

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SECCIÓN DE POSTGRADO



**“ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS DE PULPAS
MINERALES A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SÓLIDOS”**

TESIS

Presentada por:

IVÁN PAÚL GAITÁN BARREDA

Para optar el grado académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERÍA HIDRÁULICA**

LIMA, PERÚ

2010

Dedico esta tesis:

A mis queridos padres: Javier y Vilma;
a mis hermanos: Clider, Janeth y Flor,
por su constante amor y apoyo.

RECONOCIMIENTOS

Me gustaría reconocer el apoyo de Pipeline System Incorporated durante la realización de esta Tesis de investigación. Ellos mostraron su apoyo para poder realizar los ensayos en su laboratorio de reología de Concord, CA - USA y de la asesoría de algunos de sus especialistas en el transporte de pulpas minerales y de acceso a estudios e investigaciones afines para poder culminar esta Tesis.

También, me gustaría reconocer a mis profesores de Maestría de la UNI, por su invaluable transmisión de conocimientos, que incentiva la investigación a fin de conocer a más detalle los procesos o fenómenos relativos al transporte hidráulico de sólidos.

RESUMEN

La ciencia de la hidráulica de pulpas comenzó a florecer en la década de los 50 con pruebas sencillas de bombeos de arenas y carbón en concentraciones moderadas. Esta ciencia, ha evolucionado gradualmente para abarcar el bombeo de pulpas en la industria alimentaria y de las industrias de procesos, las mezclas de carbón y petróleo como nuevos combustibles y numerosas mezclas de minerales con agua.

La diversidad de los minerales bombeados, la amplia gama de los tamaños de las partículas sólidas y las diversas propiedades físicas y químicas de los fluidos transportantes; hacen que la ingeniería de hidráulica de pulpas requiera de diversos modelos matemáticos y empíricos para predecir su comportamiento.

Una pulpa es esencialmente una mezcla de sólidos y líquidos a diferentes proporciones o concentraciones. Sus características físicas son dependientes de muchos factores tales como: el tamaño y distribución de las partículas sólidas, la concentración de sólidos en la fase líquida, el tamaño de los conductos, el nivel de turbulencia, la temperatura y principalmente de la viscosidad absoluta (o dinámica) del medio transportante resultante, por mencionar las variables principales.

Por lo tanto, para efectuar el transporte hidráulico de una pulpa por una tubería, se requiere conocer, simular o estimar sus características o propiedades físicas y reológicas con mayor aproximación a la realidad, denominándose a este proceso como caracterización de una pulpa mineral, la cual se realiza con el fin de efectuar un diseño óptimo para un sistema de transporte hidráulico de pulpas minerales.

Esta Tesis de investigación tiene como objetivo específico lograr estimar los parámetros físicos (distribución granulométrica de partículas y gravedad específica de sólidos) y los parámetros reológicos (esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica) de cuatro pulpas minerales típicas (dos de relaves de cobre y dos de concentrado de cobre) a diferentes concentraciones de sólidos y ensayando muestras del mineral más común del Perú, que es el cobre.

Finalmente, dado el hecho de que existen muchas variables en el diseño de un sistema de transporte de pulpas minerales, se requiere de más investigaciones de este tipo en nuestro país, a fin de conocer a más detalle estas variables y así poder diseñar sistemas de transporte hidráulico de pulpas minerales más adecuados.

ABSTRACT

The science of slurry hydraulics started to flourish in the decade of the 1950' s with simple tests on pumping sand and coal at moderate concentrations. This science has evolved gradually to encompass the pumping of slurries in the food and process industries, mixtures of coal and petroleum as a new fuel and numerous mixtures of minerals and water.

Because of the diversity of minerals pumped, the wide range in solid particle sizes and the various physical and chemical properties of the carrying fluids; the engineering of slurry system requires various mathematical and empirical models to predict their behavior.

Slurry is essentially a mixture of solids and liquids at different ratios or concentrations. Its physical characteristics are dependent on many factors such as size and distribution of solid particles, concentration of solids in the liquid phase, size of the conduits, level of turbulence, temperature and mainly absolute (or dynamic) viscosity of the carrier, just to mention the main ones.

Therefore, to hydraulically transport slurry through a pipe, its physical and rheological characteristics or properties need to be known, simulated or estimated with a closer approach to the reality. This process is known as mineral slurry characterization and that is aimed at performing an optimal design of a hydraulic transportation system for mineral slurries.

