosidad dinámica (μ) con la densidad del fluido utilizado ecuación 7.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

La viscosidad, cualquiera de los tres tipos indicados, depende de una gran cantidad de parámetros tales como: composición química, temperatura, presión, razón de corte, tiempo, etc. Es por ello que la viscosidad, para fluidos de este tipo, siempre debe ir indicada de los parámetros bajo los cuales fue medido, tal como lo establecen las normas DIN 53 018 y DIN 53 019.

2.2.3. CLASIFICACIÓN DE FLUIDOS

La función matemática de la viscosidad permite clasificar a los fluidos en tres grandes grupos: newtonianos, no newtonianos y viscoelásticos, de los cuales el grupo de no newtonianos adquiere un mayor interés en el campo de la minería, especialmente en el transporte de pulpas minerales bifásicas.

En general, los fluidos con propiedades reológicas independientes del tiempo, pueden representarse mediante el modelo genérico de Herschel Bulkley (Ec.8)

$$\tau = \tau_0 K (\dot{\gamma})^n \quad (8)$$

Donde:

τ =Esfuerzo de corte

τ_0 = Resistencia a la fluencia

K = Índice de Donde:

τ = Esfuerzo consistencia de fluido del modelo genérico de Herschell Bulkley

n = Índice de comportamiento de flujo del modelo genérico de Herschhell Bulkey.

e acuerdo al modelo genérico de Herschel Bulkley, la resistencia a la fluencia (τ_0) y el índice de comportamiento de flujo (n) son suficientes para la clasificación de los fluidos según sus propiedades reológicas, tal como se muestra en la Tabla N°2.1 y de manera gráfica en la Figura N° 2.2.

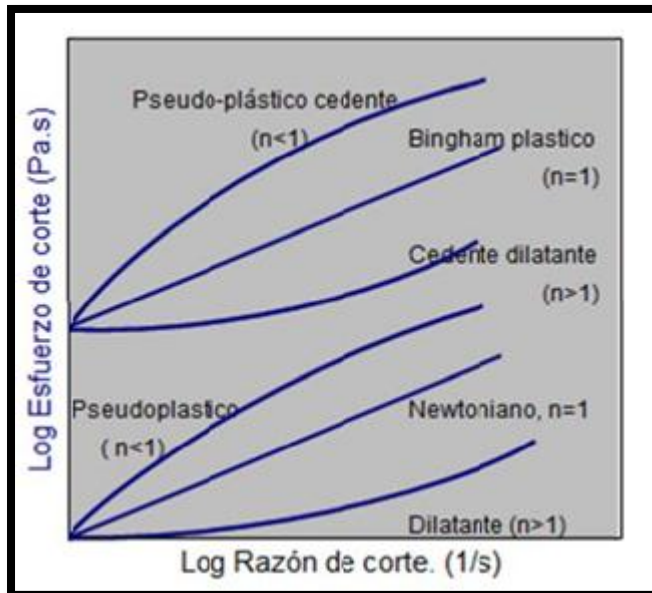
Es importante señalar que aunque existen muchos tipos de fluidos no newtonianos, los de mayor implicancia en la industria minera son los llamados fluido tipo plásticos Bingham.

Tabla N° 2.1: Modelo genérico de Herschel Bulkley para fluidos con propiedades independientes del tiempo.

Modelo	Resistencia a la fluencia	Índice de comportamiento
Newtoniano	$\tau_0 = 0$	$n=1$
Bingham plástico	$\tau_0 > 0$	$n=1$
Pseudo plástico (Modelo de Ostwald de Waele)	$\tau_0 = 0$	$n < 1$
Pseudo plástico cedente	$\tau_0 > 0$	$n < 1$
Dilatante	$\tau_0 = 0$	$n > 1$
Cedente dilatante	$\tau_0 > 0$	$n > 1$

Fuente: Haake

Figura N° 2.2: Clasificación de fluidos con propiedades independientes del tiempo.



Fuente: Elaboración propia

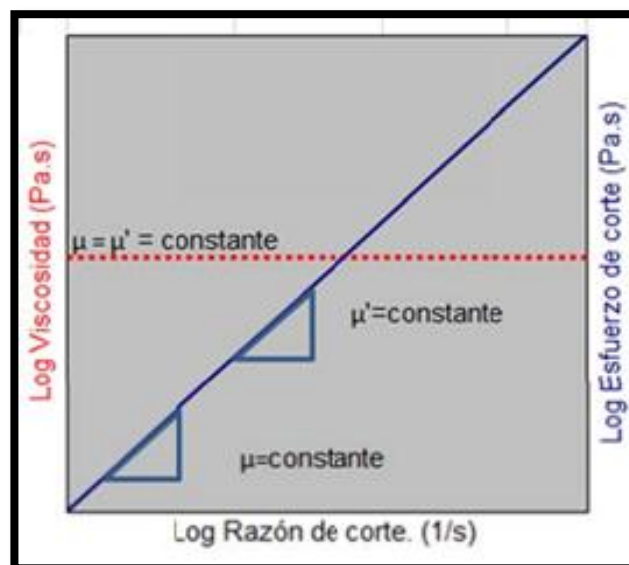
2.2.4. FLUIDOS NEWTONIANOS

Si la razón de corte mantiene una relación constante con el esfuerzo de corte entonces se dice que el fluido es Newtoniano:

$$\tau = \mu * \dot{\gamma}^n \quad (9)$$

La ecuación 9 es la expresión matemática de la ley de Newton de la viscosidad que establece que la resistencia a la fluencia entre capas de fluido adyacentes es proporcional al valor negativo de la razón de corte. Los fluidos Newtonianos presentan una Curva de Fluidez y viscosidad como se muestra en la Figura N° 2.3.

Figura N° 2.3: Curva de fluidez y viscosidad de fluidos Newtonianos.



Fuente: Haake

La Tabla N° 2.2, muestra algunos valores de la viscosidad dinámica para fluidos newtonianos a temperatura y presión ambientales.

Tabla N° 2.2: Viscosidades dinámicas fluidos newtonianos

FLUIDOS	VISCOSIDAD APROXIMADA (mPa)
Vidrio	10^{43}
Vidrio Fundido	10^{15}
Betún	10^{11}

Bitumen	10^8
Polímeros fundidos	10^6
Miel Líquida	10^4
Glicerol	10^3
Aceite de oliva	10^2
Leche	10^1
Agua	10^0

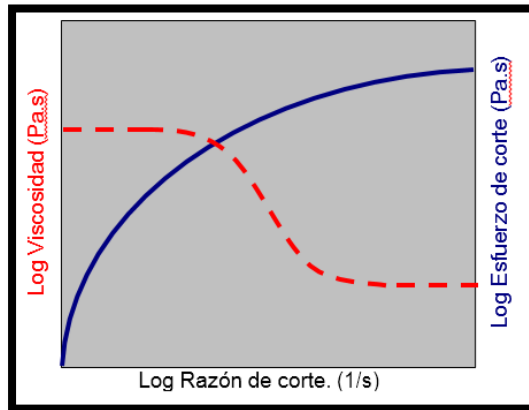
Fuente: Itescam y Haake

Fluidos independientes del tiempo

Se pueden clasificar dependiendo de si tienen o no resistencia a la fluencia es decir, si necesitan un mínimo valor de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento.

a) Fluidos pseudoplásticos: Se caracterizan por una disminución de su viscosidad, y de su esfuerzo cortante, al incrementarse la razón de corte, tal como se presenta en la Figura N° 2.4.

Figura N° 2.4: Curva de fluidez y viscosidad para fluidos pseudoplásticos.



Fuente: Itescam

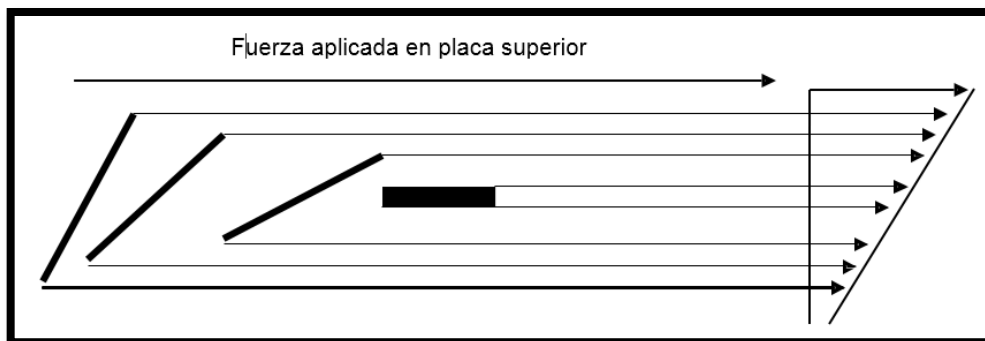
Este comportamiento es denominado “cizallamiento ante el corte” o “shear thinning”. Y se pueden dar dos explicaciones a este fenómeno:

1. Teoría del flujo de varillas rígidas suspendidas en un líquido Newtoniano:

En esta teoría (Itescam 2010) existen una serie de varillas desorientadas dentro del líquido newtoniano, las cuales se caracterizan por su movimiento browniano y tienen un vector de velocidad que tiende a adoptar una situación horizontal (Figura N° 2.5). Dicho movimiento browniano es una observación indirecta de la agitación térmica de las moléculas de un líquido, al visualizarse el desplazamiento de partículas en suspensión en el seno del mismo. La resultante de los choques al azar es una

fuerza de magnitud y dirección variable a la orientación de las varillas - responsable de la viscosidad – que evita que se llegue a un cierto estado de equilibrio. Cuanto mayor sea la orientación de las varillas, menor será la viscosidad del fluido.

Figura N° 2.5: Representación de la teoría del flujo de varillas rígidas suspendidas en el fluido



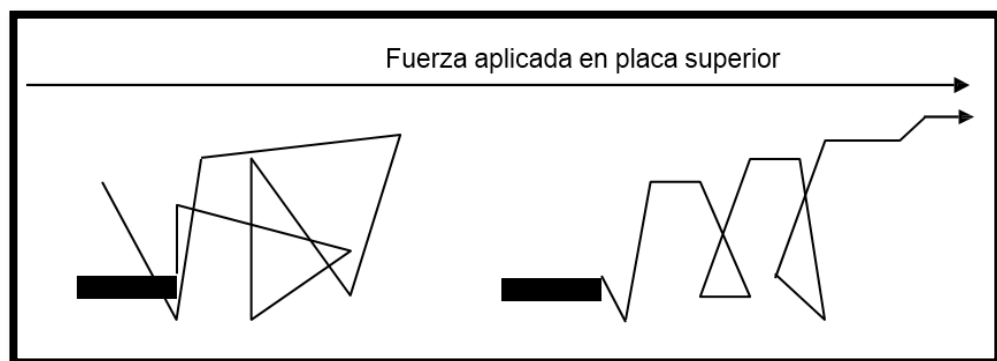
Fuente: Itescam

2. Teoría del flujo de moléculas filamentosas en un líquido Newtoniano

Se supone que, dentro de un fluido newtoniano situado entre dos placas paralelas, una de las cuales se mueve, aparece una serie de macromoléculas en forma de filamentos porosos que contienen grupos de átomos con una gran movilidad. Al principio, estos grupos de átomos forman filamentos bastante enredados. Con el

tiempo, al moverse la placa superior, la velocidad de deformación aumenta y la resultante de las fuerzas tiende a desenredar estos filamentos en la dirección del flujo, dependiendo de su elasticidad y de su velocidad de deformación, y además dicha fuerza libera parte del líquido que existe alrededor de la molécula. Como resultado de todo lo que ocurre en el seno del fluido se produce una disminución de la fricción interna dando lugar a su vez a una disminución de la viscosidad (Figura N° 2.5).

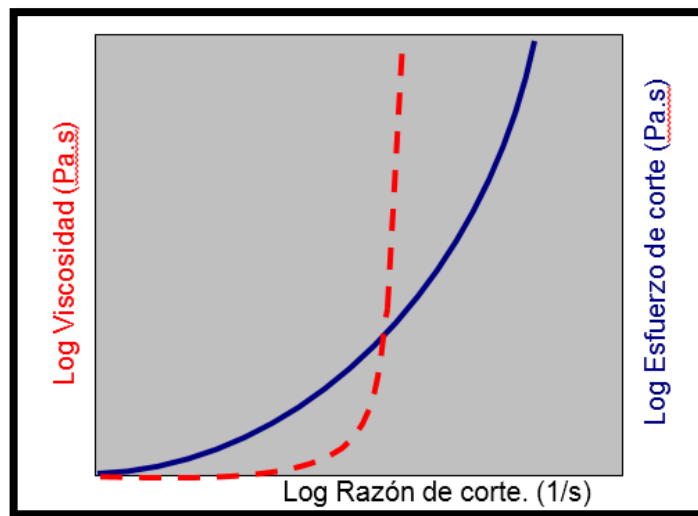
Figura N° 2.5: Representación de la teoría del flujo de moléculas filamentosas en un fluido.



Fuente: Itescam

b) Fluidos dilatantes: Los fluidos dilatantes son suspensiones en las que se produce un aumento de la viscosidad con la razón de corte, tal como se representa en la Figura N° 2.6.

Figura N° 2.6: Curva de fluidez y viscosidad para un fluido dilatante. Tomado de Itescam (2010: 22)



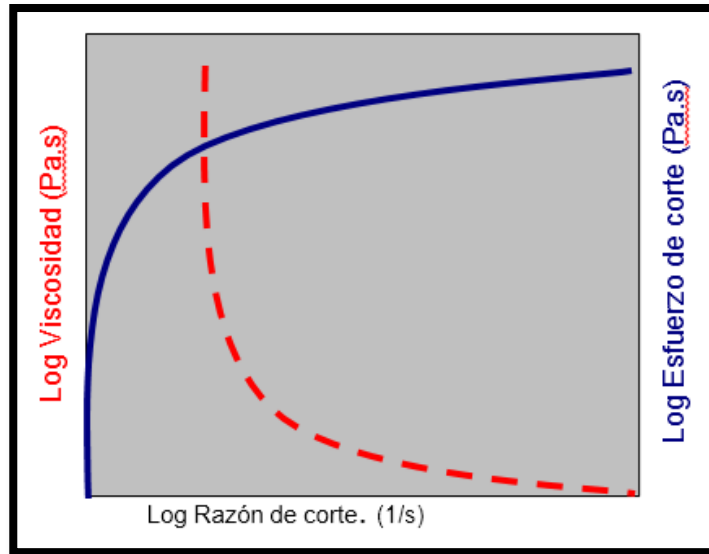
Fuente: Itescam

El fenómeno de dilatancia, también llamado “shear thickening”, se produce debido a la fase dispersa del fluido. En dicho fluido tiene lugar un empaquetamiento de las partículas, dejando a la fase continua casi sin espacio. Si a continuación se aplica un esfuerzo, el empaquetamiento se altera y los huecos entre las partículas dispersas aumentan. Además, conforme aumenta la velocidad de deformación aplicada, mayor turbulencia aparece y más difícil es el movimiento de la fase continua por los huecos, dando lugar a un mayor esfuerzo cortante (la viscosidad aumenta).

c) Plásticos: Este tipo de fluidos se comportan como un sólido hasta que sobrepasan un esfuerzo cortante mínimo (resistencia a la fluencia) y a partir de dicho valor se

comporta como un líquido, tal como se representa en la Figura N° 2.7.

Figura N° 2.7: Curva de fluidez y viscosidad para un fluido plástico



Fuente: Itescam

La razón por la que se comportan así los fluidos plásticos es la gran interacción existente entre las partículas suspendidas en su interior, formando una capa llamada de solvatación. Están formados por dos fases, con una fase dispersa formada por sólidos y burbujas distribuidos en una fase continua. En estos fluidos, las fuerzas de Van der Waals y los puentes de hidrógeno, producen una atracción mutua entre partículas. También aparecen fuerzas de repulsión debidas a potenciales de la misma polaridad. En este tipo de

fluidos se forman coloides cuyas fuerzas repulsivas tienden a formar estructuras de tipo gel.

Si las partículas son muy pequeñas poseen entonces una gran superficie específica, rodeados de una *capa de adsorción* formada por moléculas de fase continua. Gracias a esta capa, las partículas inmovilizan gran cantidad de fase continua hasta que no se aplican sobre ellas un esfuerzo cortante determinado.

Los fluidos plásticos, a su vez, se diferencian en la existencia de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la razón de corte, a partir de su resistencia a la fluencia.

Si existe proporcionalidad, se denominan fluidos plásticos de Bingham y si no la hay, se denominan solo plásticos.

El modelo de Bingham ha sido históricamente empleado para la predicción de los requerimientos de transporte en tubería asociado a tasas de corte entre 10 a 100 s^{-1} , sin embargo para condiciones de inicio en tuberías, mecanismos de rastra y agitadores, las tasas de corte son menores a las indicadas, y el modelo Bingham no tiene validez experimental.

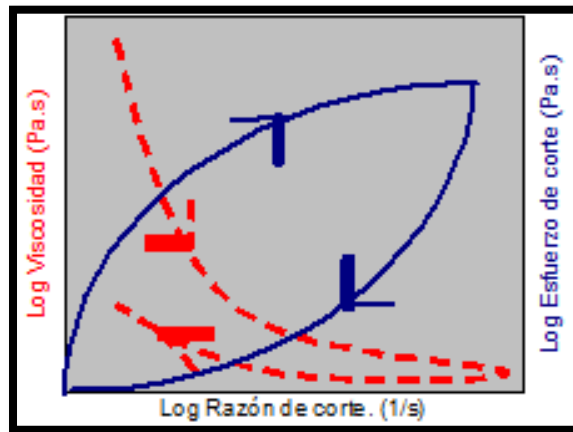
2.2.5.FLUIDOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO

Este tipo de fluidos se clasifican en dos tipos: los fluidos *tixotrópicos*, en los que su viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante, recuperando su estado inicial después de un reposo prolongado, y los fluidos *reopécticos*, en los cuales su viscosidad aumenta con el tiempo de aplicación de la fuerza y vuelven a su estado anterior tras un tiempo de reposo.

a) Fluidos tixotrópicos: Se caracterizan por un cambio de su estructura interna al aplicar un esfuerzo. Esto produce la rotura de las largas cadenas que forman sus moléculas. Dichos fluidos, una vez aplicado un estado de cizallamiento (esfuerzo cortante), sólo pueden recuperar su viscosidad inicial tras un tiempo de reposo. La viscosidad va disminuyendo al aplicar una fuerza y acto seguido vuelve a aumentar al cesar dicha fuerza debido a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio. Aparece un fenómeno de Histéresis. Las razones de este comportamiento son diversas. Si se considera al fluido como un sistema disperso, se debe tener en cuenta que las partículas que hay en él poseen diferentes potenciales eléctricos y tienden a formar tres

estructuras variadas dependiendo de cómo sea la fase dispersa.

Figura N° 2.8: Curvas de fluidez y de viscosidad de un fluido tixotrópico.



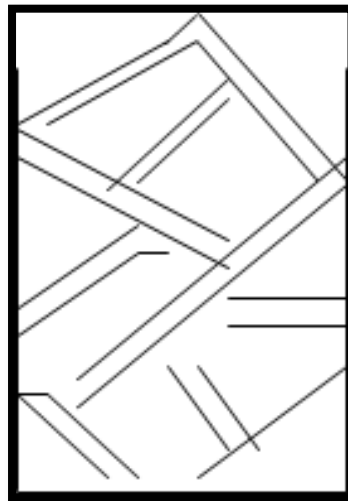
Fuente: Itescam

Si la fase dispersa está formada por una serie de capas se denomina “Castillo denaipes”, (Figura N° 2.9) si en cambio se compone de una serie de varillas se denomina “Armadura” (Figura N° 2.10), y si la fase dispersa está compuesta por formas esféricas se denomina “Estructura de perlas encadenadas” (Figura N° 2.11). Las fuerzas que actúan en estas estructuras son de tipo electrostático y se originan por el intercambio de iones dentro del fluido, el cual provoca atracciones y repulsiones entre ellos que dan lugar a cambios estructurales.

Para la determinación de la tixotropía de una pulpa mineral existen tres métodos disponibles, siendo los dos primeros métodos directos y el tercero un método indirecto:

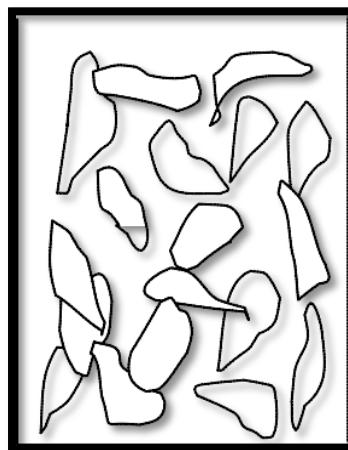
- La prueba del bucle de tixotropía.
- La prueba de corte constante
- La prueba de deformación y recuperación

Figura N° 2.9: Estructura tipo castillo de naipes en fluidos tixotrópicos.



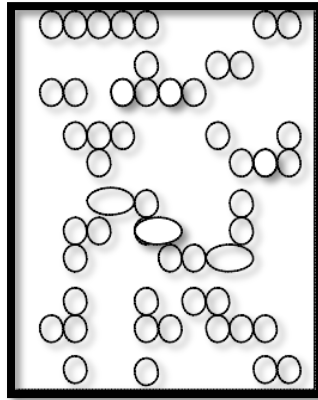
Fuente: Itescam

Figura N° 2.10: Estructura tipo armadura en fluidos tixotrópicos



Fuente: Itescam

Figura N° 2.11: Estructura de perlas encadenadas en fluidos tixotrópicos.



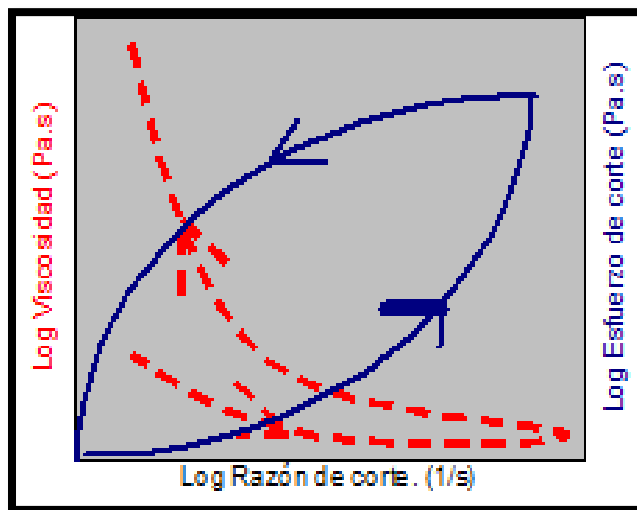
Fuente: Itescam

Estos cambios estructurales hacen disminuir la viscosidad con el aumento de la velocidad de deformación y que ésta esté muy influenciada por el tiempo. La estructura puede volver a recuperar su forma inicial dejándola un tiempo en reposo. Para diferenciar de forma sencilla un fluido tixotrópico, se aumenta la velocidad de deformación hasta un determinado valor y luego se disminuye hasta el reposo, observando entonces un fenómeno de histéresis, que ayuda a comprender la variación de la viscosidad. *Ejemplos* típicos de fluidos tixotrópicos son: las pinturas, el yogurt, las tintas de impresión, la salsa de tomate, algunos aceites del petróleo, el nylon, etc.

b) Fluidos reopécticos: Se caracterizan por tener un comportamiento contrario a los tixotrópicos, es decir, que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de deformación aplicada y presentan una histéresis inversa a

estos últimos, tal como se presenta en la Figura N° 2.12. Esto es debido a que si se aplica una fuerza se produce una formación de enlaces intermoleculares conllevando un aumento de la viscosidad, mientras que si cesa ésta se produce una destrucción de los enlaces, dando lugar a una disminución de la viscosidad.

Figura N° 2.12: Curva de fluidez y viscosidad de fluidos reopécticos.



Fuente: Itescam

2.2.6.FLUIDOS VISCOELÁSTICOS

Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por presentar a la vez tanto propiedades viscosas como elásticas. Esta mezcla de propiedades puede ser debida a la existencia en el líquido de moléculas muy largas y flexibles o también a la presencia de partículas líquidas o sólidos dispersos. La ecuación que

describe el comportamiento viscoelástico está basada en el modelo de *Maxwell* (Ec. 10). Ejemplos de fluidos viscoelásticos son la nata, la gelatina, los helados, etc.

$$\tau = \lambda \dot{\tau} = \mu \dot{\gamma} \quad (10)$$

Donde:

τ = Razón de corte

γ = Deformación

λ = Tiempo de relajación (modelo de Maxwell)

$\dot{\tau}$ = Gradiente de esfuerzos cortantes (modelo Maxwell).

μ = Viscosidad dinámica

2.2.7. RESISTENCIA A LA FLUENCIA

La resistencia a la fluencia (o Yield Stress) se define como resistencia mínima requerida para iniciar el flujo en un líquido, y está gobernada por las propiedades estructurales de un material en reposo. Es decir que, para esfuerzos por debajo de la resistencia a la fluencia, el fluido se deformará elásticamente con una recuperación completa de tal deformación al ceder el esfuerzo que causó la deformación. Por otro lado, si la

resistencia a la fluencia es excedida, el fluido exhibirá un comportamiento líquido. Al igual que la viscosidad, la resistencia a la fluencia depende de las condiciones de la muestra, temperatura, pH, granulometría, etc. En la Tabla N° 2.3, se muestran resistencias a la fluencia típicas para algunas sustancias.

Tabla N° 2.3: Resistencias a la fluencia típicas.

Sustancia	Resistencia a la fluencia (Pa)
Salsa de tomate	15
Yogurt	80
Pasta de dientes	110
Mantequilla de maní	1900
Relaves espesados	30 a 100
Relleno en pasta	250 a 800

Fuente: Boger

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.

Celda de flotación.- Artefacto en el que se realiza la flotación y se obtiene la espuma de minerales.

Concentración.- El proceso por el cual el mineral se separa en concentrados de metal y material de desecho a través de procesos como el chancado, la molienda y la flotación. Los concentrados se envían a una fundición

Concentrado.- Un producto intermedio fino y polvoriento del proceso de molienda formado por la separación de un metal valioso del desperdicio.

Concentradora.- Las instalaciones en las que se procesa el mineral para separar los minerales de la roca madre.

Depósito mineral.- Concentración natural de material valioso que puede ser extraído y vendido con una ganancia.

Exploración.- Prospección, muestreo, manejo, perforación diamantina y otros trabajos comprendidos en la búsqueda de mineral.

Explotación.- Actividades relacionadas con un depósito mineral que empiezan en el punto en que se puede estimar de manera razonable que existen reservas económicamente recuperables y que, en general, continúan hasta que la producción comercial empiece.

Mineral.- Es aquella sustancia sólida, natural, homogénea, de origen inorgánico, de composición química definida.

Muestra.- Una pequeña porción de roca o de un depósito mineral que se toma para poder determinar por ensayo el contenido de metales.

Muestreo.- La selección de una parte fraccional pero representativa de un depósito mineral para el análisis.

Relaves: Material de desecho de una molienda luego de que se ha recuperado los minerales valiosos. Los cambios de precios en los metales preciosos y las mejoras de la tecnología a veces pueden hacer que los relaves adquieran un valor económico y se reprocesen en una fecha posterior.

Represas (estanques) de relaves: Una depresión a un nivel inferior que se utiliza para confinar los relaves, la función primaria de la cual es permitir suficiente tiempo para que los metales pesados se

sedimenten o para que el cianuro se destruya antes de descargar el agua en los cursos de agua locales.

Rescate o recuperación: La restauración de un sitio luego que se ha concluido con la actividad de minado o de exploración

2.4. HIPOTESIS:

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

Si realizamos la evaluación metalúrgica entonces podemos hacer el diseño del espesador de los relaves espesado de la planta concentradora de la Unidad Minera Quiruvilca.

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS:

1. Si realizamos una evaluación metalúrgica entonces podemos hacer el diseño del espesador de relaves espesados mediante tecnologías de espesamiento.
2. Si caracterizamos metalúrgicamente la gravedad específica de sólidos, distribución de partículas, viscosidad y resistencia a la fluencia de los relaves espesados entonces podemos obtener el rango de porcentaje de sólidos en evaluación.

3. Si analizamos el efecto en la dosificación de floculante sobre la velocidad de sedimentación entonces podemos determinar el floculante óptimo y su consumo esperado, además del rango de tasa de alimentación para este material.

2.5. VARIABLES:

2.5.1.VARIABLE DEPENDIENTE

Diseño de espesador de relaves espesados de la planta concentradora.

2.5.2.VARIABLE INDEPENDIENTE

Evaluación metalúrgica.

2.5.3.VARIABLES INTERVINIENTES

Variable independiente

- floculante
- pH
- Espesadores

Variable dependiente

- Relaves espesados

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.1. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El trabajo será **aplicado** utilizando la metodología analítica y deductiva, se tomarán muestras representativas de las aguas del rebose del espesador. Las pruebas experimentales se realizarán en el laboratorio químico metalúrgico empleando un espesador a nivel batch.

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El Diseño empleado en la presenta investigación es el de carácter **experimental**; metodología que permite establecer la relación

existente entre la aplicación de la variable independiente en el proceso y el resultado obtenido, considerado como variable dependiente, teniendo en cuenta para ello el problema principal planteado, y que será desarrollado dentro del contexto de la investigación como experimental - condicionada.

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta los Objetivos de la Investigación y la naturaleza del Problema planteado, para el desarrollo del presente estudio se empleó el Tipo de Investigación “**cuasi experimental**”, porque permite responder a los problemas planteados, para la recuperación del agua de los espesadores de relave, describiendo y explicando las causas - efectos, traducidos en resultados obtenidos de las pruebas experimentales.

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. POBLACIÓN

Como población de estudio lo considero al caudal de agua que ha de ser expulsado mediante relave.

Mediante el espesamiento de partículas sólidas que serán devueltos a interior mina para rellenar los espacios vacíos que queda después de una explotación.

3.4.2. MUESTRA

Como muestra de estudio es la recolección de agua en el rebose del sedimentador en una cantidad de 100 litros en un muestro aleatorio.

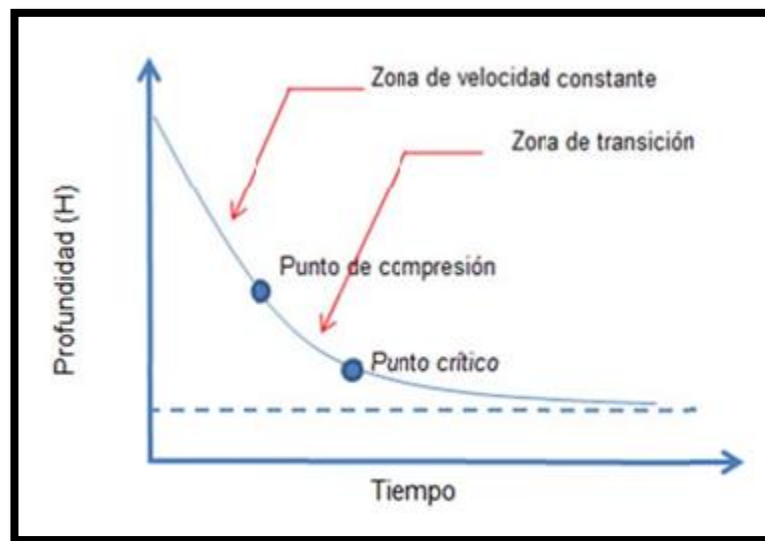
3.5. TALMAGE & FITCH

Estudiaron las zonas de sedimentación, considerando que la tasa de flujo en la zona clara debería ser menor que la tasa de sedimentación de la partícula más pequeña que tiene que ser removida.