The specific purpose of this Research Thesis is to estimate the physical parameters (particle grain size distribution and specific gravity of solids) as well as the rheological parameters (fluency stress and plastic viscosity) for four typical mineral slurries (two copper tailings and two copper concentrate slurries) at different solid concentrations, by testing samples of the most common mineral in Peru, that is, copper.

Finally, given the fact that there are many variables involved in the design of a mineral slurry transportation system, more research of this type is needed in our

country, in order to study these variables in more detail and thereby be able to design more appropriate hydraulic transportation systems for mineral slurry.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Procesamiento de minerales	1
1.2 Comportamiento del flujo de una pulpa	1
1.3 Diseño hidráulico de tuberías	3
1.4 Aplicación de la reología en el procesamiento de minerales	11
1.5 Espesamiento de pulpas.....	11
1.6 Objetivo de la tesis	19
1.7 Perfil de la tesis	20
 CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA	 21
2.1 Introducción.....	21
2.2 Propiedades de los sólidos para mezclas de pulpas.....	22
2.3 Flujo de pulpas	28
2.4 Velocidades y pérdidas de presión del flujo.....	31
2.5 Densidad de una pulpa	36
2.6 Pulpas Newtonianas	37
2.7 Pulpas no-Newtonianas	39
2.8 Pulpas no-Newtonianas independientes del tiempo	41
2.9 Pulpas no-Newtonianas dependientes del tiempo	44
2.10 Resumen	45
 CAPÍTULO III: ENSAYOS CON PULPAS MINERALES	 47
3.1 Introducción y antecedentes	47
3.2 General	48
3.3 Pruebas de laboratorio	48
3.4 Muestra de pulpa	53
3.5 Muestra recibida y preparación para ensayar	54
3.6 Ajuste de la concentración	57
3.7 Resumen	59
 CAPÍTULO IV: PROCEDIMIENTO DE TOMA Y REGISTRO DE DATOS	 60
4.1 Introducción.....	60
4.2 Muestras a analizar	60
4.3 Análisis de tamices (<i>PSD</i>).....	61

4.4	Gravedad específica de sólidos (SG_s).....	66
4.5	Reología	71
4.6	Resumen.....	78
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE DATOS Y DISCUSIÓN.....		79
5.1	Introducción	79
5.2	Análisis de tamices (PSD).....	79
5.3	Gravedad específica de sólidos (SG_s).....	83
5.4	Reología	84
5.5	Resumen.....	93
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		94
6.1	Conclusiones	94
6.2	Recomendaciones.....	96
6.3	Aporte de la tesis al estado del arte.....	97
6.4	Futuras investigaciones	98
BIBLIOGRAFÍA.....		100
ANEXO A: ANÁLISIS DE TAMICES (PSD).....		103
A.1	Análisis de tamices de los Relaves de Cobre – Tipo A.....	104
A.2	Análisis de tamices de los Relaves de Cobre – Tipo B.....	105
A.3	Análisis de tamices del Concentrado de Cobre – Tipo A	106
A.4	Análisis de tamices del Concentrado de Cobre – Tipo B.....	107
ANEXO B: ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS RECIBIDAS.....		108
B.1	Análisis de SG_s y C_w de los Relaves de Cobre – Tipo A	109
B.2	Análisis de SG_s y C_w de los Relaves de Cobre – Tipo B.....	110
B.3	Análisis de SG_s y C_w del Concentrado de Cobre – Tipo A	111
B.4	Análisis de SG_s y C_w del Concentrado de Cobre – Tipo B	112
ANEXO C: REOLOGÍA DE LOS RELAVES DE COBRE - TIPO A		113
C.1	Reogramas de los Relaves de Cobre – Tipo A.....	114
C.2	Análisis de τ_y y η/μ de los Relaves de Cobre – Tipo A.....	116
C.3	Resultados del ensayo de los Relaves de Cobre – Tipo A.....	118
C.4	Resultados finales del ensayo de los Relaves de Cobre – Tipo A.....	121
ANEXO D: REOLOGÍA DE LOS RELAVES DE COBRE - TIPO B		122
D.1	Reogramas de los Relaves de Cobre – Tipo B.....	123
D.2	Análisis de τ_y y η/μ de los Relaves de Cobre – Tipo B	125
D.3	Resultados del ensayo de los Relaves de Cobre – Tipo B	127