Se debe tomar la velocidad de sedimentación correspondiente a las condiciones de máxima área, lo cual se da en el punto de compresión (Figura N° 3.1). En una prueba batch, la masa de sólidos en el cilindro de pruebas está dado por C_0H_0A . Si el tiempo requerido t_u para que todos los sólidos sedimenten a través de la capa de concentración C , entonces C_0H_0A/t_u .

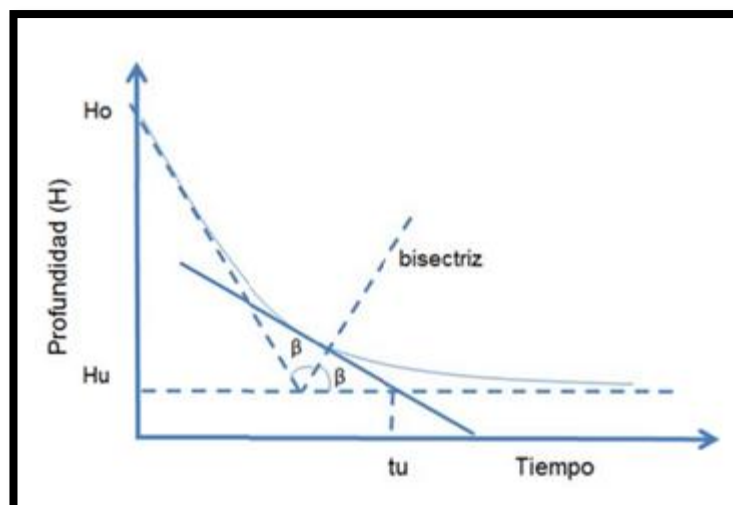
En este momento, el objetivo de esta metodología es determinar t_u , el cual se obtiene fácilmente mediante métodos gráficos, como el método de la bisectriz mostrado en la Figura N° 3.2.

Figura N° 3.1: Representación de los puntos de compresión y punto crítico en la curva de sedimentación.



Fuente: Nuñez

Figura N° 3.2: Método gráfico para el cálculo de t_u para la fórmula de Talmage & Fitch.



Fuente: Nuñez

Teóricamente, los modelos antes presentados deberían arrojar el mismo valor de área unitaria, pero esto no ocurre en la práctica. Por lo general, el método de Coe & Clevenger tiende a subestimar el área del espesador, mientras que el modelo de Talmage & Fitch tiende a sobrestimarlo (Hughes 2000:180). La relación de Coe & Clevenger tiene la falencia de perder precisión si se tratan pulpas con agentes floculantes es por ello que la aproximación de Talmage & Fitch (Talmage 1955) se considera más adecuada, y además tiene la ventaja de que, mientras para el método de Coe & Clevenger se requieren muchas determinaciones de velocidades de sedimentación, con el método de Kynch, es suficiente una única estimación.

3.6. MÉTODO DE SOLIDS SETTLING FLUX

Se define como la masa de sólidos que cruza un plano horizontal en la pulpa por unidad de tiempo y especificada por área unitaria del plano en mención. Los métodos de Coe & Clevenger y Kynch son usualmente suficientes para ser empleados para la generación de datos que este método requiere.

El Solids Settling Flux puede calcularse a partir de una prueba de sedimentación batch, si la velocidad inicial es constante; lo cual es lo usual en casos de bajas concentraciones iniciales y pulpas

uniformemente floculadas. De manera gráfica, el representar el Solids Settling Flux respecto a la concentración de sólidos, se emplea para modelar el proceso de sedimentación continuo.

3.7. JERNKVIST

Método gráfico de Jernkvist, para la determinación de una curva de “Solids Settling Flux” a partir de una prueba de sedimentación tipo batch. Los pasos para aplicar este método se describen a continuación:

1. Invertir la gráfica de sedimentación (altura vs. tiempo) respecto al eje del tiempo.
2. Extender el eje Y mediante una línea vertical, la cual será el nuevo eje Y de la nueva curva “Solids Settling Flux”.
3. Trazar una línea horizontal para formar el eje X de la nueva curva “Solids Settling Flux”.
4. Dejar que la concentración inicial de la pulpa (C_0) sea colocada en el eje de concentraciones. A partir de C_0 dibujar una línea vertical.
5. A través de H_0 dibujar una línea horizontal que indique la concentración.
6. Trazar una tangente a la curva de sedimentación. A través del origen de la curva de “Solids Settling Flux” dibujar una paralela a la tangente antes determinada.
7. A partir de la intersección de la tangente del punto 6) con el eje Y trazar una horizontal que corte la vertical C_0 en el punto H_1 . Unir el origen O' a H_1 y proceder a cortar el eje X en C_1 .

8. Trazar una línea vertical a través de C1 para cortar la línea OF en el punto 1. Este punto corresponde a un punto de la curva “Solids Settling Flux”.
9. Repetir pasos desde 6 a 8 para la obtención de varios puntos los cuales al conectarse representan la curva “Solids Settling Flux”.

3.8. REQUERIMIENTO DE TORQUE

El torque (T_o) requerido por el mecanismo de la unidad del espesador puede calcularse mediante la ecuación 11:

$$T_o = D_e * Z \quad (11)$$

Donde:

- T_o : Máximo torque operativo en lb.pie
- D_e : diámetro del espesador en pies
- Z : Es un factor dependiente del tipo de material, distribución de partículas, tipo de espesador, reología, etc. De manera general, según la aplicación, tenemos los rangos de valores que se muestran en la Tabla N° 3.1.

Tabla N° 3.1: Valores típicos de factor Z para cálculo de torque.

Tipo de trabajo	Z
Trabajo liviano (Ligth duty)	5 a 10
Trabajo mediano (Medium Duty)	10 a 20
Trabajo pesado (Heavy Duty)	20 a 35
Trabajo muy pesado (Extra Heavy Duty)	≥ 35

Fuente: MIP

3.9. VELOCIDAD DE LA CAJA DE ENGRANAJES

Las revoluciones de la caja de engranajes (N) se calculan con la Ecuación 12 (MIP 2009):

$$N = Vr / De \quad (12)$$

Donde:

N: Velocidad de la caja de engranajes, rpm

Vr: Velocidad periférica de la rastra (m/min)

De: Diámetro de espesor (m)

3.9.1.MOTOR ELÉCTRICO

La potencia del motor (Po) requerido se calcula con la Ecuación 13 (MIP 2009):

$$N = 2 * T / \% \text{ Eff} * 1000 \quad (13)$$

Donde:

- N: Velocidad de la caja de engranajes
- T: Torque (Nm)
- %eff: Eficiencia

3.10. DISEÑO DE ESPESADORES POR SIMULACIÓN MATEMÁTICA E INVESTIGACIONES ACTUALES.

De acuerdo a Gladman a la fecha existen numerosas ecuaciones y algoritmos matemáticos para la simulación del comportamiento de un espesador. La desventaja principal de estos algoritmos es que requieren una gran cantidad de datos de entradas para poder ser resueltos, gran cantidad de tiempo de computación sobre un amplio rango de condiciones operativas y además no son aún capaces de reproducir con exactitud todas las aplicaciones con precisión, siendo necesario ser ajustados según sea el caso y de acuerdo a pruebas realizadas previamente en campo. Ejemplos de este modelamiento, podemos encontrar en los trabajos de Burger (2000), Quispe (2000), Garrido (2003), y Font (1993).

Un motivo de la imprecisión de resultados con la realidad, es atribuida a las condiciones que no pueden ser medidas con precisión en laboratorio, estos son el efecto de la rastra y de corte del material dentro del espesador por efectos de la altura de la capa consolidada. El primero ayuda en gran medida la consolidación de sólidos y permite la liberación de agua, mientras que el segundo está involucrado a cambios en la estructura del flóculo y altos tiempos de residencia. Farrow (2000a) a cargo del AJ Parker Cooperative Research Center en Australia han venido

efectuando desde el año 1988 numerosos proyectos de investigación para la mejora de las tecnología de espesamiento, los cuales han estado centrados en el estudio del efecto de la intensidad de mezcla del floculante con la pulpa, de las rastras, etc. sobre las propiedades de la descarga y rebose de espesadores a nivel industrial. Para ello emplean modelos computacionales de dinámica de fluidos tanto a nivel laboratorio como escala industrial, con resultados tan positivos que han sido capaces de duplicar la capacidad de producción de espesadores industriales basado en estas observaciones. Entre las herramientas empleadas para la caracterización tenemos, entre otros:

1. Cuantificación del peso molecular de polímeros de grandes cadenas, así como su caracterización mediante las técnicas de "fraccionamiento flow field-flow" en remplazo de las técnicas de cromatografía convencionales.
2. Magnificación visual del rebose del espesador, con lo cual es posible diagnosticar el porqué de la presencia de sólidos en el mismo, tales como baja floculación, floculante sin dispersar, ruptura del agregado, entre otras.
3. Prototipos para el análisis de pozos de alimentación (feed wells) y dinámica de fluidos para asegurar la agitación necesaria para óptima floculación, sin ser tan alta que pueda romper los flóculos ya generados.

3.11. PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN UNA OPERACIÓN DE ESPESAMIENTO

Los parámetros más importantes para la operación de un espesador son:

1. Tasa de alimentación,
2. Tamaño y forma de las partículas,
3. Diferencia de gravedad específica entre sólido y líquido
4. Tipo, dosificación y forma de aplicación del floculante
5. Viscosidad
6. Temperatura del flujo de alimentación
7. Arreglo de alimentación
8. Velocidad de rotación de rastra

3.12. TRANSPORTE HIDRÁULICO DE SÓLIDOS

El transporte hidráulico de sólidos por tuberías hace su aparición por el año 1850, durante la fiebre del oro en California, pero fue recién en el 1914 en Inglaterra en que tuvo su primera aplicación industrial a largas distancias mediante el transporte de 25t/h de carbón en una tubería de 8" de diámetro en una distancia de 500 m. "En la actualidad se han construidos mineroductos de colosales longitudes, mayores de 300 Km, no existiendo restricciones fuertes para el tamaño de los sólidos, los cuales pueden alcanzar algunas

pulgadas de diámetro”. Si bien el transporte hidráulico, involucra tanto el transporte por gravedad como a presión, en este estudio no enfocaremos en el desarrollo de esta última dadas las condiciones del relave espesado a transportar, las cuales permiten la aplicación de las bondades del transporte en tuberías bajo presión.

3.12.1. VELOCIDAD CRÍTICA

Se define la velocidad crítica como aquella velocidad en la cual las partículas contenidas en la pulpa empiezan a sedimentar. Por lo tanto el diseño del sistema de transporte de cualquier pulpa debe contemplar operar a una velocidad por encima de esta velocidad crítica, de tal manera que prevenir la sedimentación y obstrucciones en la tubería.

A pesar de que se conoce que al aumentar la concentración de sólidos (a una consistencia de pasta) la pulpa adquiere propiedades de un fluido no sedimentable, sin embargo el relave espesado, en las condiciones en las que se plantea transportar en este estudio, no es ajeno a experimentar velocidad crítica. Tal como se indicará más adelante, la reología de la pulpa espesada en este estudio a la descarga del espesador presenta características que la localizan en una “zona de

transición” entre las pulpas sedimentables y las no sedimentables.

De experiencia de Pullum 2007, se recogen las siguientes conclusiones, referidas a materiales de muy cercanas características a las planteadas en este estudio:

1. “A pesar que al mismo tiempo que el flujo turbulento disminuye a medida que se aumenta la concentración de sólidos resultando en condiciones de flujo laminares, partículas gruesas podrían sedimentar”.
2. “Recientes investigaciones con pulpas espesadas del tipo tratadas en este estudio han mostrado que podrían no comportarse completamente en una manera completamente no sedimentable fluyendo homogéneamente en una tubería, ni siquiera a muy altas concentraciones.”

Por lo tanto se asume que el relave espesado en este caso presenta velocidad crítica, la cual depende de la concentración de los sólidos, granulometría de las partículas sólidas, densidad relativa de las partículas sólidas, pH de la pulpa, y del diámetro e inclinación de la tubería. Para diseño, se asumirá como mínima la siguiente relación: Velocidad de flujo $\geq 1,2$ Velocidad crítica Ante posibles oscilaciones del sistema, todo diseño de transporte de pulpas deberá prever conexiones de lavado (flush) en aquellos puntos críticos del sistema donde asentamiento de sólidos pueda ocurrir.

3.12.2. MODELOS PARA PREDECIR LA VELOCIDAD CRÍTICA

Se disponen de muchas relaciones matemáticas para la determinación de la velocidad crítica. Algunos de los modelos tradicionales para predecir la velocidad crítica se mencionan a continuación:

a) Fórmula de Vocadlo y Sagoo

$$V_c = 8,4 \% v^3 \sqrt{(SG_s - 1)g D_i W} \quad (14)$$

b) Fórmula de Durand

Se emplea para caso de materiales de granulometría uniforme y con una concentración de sólidos en volumen hasta 30%. De acuerdo a Rayo (1993) esta ecuación ha sido exitosa en el caso de granulometrías gruesas ($d_{50} > 200 \mu\text{m}$) y tuberías con $D \leq 8''$.

$$V_c = F_L \sqrt{(2g D_i * (SG_s - 1))} \quad (15)$$

$$F_L = f(d_{50} * \% v) \quad (16)$$

Donde:

- Di : Diámetro interior de la tubería
- FL : Parámetro de Mc. Elvain & cave
- Vc : Velocidad crítica
- SGI : Gravedad Especifica del líquido
- SGm : Gravedad Especifica de mezcla

SGs : Gravedad Especifica de sólidos
 g : Aceleración de la gravedad

c) Fórmula de Durand modificada

Se aplica para casos de pulpas de baja concentración normalmente hasta concentraciones en volumen hasta 30%. Sin embargo, es factible la extrapolación hasta pulpas hasta ≈35%v. Según Rayo (1993) la fórmula de Durand modificada ha demostrado buen ajuste para casos de pulpas con granulometría gruesa ($d_{50} > 200\mu\text{m}$) y tuberías o canaletas con $D > 8''$

$$VL = 1.25 F_L \sqrt[4]{2 * g * Di * (S - 1)} \quad (17)$$

d) Fórmula de Wasp

Según Rayo (1993) ha demostrado buen ajuste para pulpas de granulometría fina ($d_{50} < 200\mu\text{m}$) y tuberías de cualquier diámetro.