D.4	Resultados finales del ensayo de los Relaves de Cobre – Tipo B	130
ANEXO E: REOLOGÍA DEL CONCENTRADO DE COBRE - TIPO A		131
E.1	Reogramas del Concentrado de Cobre – Tipo A.....	132
E.2	Análisis de τ_y y η/μ del Concentrado de Cobre – Tipo A.....	134
E.3	Resultados del ensayo del Concentrado de Cobre – Tipo A	136
E.4	Resultados finales del ensayo del Concentrado de Cobre – Tipo A	139
ANEXO F: REOLOGÍA DEL CONCENTRADO DE COBRE - TIPO B.....		140
F.1	Reogramas del Concentrado de Cobre – Tipo B.....	141
F.2	Análisis de τ_y y η/μ del Concentrado de Cobre – Tipo B	143
F.3	Resultados del ensayo del Concentrado de Cobre – Tipo B	145
F.4	Resultados finales del ensayo del Concentrado de Cobre – Tipo B.....	148
ANEXO G: EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE DISEÑO.....		149
G.1	Diseño basado en reología para los Relaves de Cobre – Tipo B.....	150
G.2	Diseño basado en coeficiente de arrastre para los Relaves de Cobre – Tipo B...	153

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Rango de tamaños de partículas de sólidos de acuerdo con ASTM D2488	23
Tabla 2.2: Conversión entre escalas más comunes de tamaño de partículas	24
Tabla 2.3: Parámetros de ensayos en sólidos para mezclado de pulpas.....	25
Tabla 2.4: Velocidad terminal o de caída de partículas sólidas	32
Tabla 2.5: Regímenes de flujos para pulpas Newtonianas y no-Newtonianas.....	40
Tabla 2.6: Ejemplos de fluidos según sus propiedades reológicas	43
Tabla 3.1: Cantidades aproximadas de pulpa para realizar los ensayos.....	53
Tabla 4.1: Muestras a analizar en la Tesis de investigación	61
Tabla 4.2: Peso seco requerido para el ensayo de <i>PSD</i> según tipo de mineral	62
Tabla 4.3: Resumen del registro de datos para el ensayo de <i>PSD</i> de las muestras	66
Tabla 4.4: Peso requerido por cada matraz para el ensayo de <i>SG_s</i>	67
Tabla 4.5: Densidad del agua para diversas temperaturas	68
Tabla 4.6: Resumen del registro de datos para el ensayo de <i>SG_s</i> de las muestras	71
Tabla 4.7: Coeficientes del viscosímetro Contraves Rheomat 15T	73
Tabla 4.8: Datos del ensayo de reología para los Relaves de Cobre – Tipo A	77
Tabla 4.9: Datos del ensayo de reología para los Relaves de Cobre – Tipo B	77
Tabla 4.10: Datos del ensayo de reología para los Concentrados de Cobre – Tipo A.....	77
Tabla 4.11: Datos del ensayo de reología para los Concentrados de Cobre – Tipo B	78
Tabla 5.1: Resumen de diámetros característicos del análisis de tamices	81
Tabla 5.2: Resumen de <i>SG_s</i> obtenidos del análisis a las muestras	84
Tabla 5.3: Resumen de las relaciones del τ de las muestras a diferentes C_w	86
Tabla 5.4: Resumen de las relaciones para la estimación del τ_y a diferentes C_w	87
Tabla 5.5: Resumen de las relaciones para la estimación del η/μ a diferentes C_w	88
Tabla 5.6: Resultados del ensayo de reología de las muestras a diferentes C_w	88
Tabla 5.7: Comparación de resultados entre los ensayos y valores típicos.....	89
Tabla 5.8: Resumen de la validación de los ensayos de reología	89
Tabla 6.1: Resumen de los resultados de las cuatro muestras minerales ensayadas.....	95
Tabla A.1: Datos de tamices de los Relaves de Cobre – Tipo A	104
Tabla A.2: Datos de tamices de los Relaves de Cobre – Tipo B.....	105
Tabla A.3: Datos de tamices del Concentrado de Cobre – Tipo A	106
Tabla A.4: Datos de tamices del Concentrado de Cobre – Tipo B	107
Tabla B.1: Muestra recibida de los Relaves de Cobre – Tipo A.....	109