Debido a la mayor aceptación internacional de la fórmula de Wasp en el diseño de transporte de pulpas espesadas, y además por ser menos conservadora que las anteriores, será ésta la empleada para nuestros cálculos.

$$Vc = F_c \sqrt{2 * g * D * (SGs - 1) \frac{d_{50}}{Di}} \quad (18)$$

$$F_L = 3,322 \% v^{0,21} \quad (19)$$

3.12.3. VELOCIDAD DE FLUJO

Por prevenir el exceso de erosión, se limitará la velocidad de flujo (V) por debajo de las siguientes velocidades, según el caso:

1. $V \leq 4.0$ m/s: para tuberías de HDPE
2. $V \leq 4.5$ m/s: para tuberías de acero revestido en HDPE
3. $V \leq 6.0$ m/s: para tuberías de acero revestido en goma

3.12.4. VELOCIDAD DE TRANSICIÓN

Se define la velocidad de transición (V_t) como aquella que representa el paso del régimen laminar hacia el régimen turbulento, y viceversa. Es decir que, a dicha velocidad, ninguno de estos dos regímenes es el predominante. Para nuestro caso de aplicación, se empleará la Ecuación 20 desarrollada por Slatter (2005: 68) para pulpas semi-espesadas:

$$V_t = K_t \left(\sqrt{\frac{r_0}{\delta}} \right) \quad (20)$$

Donde:

V_t = Velocidad de transición

K_t = Factor de Slatter

T_0 = Resistencia a la fluencia

δ = Densidad

La experiencia, tanto en pulpas convencionales como semi-espesadas, ha demostrado que es preferible operar en régimen turbulento, excepto en el caso de transporte de pasta no segregable, debido a que operar en regímenes laminares presenta serios problemas. Esto es porque al no presentarse corrientes turbulentas que permitan la re-suspensión de partículas gruesas, todas las partículas sólidas susceptibles a sedimentar lo harán en el fondo de la tubería permaneciendo y aumentando en número hasta finalmente bloquear la tubería (Slatter 2005: 68). Es por ello que una práctica ingenieril en el caso de pulpas convencionales y hasta pulpas semi-espesadas, como nuestro caso, es el diseño de sistemas que permitan velocidades nominales superiores a 1,2 veces la velocidad de transición.

3.12.5. ALTURA DINÁMICA TOTAL

La altura dinámica total (TDH, por sus siglas en inglés) es la presión, expresada en metros del fluido que es transportado, que se debe desarrollar para trasladar el fluido en mención desde un punto A hasta un punto B. La expresión para

calcular la altura dinámica total del sistema se calcula mediante la Ec. 21.

$$TDH = \Delta H + \Delta P + H_f * L + \sum \Phi \quad (21)$$

Las componentes ΔH , ΔP y H_f son las de mayor impacto en la determinación del TDH, siendo la estas: la diferencia en elevación, la diferencia de presión y la fricción ocasionada por el fluido a través de la tubería respectivamente. Por otro lado, la componente Φ representa pérdidas menores, generadas por la presencia de válvulas y accesorios (fittings) en la tubería. Las pérdidas de carga menores serán calculadas considerando el coeficiente de resistencia K de tablas (Ej. Cameron – Hydraulic Data). En etapas iniciales del proyecto, en las que no se tenga pleno conocimiento del número de accesorios involucrados, se asumirá un valor de 5% del total de pérdidas de carga por fricción (en tuberías menores a 500m longitud). A menos que se indique lo contrario, se considera como tolerancia de la caída de presión a través de una válvula modulante (de control) sea el mayor valor entre 10 psi ó 20% de la caída de presión variable del sistema.

3.12.6. FACTOR DE CORRECCIÓN DE ALTURA DINÁMICA TOTAL

Con el objeto de conocer la performance real de las bombas de pulpa, es necesario realizar una corrección por la presencia de sólidos en el fluido, debido a que sin excepción, todas las curvas de bombas son referidas al agua limpia. La altura dinámica total calculada (TDH) será corregida por un factor (Hr), de acuerdo con la Ec. 22.

$$TDH_w = \frac{TDH}{Hr} \quad (22)$$

Donde:

TDH_w = Altura dinámica total referida al agua

TDH = Altura dinámica total referida a pulpa

Hr = Factor de corrección por contenido de sólidos

Los siguientes puntos deberán ser considerados para el diseño de bombas de pulpa:

1. El máximo flujo de operación, incluyendo fluctuaciones, no deberá exceder el 75 % de la capacidad total de la bomba.
2. La potencia nominal (extraída de tablas) deberá ser al menos 10% mayor que la potencia absorbida calculada.
3. Para prevenir el desgaste prematuro del impulsor, se considerará una velocidad del impulsor en la periferia (tip velocity) no mayor a 40 m/s.

3.12.7. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN PULPAS ESPESADAS

Para determinar las pérdidas por fricción en el caso de pulpas semi-espesadas, se empleará la ecuación de Darcy (Ec. 23-26), y la relación de Darcy & Dadia para el cálculo del factor de fricción. Este criterio no aplica para “pastas”, definidas como aquellas con una resistencia a la fluencia mayor a 100Pa, pero es usado en cálculos de relaves espesados.

$$H_f = f_T \left(\frac{L}{D_i} \right) \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \quad (23)$$

$$f_T = 10^\alpha * N_r^{-0,193} \quad (24)$$

$$\alpha = -1,378 [1 + 0,146 * \exp(-2,9 * 10^{-5} * He)] \quad (25)$$

$$H_e = \frac{D_i^2 * \delta * \tau_0}{\mu^2} \quad (26)$$

Donde:

Hf = Resistencia a la fluencia

He = Número de Hedstron

Nr = Número de Reynolds

P = Densidad

Ff = Factor de fricción

Gg = Aceleración de la gravedad

L = Longitud

D = diámetro interior de tubería

μ = Viscosidad dinámica

V = Velocidad

3.12.8. SELECCIÓN DE TUBERÍAS. ESPESOR MÍNIMO REQUERIDO

La selección de la tubería apropiada para cualquier aplicación de transporte de sólidos se basa, además de la velocidad mínima requerida del fluido transportado, en la presión del sistema y los requerimientos de espesor mínimos para garantizar estabilidad mecánica a lo largo de la vida del proyecto. El espesor del diseño de tubería se calcula mediante la ecuación 27:

$$E_{\text{diseño}} = E_{\text{min}} + WR * t \quad (27)$$

Donde:

WR = Tasa de desgaste

t = Tiempo de vida del proyecto

El espesor mínimo es el mayor del espesor requerido para condiciones normales o de transición (e) o del Espesor requerido por estabilidad estructural, 4 mm.

Por otro lado, las tuberías deberán ser analizadas contra onda de presión hidráulica, provocada por un súbito cambio de momentum del fluido dentro de la tubería (ariete hidráulico o golpe de ariete). A menos que se diseñe algún medio de alivio en el sistema, la presión del ariete sumada a la presión de operación deber ser menor que la presión del diseño de la tubería seleccionada. La presión máxima de trabajo (P) será calculada mediante la ecuación de Barlow's (Ec.28):

$$P = \frac{2 \cdot S_t \cdot E \cdot F}{D_e} \quad (28)$$

A partir de la relación anterior, podemos despejar el espesor estructural mínimo (Ec.29):

$$e_{(estructural)} = \frac{P \cdot D_e}{2 \cdot S_t \cdot F \cdot E} \quad (29)$$

Donde:

F_f = Factor de diseño respecto al esfuerzo de fluencia según código. Usualmente entre 0,72 a 0,80 para tuberías de

transporte de líquidos. Para condiciones de sobrepresión por golpe de ariete el transporte de líquidos. Para condiciones de sobrepresión por golpe de ariete el valor será 0,90.

St = Esfuerzo de tensión ó Límite de fluencia del material (psi)

P = 1,1 veces la presión máxima según Clase ANSI

E = Factor de seguridad basado en tipo de soldadura (Tabla N° 3.2).

Tabla N° 3.2: Factores de corrección por soldadura.

Tipo de soldadura	E
Sin costura	1,0
Soldada por resistencia eléctrica	1,0
Soldada a tope en horno	0,6
Soldada por arco sumergido	1,0
Tubería sin identificación con diámetro mayor de 101mm	0,8
Tubería sin identificación con diámetro menor de 101mm	0,6

Fuente: Dekker

La tasa de desgaste estará compuesta por el componente de desgaste por abrasión por año (WR_a) y la tasa de corrosión por año WR_b.

$$e = WR \quad (30)$$

$$WR = WR_a + WR_b \quad (31)$$

Donde:

WR_a : Tasa de desgaste por abrasión por año

WR_b.: Tasa de corrosión por año

Debido a la cantidad de variables de pulpa que afectan la tasa de desgaste, tales como distribución granulométrica, abrasividad (Índice de Miller), densidad, forma de partícula, velocidad, concentración de pulpa, etc, no existen ecuaciones para estimar la tasa de desgaste eficientemente, por ello la tasa de abrasión deberá ser determinada mediante pruebas experimentales. Sin embargo, la tasa de desgaste puede ser estimada de acuerdo con las velocidades de flujo y el material de la tubería, de acuerdo con la Tabla N° 3.3.

Tabla N° 3.3: Tasas de desgaste por abrasión. Tomado de Rayo (1993: 66-67)

Velocidad (m/s)	Tasa de abrasión (mm/año)		
	Acero al carbono		
	18" y 20"	24"	HDPE
2.0	0.4	0.5	0.4
2.5	0.6	0.7	0.6
3.0	0.9	1.0	1.0
3.5	1.2	1.3	1.4
4.0	1.5	1.7	1.8
4.5	1.9	2.1	-

Fuente: Elaboración propia

3.13. ESPESOR DE DISEÑO DE TUBERÍA

El espesor de diseño de la tubería debe ser mayor al considerado por desgaste durante el tiempo de vida útil de proyecto (V_u) y el espesor mínimo estructural, se presenta en la Ec. 32.

$$e_d > WR * V_u + e_s \quad (32)$$

Donde:

Vu : Vida útil del proyecto

Ed : Espesor de diseño

3.14. BOMBEO

La potencia absorbida de bombeo se calculará por la Ecuación 33.

$$P_w = \frac{Q * TDH * \delta}{0,75 * P_{eff} * M_{eff}} \quad (33)$$

Donde:

Pw = Potencia absorbida

Q = Caudal

P = Densidad

TDH = Altura dinámica total

Peff = Eficiencia de la bomba

Meff = Eficiencia del motor

La potencia absorbida deberá ser corregida por la densidad relativa del aire ambiente en el sitio para las condiciones de altitud y temperatura del proyecto, de acuerdo con la Tabla 14.

Tabla 14: Densidad relativa del aire ambiente en el sitio.

Cota (m)	Presión B cmHg	Temperatura Ambiente (° C)					
		10	15	18	25	30	35
0	76,0	1,053	1,034	1,024	1,000	0,983	0,967
200	74,1	1,027	1,009	0,998	0,975	0,959	0,943
600	70,5	0,976	0,959	0,949	0,927	0,912	0,897

1000	67,0	0,928	0,912	0,903	0,882	0,867	0,853
1500	63,0	0,872	0,857	0,848	0,828	0,814	0,801
2000	59,1	0,819	0,805	0,796	0,778	0,765	0,752
2500	55,5	0,769	0,756	0,748	0,730	0,718	0,707
3000	52,1	0,722	0,710	0,702	0,686	0,675	0,664
3500	49,0	0,678	0,667	0,660	0,644	0,634	0,623
4000	46,0	0,637	0,626	0,620	0,605	0,595	0,585
4500	43,2	0,598	0,588	0,582	0,568	0,559	0,550
4800	41,6	0,576	0,566	0,560	0,547	0,638	0,529

Fuente: Worldlingo

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADO

4.1. DIRECTRICES DEL DISEÑO

Una de las principales directrices del Estudio de Pre-factibilidad es maximizar la recuperación de agua a través del espesamiento de relaves, manteniendo una reología en los relaves espesados adecuada para su transportabilidad por bombeo centrífugo. De las pruebas de sedimentación y reología, realizadas a nivel laboratorio, se estima que la descarga de los espesadores puede alcanzar 66% de sólidos sin dificultad, a la vez que la descarga exhibe una resistencia a la fluencia sin cizallar de 150 Pa, y cizallada alrededor de 70 Pa. Por medio de la información recogida por fabricantes, GIW y Warman Pumps, acerca de los límites de bombeo por bombas centrífugas y referencias de proyectos similares, se sabe que el límite de transportabilidad de estos equipos se encuentra alrededor de 100 Pa. Es por ello que un sistema de cizallamiento forzado externo para los relaves espesados es esencial para pretender reducir los niveles de resistencia a la fluencia a la descarga del espesador, antes de su ingreso a las bombas centrífugas.

Las principales directrices para el diseño se resumen en las siguientes secciones:

4.1.1. ESPESAMIENTO

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en laboratorio, se han seleccionado cuatro espesadores de alta compresión (HCT) de 41m de diámetro para producir una descarga de 66% de sólidos. Respecto a la concentración de 8% sólidos requerida en la alimentación, es factible lograr este bajo porcentaje de sólidos mediante los sistemas de auto-dilución forzada ofrecidos por la mayor parte de proveedores de estos equipos.

Por los requerimientos de alto porcentaje de sólidos en la descarga, se calcula que la altura del tanque (o pared del espesador) se encuentre alrededor de cinco metros. Es importante mencionar que una mayor altura de pared implicaría la posibilidad de obtener mayores alturas de cama y por ende mayor compactación. El resultado sería una descarga de alta resistencia a la fluencia imposible de ser bombeado por bombas centrifugas, es por ello que una altura de cama mayor es indeseable para esta aplicación.

Respecto al dimensionamiento de los espesadores se empleara un diseño conservador teniendo como base los resultados de las pruebas de sedimentación en laboratorio.

4.1.2. ESPESADORES DE ÚLTIMA GENERACIÓN

En el presente Estudio de Prefactibilidad, se ha tomado en consideración dos tendencias de espesamiento vigentes: la de cama profunda (DCT) y la tecnología de alta compresión (HCT), siendo ésta última la seleccionada; debido a la producción de una descarga con una reología favorable para su transporte en tubería.

Para este estudio 3 tecnologías de espesamiento, los cuales incluyen tres sistemas de auto-dilución distintos, serán evaluadas desde el punto de vista técnico: FLSmith, Outotec y Delkor. El propósito de la evaluación es mostrar las ventajas y desventajas de los espesadores ofrecidos en el mercado actualmente, así como los parámetros que deberán ser tomados en cuenta al momento de seleccionar equipos de este tipo.

A continuación en la Tabla N° 4.1, se muestra las características técnicas de las tecnologías propuestas, por los

tres principales proveedores de espesadores, en la que se observa que las características principales de auto-dilución, eficiencia de floculación, rastras y equipo motriz adecuados para el manejo de pulpas espesadas, y sistemas de cizallamiento, son cubiertas.

4.1.3. OUTOTEC

1. Las transmisiones (Drive) usadas en los espesadores Outotec se basan en cajas de engranajes planetarias, a diferencia de los sistemas de piñón – corona que usan la mayoría de marcas competidoras.
2. Una transmisión planetaria puede trabajar en ambos sentidos de rotación sin ninguna modificación mecánica. Esta característica es de vital importancia por si se presentara en la operación algún atascamiento.

Tabla N° 4.1: Comparativo entre tecnologías de espesamiento: Outotec, FLSmidth y Delkor.