Tabla B.2: Muestra recibida de los Relaves de Cobre – Tipo B	110
Tabla B.3: Muestra recibida del Concentrado de Cobre – Tipo A	111
Tabla B.4: Muestra recibida del Concentrado de Cobre – Tipo B	112
Tabla C.1: Reogramas de los Relaves de Cobre – Tipo A	114
Tabla C.2: Esfuerzo de fluencia de los Relaves de Cobre – Tipo A	116
Tabla C.3: Viscosidad reducida de los Relaves de Cobre – Tipo A	117
Tabla C.4: Resultados del ensayo de los Relaves de Cobre – Tipo A	118
Tabla C.5: Validación del ensayo de los Relaves de Cobre – Tipo A	119
Tabla D.1: Reogramas de los Relaves de Cobre – Tipo B	123
Tabla D.2: Esfuerzo de fluencia de los Relaves de Cobre – Tipo B	125
Tabla D.3: Viscosidad reducida de los Relaves de Cobre – Tipo B	126
Tabla D.4: Resultados del ensayo de los Relaves de Cobre – Tipo B	127
Tabla D.5: Validación del ensayo de los Relaves de Cobre – Tipo B	128
Tabla E.1: Reogramas del Concentrado de Cobre – Tipo A	132
Tabla E.2: Esfuerzo de fluencia del Concentrado de Cobre – Tipo A	134
Tabla E.3: Viscosidad reducida del Concentrado de Cobre – Tipo A	135
Tabla E.4: Resultados del ensayo del Concentrado de Cobre – Tipo A	136
Tabla E.5: Validación del ensayo del Concentrado de Cobre – Tipo A	137
Tabla F.1: Reogramas del Concentrado de Cobre – Tipo B	141
Tabla F.2: Esfuerzo de fluencia del Concentrado de Cobre – Tipo B	143
Tabla F.3: Viscosidad reducida del Concentrado de Cobre – Tipo B	144
Tabla F.4: Resultados del ensayo del Concentrado de Cobre – Tipo B	145
Tabla F.5: Validación del ensayo del Concentrado de Cobre – Tipo B	146
Tabla G.1: Diseño basado en reología para los Relaves de Cobre – tipo B	150
Tabla G.2: Diseño basado en coeficiente de arrastre para los Relaves de Cobre – Tipo B ..	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama esquemático típico de un sistema de transporte de carbón	4
Figura 1.2: Diagrama esquemático de un circuito de ensayos de pulpas	6
Figura 1.3: Disposición superficial de relaves utilizando un espesador para pasta	15
Figura 1.4: Facilidades o instalaciones dentro del alcance de la norma ASME B31.11	18
Figura 2.1: Diagrama de una pulpa mineral fluyendo a través de una tubería.....	21
Figura 2.2: Concepto de velocidad crítica en sistemas de pulpas	30
Figura 2.3: Pérdida de presión versus Velocidad para agua y una pulpa.....	33
Figura 2.4: Esfuerzo de corte versus Tasa de corte.....	38
Figura 2.5: Esfuerzo de corte versus Tasa de corte de fluidos no-Newtonianos	42
Figura 2.6: Viscosidad aparente versus Tasa de corte de fluidos no-Newtonianos	42
Figura 2.7: Esfuerzo de corte versus Tasa de corte de fluidos no-Newtonianos	44
Figura 3.1: Tamices Tyler y equipo vibrador de tamices.....	49
Figura 3.2: Matraces de Le Chatelier en baño María para determinar la SG_s	49
Figura 3.3: Viscosímetro con diferentes tazas y péndulos.....	51
Figura 3.4: Equipo para el ensayo de corrosión de una pulpa.....	52
Figura 3.5: Tubos acrílicos para el ensayo de deslizamiento y reposo	53
Figura 5.1: Resultados del ensayo de análisis de tamices (Curvas granulométricas)	82
Figura 5.2: Resultados del ensayo de reología (Curvas τ_y vs C_w)	91
Figura 5.3: Resultados del ensayo de reología (Curvas η vs C_w).....	92
Figura C.1: Gráfico τ_y versus C_w para los Relaves de Cobre – Tipo A.....	120
Figura C.2: Gráfico η versus C_w para los Relaves de Cobre – Tipo A.....	120
Figura C.3: Resultados finales del ensayo de los Relaves de Cobre – Tipo A	121
Figura D.1: Gráfico τ_y versus C_w de los Relaves de Cobre – Tipo B.....	129
Figura D.2: Gráfico η versus C_w de los Relaves de Cobre – Tipo B.....	129
Figura D.3: Resultados finales del ensayo de los Relaves de Cobre – Tipo B	130
Figura E.1: Gráfico τ_y versus C_w del Concentrado de Cobre – Tipo A	138
Figura E.2: Gráfico η versus C_w del Concentrado de Cobre – Tipo A.....	138
Figura E.3: Resultados finales del ensayo del Concentrado de Cobre – Tipo A	139
Figura F.1: Gráfico τ_y versus C_w del Concentrado de Cobre – Tipo B	147
Figura F.2: Gráfico η versus C_w del Concentrado de Cobre – Tipo B.....	147
Figura F.3: Resultados finales del ensayo del Concentrado de Cobre – Tipo B.....	148

LISTA DE SÍMBOLOS

A, B, C, D, F, K_i	Coefficientes	[-]
$C_D = 0.44$	Valor conservativo del coeficiente de arrastre de las partículas sólidas en una pulpa	[-]
$C_{H-W} = 135$	Típico coeficiente de la ecuación de Hazen – Williams	[-]
$C_v = C_w/[SG_s(1-C_w)+C_w]$	Concentración en volumen de sólidos	[%]
$C_w = C_v \rho_s/\rho_m$	Concentración en peso de sólidos	[%]
d_i	Diámetro característico que al $i\%$, las partículas son más pequeñas	[μm]
$e = 2.718281$	Base del logaritmo natural o neperiano	[-]
$f_D = 4 f_N$	Factor de fricción de Darcy	[-]
f_N	Factor de fricción de Fanning	[-]
F_L	Factor de Durand para velocidad crítica de deposición	[-]
$g = 9.81$	Aceleración de la gravedad	[m/s^2]
$H_f = f_D LV^2/2gD = 2f_N LV^2/gD$	Pérdida de presión por unidad de longitud	[m/m]
$H_{fm}/H_{fL} = 1 + 280 \psi^{-1.93} C_v$	Relación de las pérdidas de presión de la pulpa en relación con las del agua o líquido transportante	[-]
$ID = OD - 2wt$	Diámetro interno de una tubería	[m]
L	Longitud de una tubería	[m]
Ne	Número índice que indica si $Ne < 40$ ocurre saltación y $Ne \geq 40$ se desarrolla flujo heterogéneo	[-]
OD	Diámetro externo de una tubería	[m]
Q	Flujo total a través de una tubería	[m^3/s]
$Re = \rho V ID/\mu$	Número de Reynolds (flujo Newtoniano)	[-]
$R (f_N)$	Función para resolver la ecuación de Colebrook	[-]
$SG_s = \rho_s/\rho_L$	Gravedad específica de sólidos	[-]

T	Temperatura del fluido	[°C]
$TDH = Z_{max} + H_f L + \sum H_s$	Carga dinámica total requerida	[m]
$u^* = \sqrt{(\tau_w/\rho_m)}$	Velocidad friccional en una tubería (flujo turbulento)	[m/s]
V	Velocidad total en una tubería	[m/s]
V_d	Velocidad crítica de deposición	[m/s]
$V_{laminar} = ID \tau_w/8\eta (1 - 4/3 Z + 1/3 Z^4)$	Velocidad de flujo laminar en una tubería	[m/s]
V_t	Velocidad crítica de transición viscosa	[m/s]
V_{te}	Velocidad terminal de partículas por depositarse	[m/s]
$V_{turbulento} = 2.5u^* \ln (\rho_m ID u^* /\eta) + 2.5u^* \ln [(1-Z)/(1+Z)] + u^* Z (14.1+1.25Z)$	Velocidad de flujo turbulento en una tubería	[m/s]
$V_r = (C_w/SG_s)/(1-C_w)$	Tasa de volumen	[-]
wt	Espesor de pared de una tubería	[mm]
$y = R - r$	Distancia desde la pared de una tubería	[m]
$Z = \tau_y/\tau_w$	Tasa de esfuerzo en las paredes (al borde)	[-]
Z_{max}	Diferencia de nivel del punto máximo a superar	[m]
ε	Rugosidad absoluta de las paredes de una tubería	[mm]
$\Delta\eta = \eta_{medido} - \eta_{estimado}$	Variación de la viscosidad plástica	[cP]
$\Delta\tau_y = \tau_y_{medido} - \tau_y_{estimado}$	Variación de los esfuerzos de fluencia	[Pa]
$\gamma = d\gamma/dt = dV/dy$	Tasa de corte	[1/s]
$\eta = \tau/\gamma$	Viscosidad plástica o aparente (Bingham)	[Pa-s, cP]
η/μ	Viscosidad reducida	[-]
μ	Viscosidad absoluta (fluidos Newtonianos)	[Pa-s]
$\rho_m = \rho_L + C_v (\rho_s - \rho_L)$	Densidad de una pulpa o mezcla	[kg/m ³]
ρ_L	Densidad del líquido transportante, usualmente agua $\rho_{agua} = 1,000 \text{ kg/m}^3$	[kg/m ³]
ρ_s	Densidad de las partículas sólidas	[kg/m ³]