PARAMETRO	PROVEEDOR		
	OUTOTEC	FLSMIDTH	DELKOR
Sistema de Dilución	Sistema "Autodil": Compuertas de auto-dilución en el pozo de alimentación (FeedWell). Dilución forzada con el sistema "Turbodil" para lograr altas diluciones (4-6% de sólidos).	Sistema "E-Duc", dilución por succión tipo "Venturi" que se complementa con el sistema forzado "P-Duc" para lograr altas diluciones (4-6% de sólidos).	Dos pozos concéntricos, el exterior con cortes en tipo "V", dilución a través del 100% del perímetro del pozo de alimentación, regulable.
Sistema de Accionamiento	Hidráulico	Eléctrico	Eléctrico o hidráulico
Transmisión	Caja de engranajes planetarias	Sistema piñón corona	Sistema piñón corona
Rotación	Ambos sentidos de rotación.	Posibilidad de revertir la rotación.	No define
Torque	Monitoreo por medio de sensor electrónico.	Monitoreo por medio de sensor electrónico.	Monitoreo por medio de sensor electrónico.
Rastras	"Low Drag" de bajo perfil, tubo triangular, sellado.	Dos largas y dos cortas con suficientes platinas para el raspado de los relaves sedimentados.	Rastras que permiten la compactación de relaves y ascenso de solución por capilaridad.
Isaje de Rastras	Con pistones hidráulicos	Con pistones hidráulicos	Mecanismo central hidráulico.
Panel de Control	Basado en PLC	Basado en PLC	Basado en PLC
Adición de Floculantes	En el pozo de alimentación.	Varios puntos: la alimentación, pozo, etc.	Matriz de dosificación en varios puntos del pozo de alimentación.

Fuente: Elaboración propia

3. El monitoreo del torque del sistema Supaflo se realiza por medio de un sensor electrónico de la presión hidráulica existente en el sistema de mando, lo cual prevé de una medida muy precisa y confiable del torque, sin importar el sentido de la rotación. Esto permite contar con diversos sistemas de protección redundantes que evitan todo riesgo costoso y daños irreversibles.
4. Las rastras son del diseño patentado 'Low Drag', de bajo perfil que consisten en un tubo triangular sellado. Al ser sellado e interiormente hueco, ejerce una fuerza de flotación, debido a la alta densidad de la pulpa ya sedimentada.
5. Los sistemas de mando y de elevación de rastras de los espesadores Supaflo de Outotec, están accionados por motores hidráulicos, a diferencia de los clásicos motoredutores de otros sistemas. El control es automático mediante PLC.
6. El sistema de elevación de rastras está basado en pistones hidráulicos, los cuales son activados por una bomba hidráulica que está montada en el mismo eje que la bomba principal que se alimenta al motor hidráulico. Vale decir, se trata de una bomba duplex.
7. Los paneles de control de nuestros espesadores, están basados en PLC, de manera que posteriores trabajos de

automatización de los espesadores se hace mucho más sencillo y barato.

8. El sistema de alimentación, tiene como característica el renombrado pozo de alimentación 'FlocMixer', que cumple las siguientes funciones:
 - Autodilución, si es necesaria
 - Tiempo de residencia y contacto floculante-pulpa; y
 - Mezcla homogénea de la pulpa y floculante.

9. Una pulpa diluida trae consigo dos importantes ventajas:
 - Sedimenta más rápido.
 - Consumo menor de floculante.

4.1.4. TRANSMISIÓN

1. La transmisión usada consiste de una corona principal de acero tratada térmicamente, cuatro piñones de acero aleado, cuatro reductores planetarios y cuatro motores con variador de velocidad que permite variar la velocidad de la rastra para optimizar la velocidad de desaguado. El mecanismo puede rotar en el rango de 0,030 a 0,075 rpm, normalmente a 0,06 rpm.

2. Todos los componentes de los engranajes son sellados en cajas con baño en aceite.
3. El sistema electrónico de control de torque balanceado es programado por FLSmith para cumplir con los requerimientos del sistema de transmisión de la rastra, controlar el torque, arranque de la rastra y control de la velocidad variable. Es más eficiente que el sistema hidráulico. Permite un arranque y parada suave, elimina el mantenimiento de bombas hidráulicas, válvulas, filtros, etc.
4. El panel de control NEMA 4X viene con el indicador de torque, botoneras, alarmas.
5. La altura de la pared del tanque es de 5,3 m que permite la compactación de los relaves a los valores especificados.
6. El ángulo de la base del espesador es 15 grados para facilitar el manipuleo de la rastra.
7. La rastra tiene dos brazos largos y dos cortos con suficientes blades para raspar el piso dos veces por revolución. Las rastras están equipadas con varillas de acero verticales para mejorar el flujo de agua liberada que asciende y se dirige hacia la canaleta del rebose.
8. Sistema de dilución E-Duc que se complementa con el P-Duc suministra una dilución variable de la alimentación de

la pulpa al espesador con la solución sobrenadante. El flujo diluido es mezclado con el floculante para que entre floculado a la foza de alimentación.

9. El sistema de elevación de las rastras para aliviar el torque es opcional.

4.1.5. DISEÑO DE RASTRA

1. Diseño de rastras de bajo perfil que permiten generar altas densidades en la descarga a bajos torques.
2. El sistema de accionamiento por una unidad hidráulica que acciona un conjunto de motores hidráulicos hacia un conjunto de reductores planetarios-piñones.
3. El principio del diseño de accionamiento no requiere servicio al engranaje corona.
4. Los accionamientos Delkor pueden ser implementados con sistema reversible y velocidad variable.
5. Para el sistema de levante, hay un conjunto de pistones hidráulicos que son activados en caso que el torque sobrepase 60% de solidos del diseño; el control es automático mediante PLC.
6. En las tuberías no sumergidas de alimentación el mantenimiento se hace con mayor facilidad, y permite su rotación alargando la vida útil.

7. La tubería de alimentación descarga a un aliviador de presión mediante el uso de una pieza de absorción de energía y una canaleta de alimentación que permite conseguir baja turbulencia y perfil tangencial al interior de la fosa de alimentación.
8. El sistema de auto-dilución regulable Delkor, permite la entrada del líquido sobrenadante al interior de la fosa de alimentación a través del 100 % del perímetro del anillo. Se afirma que el sistema V permite utilizar las más bajas dosificaciones de floculante. No genera turbulencia.
9. La alimentación del floculante en la fosa de alimentación es mediante una matriz de dosificación.

4.1.6. ALTERNATIVAS PARA EL MONTAJE DE ESPESADORES

En la Tabla N° 4.2, se presentan las ventajas y desventajas entre la opción de montaje de los espesadores sobre terreno o sobre patas metálicas. Para este proyecto, de manera conservadora se utilizarán espesadores montados sobre patas, ya que este presentan mayor espacio para equipos complementarios, versatilidad en cuanto a mantenimiento, y ofrecen mayor capacidad de maniobrabilidad en la zona de su descarga, en comparación al ofrecido por túneles estrechos inherentes a espesadores montados sobre terreno.

4.1.7. REOLOGÍA

Como se mencionó, la resistencia a la fluencia no cizallada de los relaves espesados a 66% de sólidos se esperan se encuentre entre 120-150 Pa. Un proceso de cizallamiento permitirá disminuir estos valores a niveles que permitan su bombeo centrífugo entre 50 a 60 Pa.

4.2. DISPONIBILIDAD DE AGUA FRESCA

El agua fresca necesaria para la operación de la planta solo será necesaria durante el arranque de las operaciones. Una vez, se obtenga rebose de adecuada calidad (sólidos en suspensión por debajo de 50 ppm) en los espesadores, esta agua se emplearía como agua de proceso para dilución y preparación de floculante.

El exceso de agua será considerada finalmente agua recuperada la cual será enviada a un punto específico, mediante bombeo.

Tabla N° 4.2: Alternativas para el montaje de espesadores.

Item de análisis	Propósito	HCT sobre terreno		HCT sobre patas	
		Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Paredes de acceso al mecanismo	Altura lateral y cónica	Menor altura desde el terreno	Ninguna	Altura alta desde el terreno para maniobras	Mayor altura para grúa y polipasto de mantenimiento
Alimentación, distribuidor y tuberías	Distribución por gravedad	Menor altura para ubicar el distribuidor y tuberías	Ninguna	Ninguna	Mayor altura para ubicar el distribuidor y tuberías
Tanque colector de rebose	Volumen de agua para lavado de tuberías	Ninguna	Mayor diámetro	Mayor volumen por altura	Ninguna
Área de descarga	Ubicación de equipos	Ninguna	Espacio reducido	Amplio espacio visual y ambiental	Ninguna
Acceso al área de descarga	Mantenimiento y servicios	Ninguna	Por túneles estrechos	Por superficie	Ninguna
Bombas de descarga	Para recirculación al cono y transferencia	Ninguna	Espacio reducido para las bombas	Amplio espacio para arreglo mecánico	Ninguna
Bombas sumidero	Limpieza de derrames y drenajes	Ninguna	Espacio reducido a entrada de túneles	Amplio espacio para ubicación	Ninguna
Bombas de sello	Alta presión para sello de bombas	Ninguna	Lejos fuera de túneles por espacio reducido	Amplio espacio cerca de puntos de ubicación	Ninguna
Tuberías de descarga	Transferencia a tanques de bombeo	Ninguna	Por túneles estrechos	Espacio para arreglo conveniente	Ninguna
Líneas de agua/aire	Para instrumentos, limpieza y mantenimiento	Ninguna	Por túneles estrechos	Espacio para arreglo conveniente	Ninguna
Energía y CCM	Cables de energía para control de motores	Ninguna	Ambiente húmedo en túneles para CCM	CCM en superficie	Ninguna

Drenajes mayores	Derrames imprevistos	Ninguna	Dirigido por túneles	Dirigido por canales sobre superficie	Ninguna
Salidas de emergencia	Accidentes no previstos	Ninguna	Por túneles y/o escaleras de desalojo	Amplia en direcciones	Ninguna
Tanques de descarga	Colectores de relave espesado para disposición	Ninguna	Mayor cota desde bombas en túneles	Menor cota desde bombas	Ninguna
Desvíos de alimentación para los espesadores	Derivar total o parcialmente a los espesadores	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna

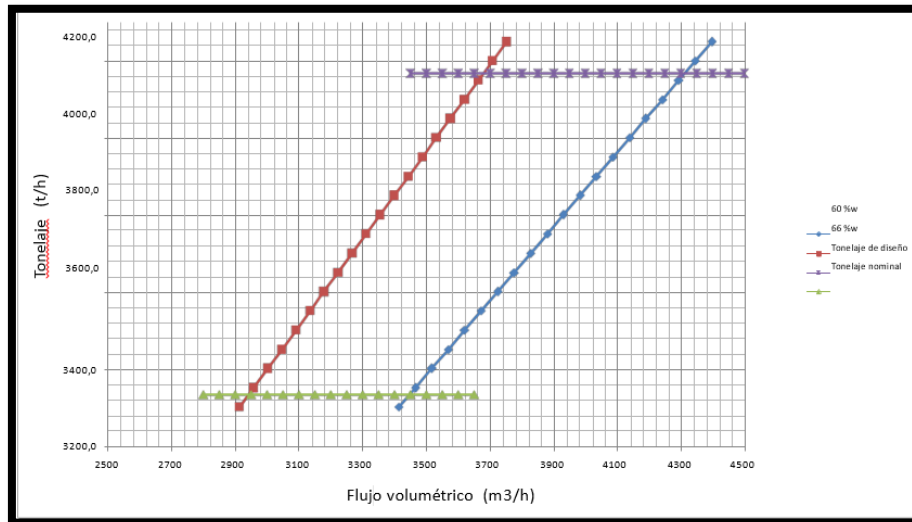
Fuente: Elaboración propia

Los requerimientos energéticos de este bombeo varían de acuerdo a la distancia, elevación, flujos, etc. Con el propósito de no introducir este costo operativo como inherente a una planta de espesamiento como la propuesta en este estudio, el costo ocasionado por bombeo de agua recuperada se considerará independiente. En aquellos casos que se requiera agua de bajo contenido de sólidos en suspensión, como por ejemplo en el agua de sello de bombas, se usará filtros en línea de tipo Amiad.

4.3. ANÁLISIS HIDRÁULICO

En base a los criterios de diseño del proyecto y considerando posibles fluctuaciones del sistema en términos de porcentaje de sólidos (60% a 66% de sólidos) se construye el rango operativo en la Figura N° 4.1. Este gráfico representa los límites operacionales del sistema bajo estudio, donde el área interna delimitada es el rango de trabajo. Las líneas horizontales inferior y superior representan el valor nominal y diseño de bombeo en toneladas por hora, mientras que las líneas oblicuas representan el contenido de sólidos en porcentaje en peso. La utilidad de este gráfico es definir las condiciones operacionales que el sistema es capaz de manejar sin problemas producto de las fluctuaciones inherentes a un sistema de espesamiento y bombeo.

Figura N° 4.1: Rango operativo del sistema de bombeo de relaves espesados.



Fuente: Elaboración propia

4.4. VELOCIDAD CRÍTICA

La velocidad crítica calculada con la ecuación de Wasp para un rango de diámetro de la tubería (ID) entre el 22,63" y 27,25" resultan alrededor de 2,50 m/s. La velocidad crítica calculada tiene concordancia con aplicaciones similares en relaves de cobre, tal como se indica:

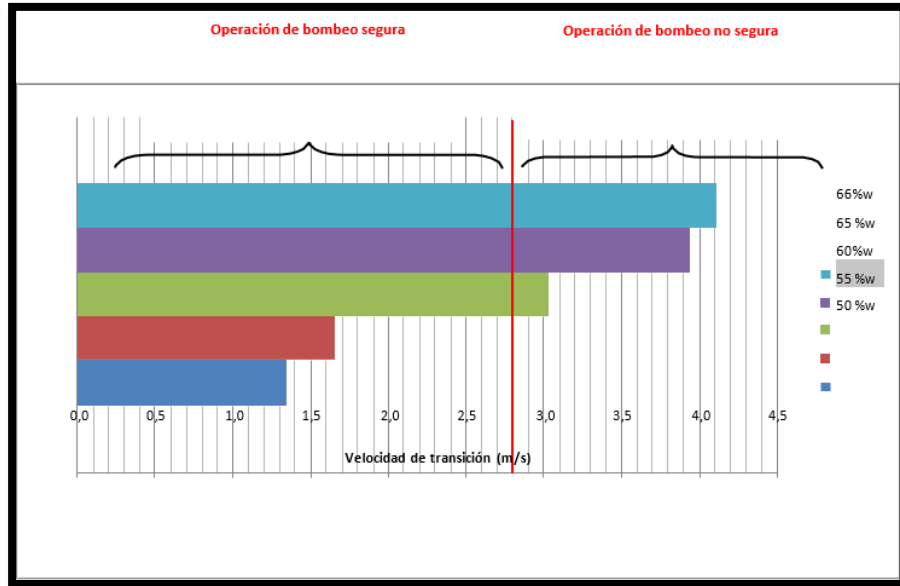
- **Caso de estudio 1:** Flow Loop Test con relaves de Minas Congas reportan una velocidad crítica de 3 m/s en una tubería de 25" para resistencias a la fluencia entre 30 a 45 Pa.
- **Caso de estudio 2:** Relaves espesados en Minera Escondida Limitada reportan una velocidad crítica de 2,5 m/s, 3,1 m/s y 3,7 m/s para resistencias a la fluencia de 50, 60 y 100 Pa respectivamente en una tubería de 36" de diámetro.

4.5. VELOCIDAD DE TRANSICIÓN

La velocidad de transición se define como la velocidad cuando los regímenes laminar y turbulento se encuentran en transición, y se determina mediante el número de Reynolds para fluidos newtonianos. Sin embargo, en muchos casos, una mezcla altamente concentrada no puede acercarse a la transición laminar-turbulento. El flujo laminar se extiende hasta que las fuerzas de inercia superan las fuerzas viscosas y el flujo pasa de una transición a un régimen totalmente turbulento. El punto en el que los flujos no newtonianos se vuelven turbulentos es todavía un tema de investigación.