τ	Esfuerzo de corte	[Pa]
$\tau_w = (H_{fm}/L) (ID/4)$	Esfuerzo de corte en las paredes de una tubería	[Pa]
τ_y	Esfuerzo de fluencia (Bingham)	[Pa]
$\psi = N_e/C_v$	Variable para estimar la relación H_{fm}/H_{fL}	[-]
$\sum H_s$	Sumatoria de pérdidas singulares de presión	[m]

GLOSARIO

Este glosario define los principales términos técnicos que son usados en esta Tesis. Donde prácticamente, las definiciones siguen la norma NIST 960-3: “The use of Nomenclature In dispersión Science and Technology”.

Agregado: Término general usado para describir una masa cohesiva de partículas, el cual incluye aglomerantes y coagulantes. La formación de agregados es llamado agregación.

Arcilla: Partículas sólidas con tamaños menos de 2 μm .

Arena: Partículas sólidas en el rango de tamaños de 63 a 2,000 μm .

Concentrado: Un concentrado es una forma de sustancia el cual tiene como mayoría su base removida (en el caso de un concentrado mineral será el agua). Un beneficio de producir un concentrado mineral es que existe una reducción en peso y volumen para su transporte como un concentrado, el cual puede ser reconstituido con el tiempo usando la adición de un solvente (usualmente agua).

Concentración en peso/volumen: Relación entre el peso/volumen de las partículas sólidas y el peso/volumen total de una pulpa.

Consistencia: Termino general para las propiedades de un fluido de una suspensión. Para un fluido Newtoniano, la consistencia es equivalente a viscosidad. Una “alta consistencia” significa que la suspensión tiene una viscosidad aparente con una tasa de corte que es más grande que una suspensión de “baja consistencia”.

Corte: Movimiento relativo de las capas paralelas adyacentes de un material.

Curva del flujo (reograma): Una representación gráfica del comportamiento del flujo del fluido bajo corte, en el cual el esfuerzo de corte es relacionado a la tasa de corte.

Curva del flujo (tubería): Una representación gráfica del comportamiento del flujo de un fluido, en el cual la gradiente de presión es relacionada a la velocidad total.

Ecuación constitutiva: Una ecuación algebraica para describir el comportamiento de un flujo según un modelo reológico. Generalmente, describe la relación entre dos de los siguientes parámetros: viscosidad aparente, esfuerzo de corte y tasa de corte.

Esfuerzo de corte: Componente del esfuerzo, que causa que sucesivas capas paralelas de un cuerpo material se muevan relativamente unas a otras en sus propios planos de corte.

Esfuerzo de fluencia: Valor crítico del esfuerzo de corte; debajo del cual, un material ideal visco-plástico no fluirá. Una vez que el esfuerzo de fluencia es excedido, el material fluirá como un líquido Newtoniano.

Estructura: Agrupación causada por la formación de vínculos físicos estables entre las partículas sólidas en una suspensión, que afecta el comportamiento reológico de un material y causa propiedades plásticas.

Fase líquida: El medio suspensorio que exhibe continuidad a través de una dispersión sólido - líquido o gas – líquido.

Finos: Partículas más pequeñas que $37\ \mu\text{m}$ y que pasaran a través de la malla Tyler #400. Esto incluye arcillas y pequeñas partículas de limos.

Flujo: Deformación continua e incrementada de un material bajo la acción de fuerzas finitas que eventualmente no regresa a cero cuando las fuerzas son retiradas.

Flujo de estado fijo: Condición bajo el cual, un esfuerzo constante o tasa de corte constante es mantenida por suficiente tiempo, para permitir equilibrio dinámico a ser logrado en un fluido, conteniendo una estructura dependiente del tiempo.

Flujo laminar: Corriente o línea de flujo de un fluido viscoso sin grandes fluctuaciones irregulares.

Flujo turbulento: Flujo de un fluido viscoso con grandes fluctuaciones irregulares en la velocidad y la presión local.

Grava: Partículas sólidas en el rango de tamaños de 2,000 a 4,000 μm .

Gruesos: Partículas más grandes de 37 μm y que no pasarán a través de la malla Tyler #400. Esto incluye las gravas, arenas y grandes partículas de limos.

Limos: Partículas sólidas en el rango de tamaños de 2 a 63 μm

Modelo reológico: Modelo físico para explicar el comportamiento del flujo (consistencia) de un fluido. El comportamiento resultante es descrito por una ecuación constitutiva. En la práctica, el término “modelo reológico” es frecuentemente usado para indicar “ecuación de constitución”.

Newtoniano: Modelo de flujo para fluidos con una relación lineal existente entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte. Esto es lo mismo que una tasa de corte independiente de la viscosidad.

No-Newtoniano: Cualquier fluido que no exhibe una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte. Esto es lo mismo que una tasa de corte dependiente de la viscosidad.

Núcleo turbulento: En flujo turbulento, es la región al centro de una tubería donde el flujo es dominado por los efectos inerciales y donde los efectos viscosos son insignificantes.

Número de Reynolds: Número adimensional que expresa la relación de las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas.

Partícula: Cualquiera discontinuidad en un sistema disperso. Este término será usado en referencia a materiales sólidos y agregados.

Pasta: Suspensión semi-sólida con una consistencia suave y manejable. En procesos minerales, pasta se refiere a una suspensión con un contenido líquido sobre el límite plástico y un esfuerzo de fluencia aparente sobre los 100 Pa.

Plástico: Propiedad en el cual un material se comporta como un sólido cuando el esfuerzo está bajo algún valor crítico (esfuerzo de fluencia), pero fluye cuando este valor es excedido.

Pulpa: Término general para una suspensión concentrada.

Relaves: Los relaves (o cola) son desechos tóxicos subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente son una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas. Los relaves contienen altas concentraciones de químicos y elementos que alteran el medio ambiente, por lo que deben ser transportados y almacenados en "tanques o pozas de relaves" (relaveras) donde lentamente los contaminantes se van decantando en el fondo y el agua es recuperada o evaporada. El material queda dispuesto como un depósito estratificado de materiales sólidos finos.

Reología: Ciencia de la deformación y flujo de la materia. El término "reología" es comúnmente usado para significar "consistencia".

Reómetro de cilindro concéntrico: Reómetro rotacional donde la consistencia de un fluido es medido por el corte del material en el espacio entre un cilindro interior (péndulo) y un cilindro exterior (taza). El esfuerzo de corte es determinado por el torque inducido y la tasa de corte es determinada por la velocidad rotacional, las dimensiones del espacio y una reología inferida del material.

Sub-capa laminar: En flujo turbulento, es la región cerca a las paredes de una tubería, donde el comportamiento del flujo es dominado por los efectos viscosos y donde los efectos inerciales son insignificantes.

Sub-capa viscosa: En flujo turbulento, la sub-capa viscosa incluye la sub-capa laminar y la porción de la zona de transición entre las paredes de un medio y la capa de borde.

Suspensión estable: Suspensión que no tiene agregaciones significativas, como medidas sobre un esquema de tiempo relevante (ejemplo: el tiempo que toma la suspensión para viajar a través de una tubería).

Tasa de corte: Tasa de cambio de la presión de corte en el tiempo.

Tasa de viscosidad (viscosidad relativa): Relación entre la viscosidad de una suspensión y la viscosidad del medio transportante.

Tasa de volumen: Volumen de sólidos dividido por el volumen de agua.

TDH: Carga dinámica total requerida para realizar un transporte hidráulico, incluye la sumatoria de la diferencia de nivel a superar, las pérdidas de presión y las pérdidas singulares de presión.

Visco plástico: Propiedad en el cual, el material se comporta como un sólido cuando el esfuerzo está debajo de cierto valor crítico (esfuerzo de fluencia), pero que fluirá como un líquido viscoso cuando este valor sea excedido.

Viscosidad (viscosidad aparente): La relación entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte bajo un simple corte. Para un flujo Newtoniano, la viscosidad es independiente de la tasa de corte. Para líquidos no-Newtonianos, la viscosidad varía con la tasa de corte.

Viscosidad aparente: Razón entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte a cierto valor nominal de la tasa de corte y tiempo. La viscosidad aparente cambia con la tasa de corte para fluidos no-Newtonianos y con tiempo para fluidos dependientes del tiempo.

Viscosidad plástica: Límite superior de la tasa de corte implicada por la consistencia de un modelo para un material visco-plástico (por ejemplo un plástico Bingham).