La Figura N° 4.2, indica que para alcanzar un régimen turbulento con la pulpa de 66% de sólidos se requiere al menos 4,0 m/s. La figura señala también la velocidad crítica 2,5 m/s anteriormente determinada, la cual sería insuficiente para sobrepasar la velocidad de transición del sistema. La alta velocidad y desgaste asociado a este, suponen el uso de un revestimiento interno. Por este motivo, se estima que la tubería a seleccionar deberá tener un revestimiento interno con el doble propósito de reducir el desgaste por abrasión y aumentar la velocidad necesaria para alcanzar una velocidad de 4 m/s.

Figura N° 4.2: Velocidad de transición de acuerdo a metodología de Slatter y Wasp para pulpas tipo Bingham K=23.



Fuente: Elaboración propia

4.6. TASAS DE ABRASIÓN Y REVESTIMIENTO EN HDPE

La tasa de abrasión es un parámetro que se determina de manera experimental por medio de pruebas específicas o por medio de mediciones industriales de campo. A pesar de ello, la tasa de abrasión (mm/año) puede ser estimada de acuerdo al material de la tubería y a la velocidad que desarrolla la pulpa dentro de ésta.

La Tabla N° 4.3, muestra que con el objetivo de mantener una velocidad nominal de 4m/s, una tubería de 24" acero al carbono cédula 40 con revestimiento de 1,3" de HDPE es la mejor decisión. Este revestimiento permitiría una operación durante 20 años sin cambio alguno de la tubería.

Tabla N° 4.3: Determinación de espesor de HDPE contra desgaste por abrasión.

Tamaños de tubería	24"		26"	Unidades
	24" CS ch40	24" CS ch20	26" CS sch30	
OD (acero)	24	24	26	Pulgadas
e (acero)	0,687	0,375	0,625	Pulgadas
ID (acero)	22,626	23,25	24,75	Pulgadas
ID requerido	20	20	20	Pulgadas
e (HDPE)	1,313	1,625	2,375	Pulgadas
e (HDPE)	33,3502	41,275	60,325	mm
Tasa de 100brasion (20% seguridad)	1,44	1,44	1,44	mm/año
Vida del proyecto	35	35	52	Años
Espesor consumido	50,4	50,4	74,9	mm
Espesor residual	0,4	0,4	1,3	mm

Fuente: Elaboración propia

4.7. PÉRDIDA POR FRICCIÓN

De acuerdo a la ecuación de Darby, la pérdida por fricción calculada es 0,6 kPa/m. Se considera para fines de diseño un valor conservador de pérdida por fricción de 1 KPa/m que permite forzar al máximo la concentración en el espesador, de manera tal que el sistema de bombeo no se la limitación.

4.8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los criterios de diseño empleados en este estudio. En el anexo, se puede encontrar mayor detalles de los mismos.

4.8.1. DISTRIBUCIÓN DE RELAVES

Un sistema compuesto por un tanque de acero al carbono de 7 m de diámetro por 7 m de altura y 4 descargas radiales en la parte inferior controladas mediante válvulas tipo dardos, constituirá el sistema de distribución de pulpa a 50 % de sólidos a los cuatro espesadores de alta compresión. El sistema de distribución es capaz de manejar relave en pulpa a razón de 5 699 m³/h (flujo de diseño) con un tiempo de residencia de 2,5 minutos, y adicionalmente contará con una descarga extra para el bypass de uno de los espesadores, en caso de presentarse problemas operativos.

4.8.2. ESPEADORES DE RELAVES

El dimensionamiento de los espesadores se basa en una tasa de alimentación de 0,7 t/m²/h, equivalente a una área unitaria de 0,06 m²/TPD, determinada en laboratorio a partir de una muestra representativa. Debido a la aplicación y limitaciones en cuanto al máximo contenido de sólidos permisible a la descarga y la reología involucrada, se considera el uso de espesadores de alta compresión (HCT) de 41 m de diámetro y altura de pared máximas de 5 m. De esta manera la posibilidad de desarrollar pulpas de altos porcentajes de

sólidos y altas viscosidades las cuales limitarían su transportabilidad, se reduce enormemente en comparación al uso de espesadores de pasta (> 8m de altura). Se prevé que dentro de los espesadores, el alimento con 50 % de sólidos sea diluido a 8 % sólidos (ó incluso menos) usando el sistema ofrecido por el proveedor de los espesadores, para producir una descarga de aproximadamente 66 % de sólidos tras los procesos de floculación y compactación.

El circuito de espesamiento será diseñado para manejar una descarga de 66 % de sólidos con bomba centrífuga, de función doble: transferencia y recirculación a la alimentación del espesador. La recirculación de la pulpa es un aspecto vital del diseño, pues permitirá cizallar el relave espesado y volverlo más amigable al bombeo centrífugo. Para tareas de recirculación (cizallamiento) se prevé el uso de dos bombas centrífugas (1 operando y 1 en stand by), mientras que para la transferencia se prevé sólo una bomba centrífuga.

La bomba de transferencia y una de las bombas de recirculación contarán con energía de emergencia. El circuito de espesamiento es altamente automatizado e incluye válvulas de accionamiento hidráulico.

4.8.3. SISTEMA DE EMERGENCIA

Como se mencionó anteriormente el diseño contará con un sistema de emergencia el cual consiste en el Bypass total de la pulpa a 50 % de sólidos entrantes a la planta. De tal manera que éstos sean derivados hacia una poza destinada especialmente para este propósito en las inmediaciones de la planta de espesamiento. Las líneas de emergencia de 36" HDPE SDR 17 conducirán los relaves por gravedad, a un pendiente mínima de 1,5 %. Se considera que la poza de emergencia se ubica a 1km distante de la planta de espesamiento.

4.8.4. FLOCULACIÓN

Se proponen dos sistemas por duplicado destinados a la preparación y manejo de los requerimientos de floculante, tal que permitan un flujo de solución de floculante a los espesadores en forma interrumpida a razón de 10 gramos por tonelada de sólidos entrantes. Cada sistema contará con tanques de preparación y almacenamiento de floculante, así como de bombas de transferencia y dosificación. Los tanques de mezclado de floculante de 3 m de diámetro y 3 m de altura con sistema de agitación serán los primeros encargados de la

preparación y homogenización de la solución de floculante madre a 0,25 %. Enseguida dos tanques adicionales de almacenamiento de 5 m de diámetro por 5 m de altura recibirán la solución madre para ir dosificándola según los requerimientos del sistema.

4.8.5. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES ESPESADOS

El diseño propuesto prevé que la descarga de los relaves espesados de los cuatro espesadores sea transferida a dos tanques de almacenamiento. Estos tanques contarán con sistemas de agitación vigorosa, capaces de mantener la pulpa en suspensión e inducir cizallamiento adicional.

Los dos tanques de almacenamiento de acero al carbono de 9m de diámetro por 9m de altura serán capaces en total de manejar el relave espesado total a razón 3 679 m³/h con un tiempo de residencia de 15 minutos cada uno.

4.8.6. BOMBEO DE RELAVES ESPESADOS

Los relaves espesados a 66% de sólidos serán bombeados por bombeo centrífugo a un punto asumido de descarga a una

elevación positiva de 50 m con referencia a la planta de espesamiento y a una longitud de 3 km.

Para ello dos trenes con tres bombas centrífugas por tren, serán capaces de manejar el flujo de diseño de 3 679 m³/h. Las bombas centrífugas consideradas para este trabajo se especifican de trabajo pesado.

4.8.7. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA DE REBOSE

Los reboses de los cuatro espesadores se conducirán por gravedad hacia un tanque de almacenamiento desde el cual se prevé la utilización de agua de proceso para su uso dentro de la planta (agua de dilución de floculante, agua de limpieza, agua de lavado, etc.) y fuera de la planta (agua recuperada en sí).

El tanque de almacenamiento de agua recuperada será de acero al carbono capaz de manejar el total del agua recuperada a razón 812 m³/h con un tiempo de residencia de 15 minutos cada uno y tendría las siguientes dimensiones: 10,5 m de diámetro por 10,5 m de altura. De este tanque y previo a una etapa de filtrado, se prevé la instalación dos bombas de agua de alta presión para propósito de sello de las bombas bajo la descarga de los espesadores.

4.8.8. BOMBEO DE AGUA DE REBOSE

Desde el tanque de almacenamiento de los reboses de los espesadores se prevé bombas centrífugas cuya función es suministrar agua de proceso para diversos propósitos, tales como dilución de pulpa, preparación de floculante, agua de sello, etc.

El flujo excedente de agua de proceso es decir el flujo de los reboses menos el agua empleada en la planta, es considerado finalmente agua recuperada.

A continuación una breve descripción de las tareas de las bombas centrífugas ubicadas en el mencionado tanque de agua.

4.8.9. BOMBAS PARA DILUCIÓN Y RECIRCULACIÓN

Las bombas de dilución y recirculación de agua serán capaces de suministrar el flujo necesario para la dilución a 8 % w del relave en pulpa de 50 % de sólidos, y para la dilución de la solución madre de floculante de 0,25 % a 0,01 %.

Un flujo adicional para requerimientos de agua de sello también sería suministrado por medio de estas bombas. Se estima un flujo de diseño de 470 m³/h para cubrir todas las tareas descritas.

4.8.10. BOMBAS DE AGUA RECUPERADA

En este caso particular de estudio se asumirá que el punto de descarga del agua recuperada se encuentra a una elevación positiva de 150 m con referencia a la planta de espesamiento y a una longitud de 5 km.

Dos trenes de tres bombas centrifugas en serie cada uno son dimensionadas para esta tarea (un tren en operación y el otro tren en espera) manejando un flujo total de 2 020 m³/h (561 l/s). Para efectos de ahorro por concepto de materiales para el transporte del agua recuperada, se considera un primer tramo de 2 km compuesto de acero al carbono, mientras que el resto de HDPE.

4.9. PRUEBA DE HIPÓTESIS

4.9.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Los cuatro espesadores en paralelo recibirán los relaves a un ritmo de 10 000 t/d, con un contenido de 50 % de sólidos. La

descarga de los espesadores será de 66 % sólidos mientras que el flujo de agua recuperada será de 2 020 m³/h.

4.9.2. FILOSOFÍA DE CONTROL

La planta de espesamiento contará con instrumentación capaz de ser operada bajo modo totalmente automatizado. Las válvulas de aislamiento (tipo cuchilla) debido al gran diámetro de tubería se operarían por accionamiento hidráulico. Cada válvula tendrá una botonera local para accionamiento local o remoto. Los niveles de los tanques son monitoreados con controles de nivel, los niveles son mantenidos con lazos de control entre la bomba y los sensores de nivel.

Se dispondrá de paneles de control local para el uso del operador en el lugar de trabajo. Se propone un panel de control para el área de preparación de floculante, y otro para el mecanismo de rastra del espesador. El monitoreo y control de cada área también se hará desde otro panel ubicado en el cuarto de control de la planta de espesamiento.

Con respecto a la instrumentación de las tuberías de transporte de pulpas, las variables más importantes a controlar serán:

1. Caudal: Los instrumentos de medición de caudal considerados serán flujómetros magnéticos, los cuales constan de un tubo de flujo recubierto al interior por un elastómero, que se instala como una pieza en la tubería. Los flujómetros modernos pueden garantizar precisiones de $\pm 2\%$ si están bien revestidos y calibrados, lo que les permite detectar fugas.
2. Densidad: Se realiza mediante densímetros radioactivos. Los densímetros nucleares modernos pueden tener una precisión de $\pm 2\%$ en pulpas de minerales, y consisten básicamente de una fuente radioactiva y un detector instalado al lado opuesto de la tubería.
3. Presión: Para la medición de presión en la tubería se utilizan medidores de presión electrónicos de diafragma, lo cual permite aislar la medición de presión de las vibraciones de la línea y evita la creación de zonas de sedimentación en la tubería. Los transductores de presión pueden tener precisión de hasta $\pm 3\%$.

4.9.3. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO Y BALANCE DE MASA

El diagrama de flujo de proceso se muestra en el anexo N° 5 así como el listado de equipos se muestra a continuación:

LISTADO DE EQUIPOS MECANICOS

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA RECUPERACION DE AGUA A PARTIR DE RELAVES DE COBRE MEDIANTE TECNOLOGIA DE RELAVES ESPESADO

Item	TAG	Equipo mecánico de proceso	Descripción	Cantidad			Potencia absorbida kW	Potencia instalada Power kW	Factor de funcionamiento	Carga conectada total, kWh	Carga instalada total, kWh	VFD	Energía de emergencia	Cap.	Unidad	Long. m	Ø m ID
				Operando	StandBy	Total											
		Alimentación de pulpa a la planta de espesamiento															
1	0-K01	Distribuidor de Relaves	Distribuidor de 6699 m ³ /h. Acero al carbono, incluye valvulas tipo da	1	0	1	0.0	0.0	100 %	0.0	0	No	-	258	m ³		
		Area de espesamiento															
2	TK-001004	Espesadores de alta compresion (HCT)	41m diametro, rastras, feed well, e-duc, puente y accionamiento	4	0	4	75.0	112.0	100 %	300.0	448	No	SI		m ³ /h		
3	HS-1010104	izador de servicio del espesador	Hoist de servicio, 5 Tons	4	0	4	8.0	15.0	20 %	6.4	60	No	No	5.0	tons		
4	PP-2010204	Bombas de recirculación	Centrifuga Heavy Duty, revestida en caucho, con VFD	4	4	8	194.8	220.0	100 %	779.1	1760	SI	No				
5	PP-2010204	Bombas de transferencia de descarga	Centrifuga Heavy Duty, revestida en caucho, con VFD	4	0	4	86.3	100.0	100 %	346.1	400	SI	SI		m ³ /h		
6	PP-5010510	Bombas de agua de sello para bombas de pulpa	Centrifuga de alta presion	5	5	10	7.4	9.0	100 %	36.9	90	No	SI		psi		
7	HS-201204	izador de servicio del cuarto de bombas: underflow	Hoist de servicio, 2.5 Ton	4	0	4	1.0	2.2	20 %	0.8	8.8	No	No		tons		
8	PP-1110114	Bomba de surtidero del espesador	Surtidero en zona de bombas bajo espesador	4	0	4	14.0	22.0	20 %	11.2	88	No	No		m ³ /h		
		Sistema de bombeo de relaves espesados															
9	TK-001002	Tanque de almacenamiento de relaves espesados	Acero al carbono, con agitador	2	0	2	150.0	200.0	100 %	300.0	400	No	SI		m ³ /h		
10	PP-3010305	Bombas de entrega de relave espesado	Centrifuga Heavy Duty, revestida en caucho.	3	3	6	1896.3	2000.0	100 %	5689.0	12000	No	SI	3679	m ³ /h		
		Sistema de floculación															
11	TK-005005	Tanque de mezclado de floculante	Acero al carbono. Con agitador	2	0	2	20.0	25.0	40 %	16.0	50	No	No			18	
12	TK-007005	Tanque de almacenamiento de floculante	Acero al carbono. Con agitador	2	0	2	0.0	0.0	40 %	0.0	0	No	No				
13	PP-4010404	Bombas de transferencia de floculante	Bomba peristaltica	2	2	4	2.0	4.0	40 %	1.6	16	No	No				
14	PP-5010505	Bombas de dosificación de floculante	Bomba peristaltica	4	4	8	3.0	5.0	40 %	4.8	40	No	No				
15	HS-003	izador de servicio para el manejo de Big Bag	Hoist de servicio, 2 Ton	1	0	1	2.0	4.0	20 %	0.4	4	-	No		ton		
16	PP-200	Bomba de surtidero, zona de floculación	Surtidero en zona de floculación	1	0	1	14.0	22.0	20 %	2.8	22	No	No		m ³ /h		
		Area de recirculación de agua de proceso															
17	TK-003	Tanque de almacenamiento de agua recuperada	Acero al carbono. Sin agitador	1	0	1	0.0	0.0	100 %	0.0	0	No	No		m ³		
18	PP-005005	Bomba de agua para dilución y recirculación	Centrifuga de agua.	1	1	2	57.0	75.0	100 %	57.0	150	No	No		m ³ /h		
19	PP-009013	Bomba de agua recuperada	Centrifuga	3	3	6	519.5	550.0	100 %	1598.5	3300	No	SI	2020.2	m ³ /h		
20	FT-001002	Filtro de agua recuperada	Autolimpiante en línea	2	0	2	0.0	0.0	100 %	0.0	0	No	No				
		Area de agua fresca															
21	TK-004	Tanque de agua filtrada	Acero al carbono. Sin agitador	1	0	1	0.0	0.0	100 %	0.0	0	No	No	44.0	m ³		
22	FT-003004	Filtro para agua de sello	Autolimpiante en línea	2	0	2	0.0	0.0	100 %	0.0	0	No	No		m ³ /h		
23	PP-014/015	Bombas de agua fresca	Centrifuga	1	1	2	0.9	1.5	25 %	0.2	3	No	No		m ³ /h		
		Otros															
24	CO-001	Compresores	Áre de instrumentación, para limpieza, etc.	2	0	2	97.0	120.0		0.0	240	No	SI		cfm		

La alimentación de los relaves se hará a través de un cajón distribuidor escurriendo por gravedad a los espesadores. El distribuidor estará equipado con válvula tipo dardo, habrá dos válvulas de ajuste para cada espesador.

El dimensionamiento y selección de los 4 espesadores de 41 metros de diámetro, los cuales operarían en paralelo y son del tipo de alta compresión HCT (High Compression Thickener), ha sido basado de acuerdo a resultados de pruebas de sedimentación en laboratorio. Los espesadores HCT serían montados sobre estructuras metálicas y base de concreto. El desvío (by-pass) del circuito de espesadores se realizará mediante una válvula manual tipo cuchilla, con la cual se puede lograr un desvío parcial ó total.

La etapa de floculación es una fase importante en la producción de los relaves espesados, las condiciones operativas serán propuestas teniendo en cuenta las pruebas de sedimentación realizadas. El sistema de floculación contara con la capacidad de preparación de floculante a partir de su estado sólido (proviene de bolsas de 1 tonelada o menos), terminando en la dosificación de una solución diluida al espesador.

El sistema de espesamiento se lleva a cabo de acuerdo a la tecnología seleccionada (HCT) que comprende el sistema de alimentación de

relaves, fosa de alimentación “feed well” y sistema de rastra, éste último dispone de un mecanismo de levante que se usa en condiciones de emergencia por altos torques.

El producto de espesamiento, la descarga de los espesadores a 66 % w se hace mediante bombas de transferencia. Las bombas sirven para el control de la descarga mediante el lazo de control entre el flujómetro y densímetro. El arreglo de tuberías permite la recirculación de la descarga del espesador hacia la entrada de alimentación del mismo. Se prevé una línea de agua para las operaciones de limpieza de los espesadores, lavado de tuberías y usos generales en planta.

4.9.4. SERVICIOS

Los siguientes servicios fueron considerados:

1. Se considera el suministro de aire comprimido para aire comprimido de planta, y aire seco para instrumentación.
2. El agua de sello para las bombas centrifugas debe ser limpia de sólidos mayores de 100 micrones para lo cual se considera la instalación de filtros antes de las bombas de agua de sello. La presión del agua se regulará mediante válvulas reguladoras de presión.
3. El agua para el sistema de preparación del floculante proviene del tanque de agua recuperada, que será sometida a dos etapas de

filtración en línea, sistema Amiad. Para el agua de limpieza se usa la misma fuente.

4.9.5. ARREGLO GENERAL

La disposición mecánica de los espesadores, la planta de floculante y el edificio para los almacenes de floculante, entre otros. Los espesadores son instalados sobre estructuras metálicas, de manera que el área debajo del espesador será accesible para facilitar la operación y mantenimiento de los equipos.

4.10. ESTIMADO DE COSTO DE CAPITAL

El costo de capital fue estimado en base a cotizaciones referenciales de los equipos mayores: espesadores tipo HCT, sistema de floculantes típicos, bombas centrífugas, agitadores, etc. La base de datos y la experiencia del autor en proyectos de ingeniería similares han servido para la determinación de los costos unitarios de equipos menores y materiales: compresor de aire, bombas centrífugas, monorriel, etc. Por otro lado, los costos de tuberías de acero y HDPE fueron estimados en base a costo por kilo.

A continuación (Tabla N° 4.5) se presenta un resumen del estimado de costos de capital dividido en 2 subtotales: el primero (26,8 MUS\$) designa la

inversión necesaria para la producción de 560 l/s, mientras que el segundo (27,8 MUS\$) presenta la inversión requerida para el manejo de los relaves espesados y agua recuperada que generaría el sistema, es decir su transporte desde la planta hacia determinados puntos referenciales.

La inversión total se estima en 54,5 MUS\$.

Tabla N° 4.5: Estimado de costos de capital $\pm 25\%$.

	Subtotal - Producción de 560 l/s	Subtotal - Manejo de relaves espesados y agua recuperada	Total
Total Equipos Mecánicos de Proceso (TEMP)	US\$ 13,781,600	3846000	US\$ 17,627,600
Total de Tuberías principales (TTP)	US\$ 0	5741000	US\$ 5,741,000
Total de movimiento de tierra (TMT)	US\$ 1,103,000	308000	US\$ 1,411,000
Costo total de instalación	US\$ 3,437,000	8896000	US\$ 12,333,000
Costo Directo Total (CDT)	US\$ 18,322,000	18,791,000.00	US\$ 37,113,000
Total Costos Indirectos (TCI)	US\$ 5,321,000	5710000	US\$ 11,031,000
Costos del dueño	US\$ 709,000	735000	US\$ 1,444,000
Contingencia	US\$ 2,435,000	2524000	US\$ 4,959,000
Costo Total de Capital del Proyecto	US\$ 26,787,000	US\$ 27,760,000	US\$ 54,547,000

Fuente: Elaboración propia

4.11. ESTIMADO DE COSTO DE OPERACIÓN

El costo estimado de operación se compone de consumo de floculante y energía; además de costos de mantenimiento, materiales y mano de obra (operadores y supervisión).

Se observa que cerca del 64% del costo de operación lo constituye el rubro energético, seguido del costo por floculante alrededor del 20% del total.

A continuación (Tabla N° 4.6) se presenta un resumen del estimado de costos de operación anual, dividido en dos subtotales: el primero (2,8 MUS\$, equivalente a 0,16 \$/m³ de agua recuperada) designa los costos para la operación del sistema de producción de 560 l/s de agua, mientras que el segundo (6,0 MUS\$, equivalente a 0,34 \$/m³ de agua recuperada) presenta el costo operativo para el manejo de los relaves espesados y agua recuperada - que generaría el sistema - hacia determinados puntos referenciales.

4.11.1. DISTRIBUCIÓN POR PERÍODOS TRIMESTRALES DEL COSTO DE CAPITAL

Se puede encontrar el detalle de la distribución por periodos trimestrales del costo total de capital.

Tabla N° 4.6: Estimado de costos de operación ±25%.

item	Subtotal - Producción de 560 l/s	Subtotal - Manejo de relaves	Total
Energía	US\$ 204,000	US\$ 5,382,459	US\$ 5,586,459
Floculante	US\$ 1,643,000	US\$ 0	US\$ 1,643,000
Mano de Obra	US\$ 162,150	US\$ 162,150	US\$ 324,300
Mantenimiento	US\$ 551,000	US\$ 154,000	US\$ 705,000
Operación	US\$ 200,000	US\$ 300,000	US\$ 500,000
Equipos móviles	US\$ 17,000	US\$ 17,000	US\$ 34,000
Costo Anual de Operación del Proyecto	US\$ 2,777,150	US\$ 6,015,609	US\$ 8,792,759
US\$/m³ de agua recuperada	0,16	0,34	0,50

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. El estudio de pre-factibilidad realizado indica que es factible técnicamente la instalación de un sistema de recuperación de agua a partir de relaves de flotación de cobre mediante tecnologías de espesamiento, para el caso de grandes tonelajes 10 000 t/d, cuyo concepto y filosofía de operación pueda aplicarse a otros casos de plantas de tratamiento de gran minería de esta magnitud.
2. Reológicamente los relaves espesados de cobre presentan cizallamiento yendo, por ejemplo para una concentración de sólidos de 66%, de valores iniciales, sin cizallar, alrededor de 150 Pa a valores cercanos e inferiores a 60 Pa tras la aplicación de cizallamiento mecánico externo.
3. En cuanto a la limitación de porcentaje de sólidos para que sea manejable por bombas centrifugas, los resultados indican que una descarga de 66%w presentaría valores adecuados de resistencia a la fluencia, a la vez maximizando la recuperación de agua.
4. La tasa de alimentación de espesamiento para relaves de cobre típicos se identificó alrededor de $0,7 \text{ t/m}^2/\text{h}$ (Área Unitaria: $0,06 \text{ m}^2/\text{tpd}$), tomando en cuenta las metodologías de Coe & Clevenger, Talmage & Fitch y Solids Settling Flux. Considerando los tamaños más grandes de espesadores

HCT disponibles a la fecha de realización de este estudio, se concluye que se necesitarían 4 espesadores de 41m de diámetro.

RECOMENDACIONES

1. La investigación sobre la recuperación de agua es de vital importancia en una planta concentradora ya que con ello estamos previniendo la contaminación ambiental de las aguas.
2. El relave obtenido como material espesado se debe depositar en relaveras diseñadas, es necesario continuar con la investigación en el diseño y disposición.
3. El retorno del relave a las labores mineras es una alternativa para evitar la contaminación por material particulado, lo que se debe de investigar.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALDERMAN, Neil. HEYWOOD Nigel. (2004). "Improving slurry viscosity and flow curve measurements". Chemical engineering progress magazine. Estados Unidos de América, volume 100, número 4, pp 27-32.
2. ASTM D 4648-00. (2000). Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturates fine-grained clayey soil 10 de febrero del 2000.
3. BOGER, D., P.J. SCALES y F. SOFRA (2002) "Conceptos de reología". *Paste and thickened tailings – A guide*. Western Australia: Australian Centre for Gheomechanics, pp. 25-37.
4. BOSHOFF, J.C. y T. KLEINHANS. (2009). "Improved water consumption at the Sishen tailings storage facility complex". En JEWEL, R.J., A.B, FOURIE, S. BARRERA y J. WIERTZ (editores). *Proceedings of the twelfth international seminar on paste and thickened tailings*. Perth: Australian Centre for Gheomechanics, pp. 161-166.
5. BULATOVIC, S.M. (2007). Handbook of flotation reagents: Chemistry, theory and Practice. (1ra.ed.). Ontario, Canadá: Elsevier.
6. CASTRO, S. Y ÁLVAREZ, J. (1994). Flotation: In memory of Alexander Sutulov. (1ra. Ed.). Concepción, Chile: Andross Ltd.

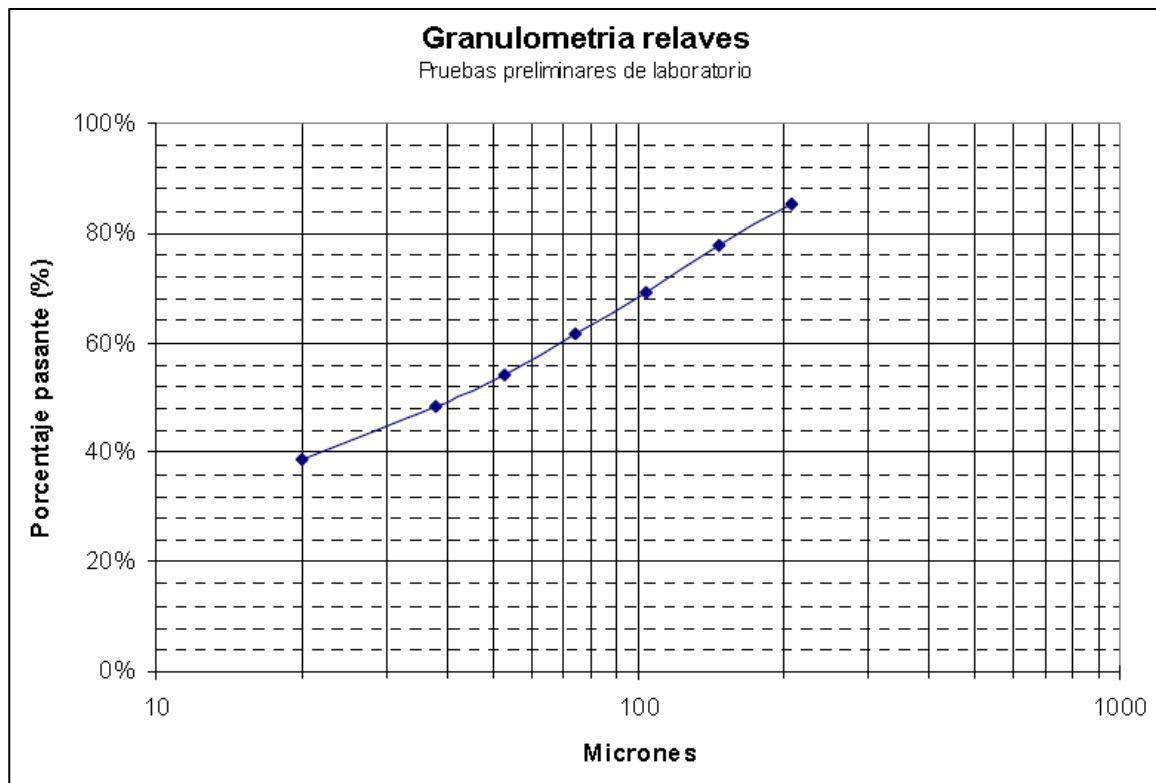
7. CIRIBENI, V., SARQUÍS, P. Y GONZÁLEZ, M. (2002). Estudios del efecto depresor de reactivos orgánicos naturales en la flotación de sulfuros. Simposio Materia 2002 SAM/CONMET. Santiago, Chile.
8. Cyanamid International. (1976). Mining Chemicals Handbook. (2da. Ed.). Tucson, USA: American Cyanamid Company.
9. Dudenkov, S., Shubov, L. y Glazunov, L. (1980). Fundamentos de la teoría y La práctica de empleo de reactivos de flotación. (Primera edición). Moscú, URSS: MIR
10. Garcés, A. M., Agudelo, L. M., Macías, K. I. y Salinas, N. A. (2006). Aislamiento de consorcio de microorganismos degradadores de cianuro. Revista lasallista de investigación, 3(1),7-8.
11. Habashi, F. (1997). Handbook of Extractive metallurgy: primary metals, Secondary metals, light metals. 1ra.ed.). Quebec, Canada: Wiley
12. Isaza, J. (2007). Taninos y polifenoles vegetales. Scientia et technica, 1(33),23.

ANEXOS

ANEXO N° 1: CARACTERIZACION METALURGICA Y DISTRIBUCION GRANULOMETRICA DE RELAVES DE COBRE

Caracterización metalúrgica general del relave de cobre (muestra sintética). Elaboración propia.

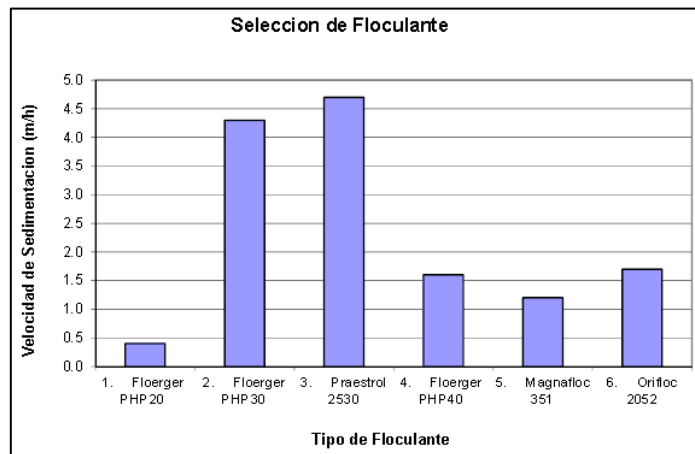
Parámetro	Valor	Unidades
SGs	2,73	-
SGL	1	-
Temperatura	17	°C
pH	11	-
d80	430	µm
d50	40	µm



ANEXO N° 2: VELOCIDAD DE SEDIMENTACION VS TIPO DE FLOCULANTE

PROCEDIMIENTO:

1. Los floculantes son preparados a Ya concentración de 0,291 (0,02%). Para la agitación se emplea un agitador magnético.
2. La pulpa es preparada en una probeta de 1 litro de capacidad al 8%w de sólidos.
3. Se agrega el volumen de floculante necesario para cumplir con la dosificación de 10
4. La pulpa es homogenizada vigorosamente de arriba debajo en la probeta empleando una paleta, de tal manera de asegurar la suspensión de todas las partículas.
5. Se deja las partículas sedimentar. La altura de la interfase (entre la solución clara sobrenadante y el lodo espesado) es registrada contra el tiempo. El periodo de medición es cada 5 segundos. El tiempo total de registro es 60 segundos.
6. Los valores de altura (eje Y) versus el tiempo (eje X) se grafican. La curva graficada presenta una tendencia lineal durante los primeros segundos. La pendiente de la curva es la velocidad de sedimentación.
7. Se repite la prueba con distintos floculantes.
8. Los resultados de la evaluación de 6 tipos de floculantes se presentan en la Tabla indican que de los floculantes evaluados, el Praestrol 2530 (Floc. #3) es aquel que presentó el mejor comportamiento basado en la velocidad de sedimentación, compactación, y claridad cualitativa de 0/F.

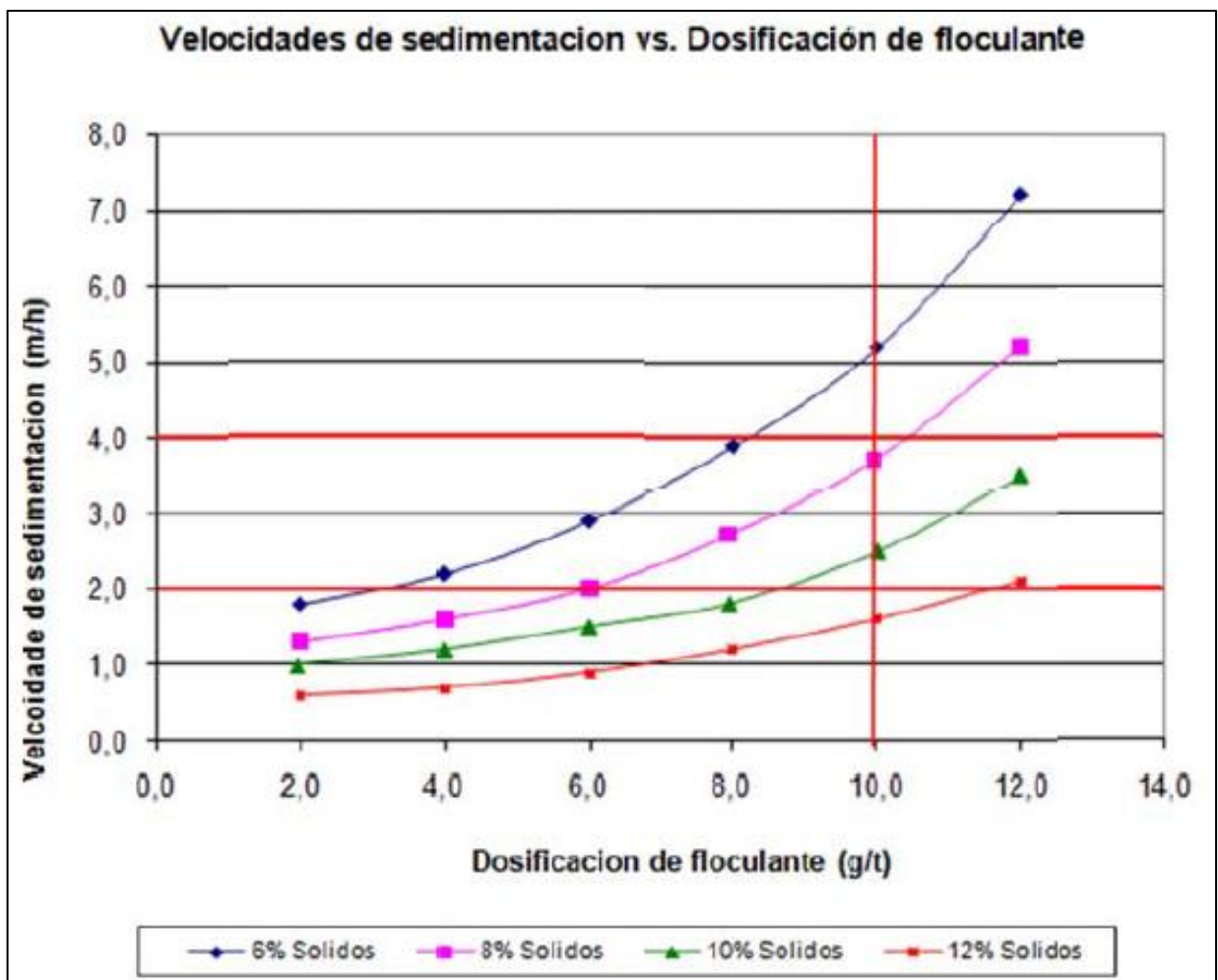


ANEXO N° 3: RESULTADOS DE SELECCIÓN DE FLOCULANTE

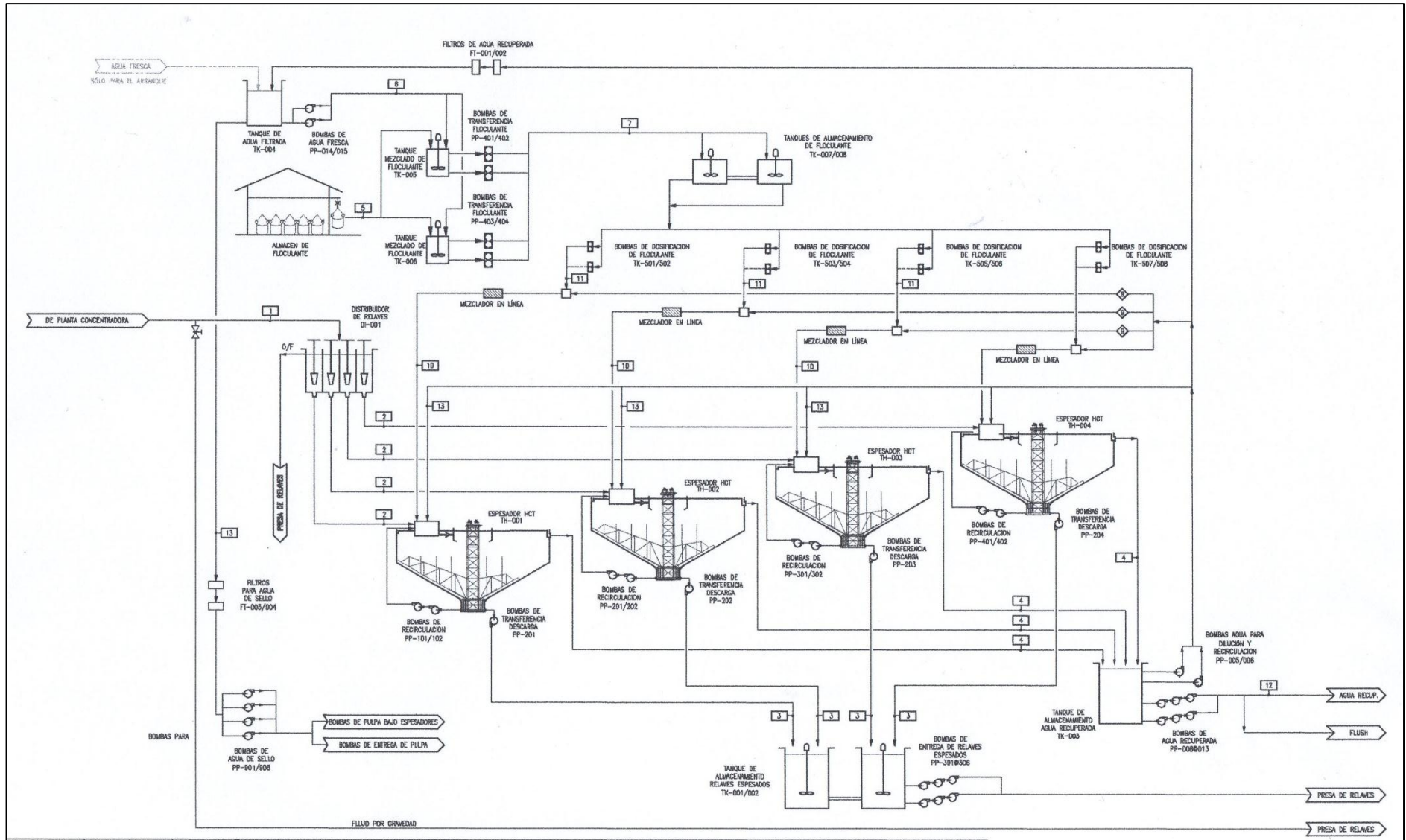
Parámetro	Floculante					
	1. Floerger PHP20	2. Floerger PHP30	3. Praestrol 2530	4. Floerger PHP40	5. Magnafloc 351	6. Orifloc 2052
s.g sólidos	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73
s.g liquido	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
s.g. pulpa	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Masa, sólidos (g)	84,9	85,1	84,7	84,6	84,9	84,9
Masa, liquido (g)	968,9	968,8	969,0	969,0	968,9	968,9
Masa, pulpa (g)	1053,8	1053,9	1053,7	1053,6	1053,8	1053,8
Volumen, sólidos (ml)	31,1	31,2	31,0	31,0	31,1	31,1
Volumen, liquido (ml)	968,9	968,8	969,0	969,0	968,9	968,9
Volumen, pulpa (ml)	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
% Sólidos, peso	8,06%	8,07%	8,04%	8,03%	8,06%	8,06%
% Sólidos, volumen	3,11%	3,12%	3,10%	3,10%	3,11%	3,11%
Adición de floculante, (ml)	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Concentración de polímero, (g/l)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Dosificación de polímero, g/h	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Calidad del rebose (15min)	turbio	claro	claro	claro	semi-claro	turbio
Velocidad de Sedimentación, (m/h)	0,4	4,3	4,7	1,6	1,2	1,7

ANEXO N° 4: VELOCIDAD DE SEDIMENTACION VS DOSIFICACION DE FLOCULANTE

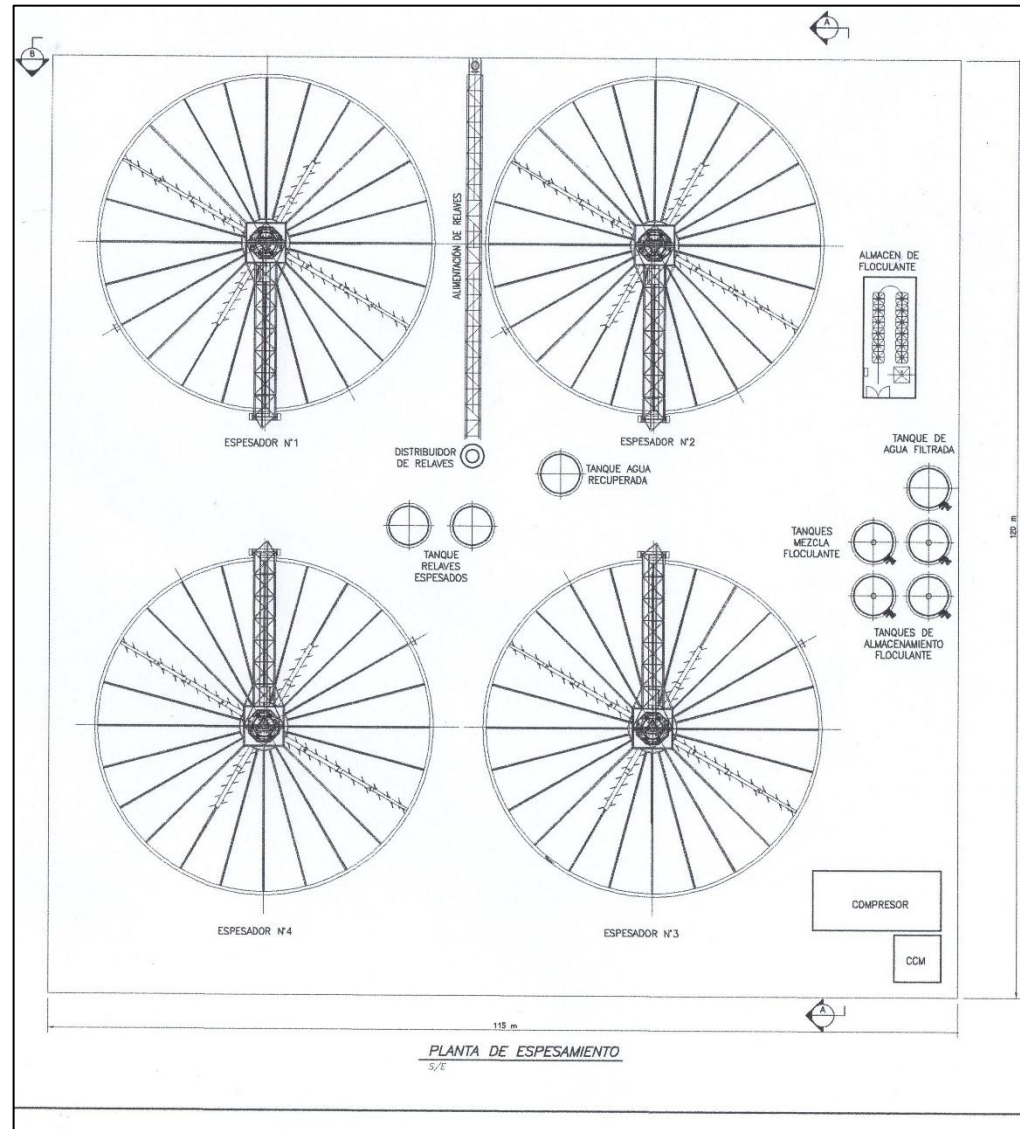
La siguiente figura presenta el efecto sobre la tasa de sedimentación al variar la dosis de floculante y el porcentaje de sólidos en la alimentación. Se considera tasas de sedimentación de diseño razonables en el rango de 2 a 4 m/h. Para nuestro caso tomaremos 10 g/L como dosificación óptima de floculante, y 8%w como óptimo contenido de sólidos.



ANEXO N° 5: DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS ESPESADORES



ANEXO N° 6: DISEÑO DE ESPESADORES (PARTE 1)



ANEXO N° 7: DISEÑO DE ESPESADORES (PARTE 2)