Viscoso: Tendencia de un líquido para resistirse al flujo como resultado de la fricción interna. Durante un flujo viscoso, la energía mecánica es disipada como calor y el esfuerzo desarrollado depende de la tasa de deformación.

Zona de transición: En flujo turbulento, es la región entre la sub-capa laminar y el núcleo turbulento, donde ambas viscosidades y efectos inerciales son significantes.

SECCIÓN I

CAPÍTULO I:

INTRODUCCIÓN

1.1 **Procesamiento de minerales**

Mientras que la tecnología en la mayoría de las especialidades o ciencias ha cambiado dramáticamente en los últimos tiempos, el procesamiento de minerales sigue siendo el arte o ciencia de romper el mineral en pequeñas partículas sólidas (o encontrar aquellas ya quebradas de forma natural), separando el mineral con valor comercial o útil y disponiendo del remanente o no útil. Algo más que no ha cambiado desde el siglo XVI, es que muchas de las operaciones de procesamiento de minerales son llevadas o transportadas en mezclas de sólidos (minerales) y un líquido transportante (usualmente agua o una solución acuosa) definido como “pulpa” o el término inglés “slurry”.

La unidad de operación para el transporte de pulpas incluye: molienda, fraccionamiento por hidro-ciclones, tamizado húmedo, centrifugado, vibrado, filtrado, flotación, separación de densidad media, almacenamiento en tanques agitadores, filtrado del concentrado, transporte por canaletas o tuberías, espesamiento, intercambiadores de calor y finalmente la disposición de relaves en una relavera o un depósito natural o artificial.

Un diseño exitoso de operación de instalaciones de procesamiento de mineral, depende fundamentalmente de comprender el comportamiento del flujo de una pulpa. Específicamente, depende de comprender como la pulpa fluirá a través y entre las unidades de operación.

1.2 **Comportamiento del flujo de una pulpa**

Cuando una pulpa está compuesta por partículas muy gruesas (como las gravas), los efectos inerciales de las partículas dominarán, la fase fluida y sólida retendrán sus identidades separadas y el incremento en la viscosidad aparente de la mezcla comparado con el líquido transportante será mínimo. Cuando se transporte esta

pulpa por una tubería, las partículas sólidas se asentarán rápidamente y tenderán a depositarse en el fondo o serán movidas por la viscosidad de arrastre del fluido en movimiento sobre la cama de sólidos. Por lo tanto, este tipo de pulpas serán “depositables” y el flujo será “heterogéneo”, en donde la concentración de sólidos varía significativamente a lo largo del eje vertical de la tubería.

Cuando una pulpa está compuesta por partículas muy finas (como las arcillas), las partículas sólidas se depositarán muy lentamente y la agitación termal (movimiento Browniano) puede ser suficiente para mantener a las partículas suspendidas indefinidamente. La presencia de esos sólidos puede tener un efecto significativo en las propiedades de la mezcla, resultando usualmente en un incremento agudo en la viscosidad de la mezcla comparado con la del líquido transportante. Frecuentemente estas mixturas exhiben una consistencia no-Newtoniana. Cuando se transporte esta pulpa en una tubería, las partículas tienden a estar uniformemente distribuidas a lo largo del eje vertical de la tubería, incluso en flujo laminar, por lo tanto el flujo será “homogéneo”. Estas pulpas “no-depositables” pueden ser analizadas como “fluidos continuos” con las propiedades promedio de la mezcla. El comportamiento del flujo de una pulpa homogénea puede estar fuertemente afectado por la presencia de químicos (como dispersantes, floculantes, reactivos, disolventes, etc.) en el fluido transportante.

Muchos comportamientos de flujo de pulpas pueden ser considerados entre estos dos extremos. Las partículas en las pulpas de interés de la ingeniería de procesamiento de minerales son generalmente de un tamaño intermedio (limos y arenas) y el comportamiento es intermedio entre los extremos mencionados. Cuando estas pulpas “moderadas y depositables” fluyen en una tubería, las partículas tienden a depositarse en un flujo laminar, pero son más o menos distribuidos a lo largo del eje vertical de la tubería en un flujo turbulento. El flujo turbulento de estas pulpas es referido como “pseudo-homogéneo”.

Casi todas las pulpas minerales industriales tienen un amplio rango de tamaños de partículas, frecuentemente abarcan varios órdenes de magnitud. Por lo tanto, el tamaño de las partículas minerales y concentración, usualmente cambiarán cuando se mueven a través de la planta o dentro de una unidad de operación (por ejemplo en un molino o en un espesador). El comportamiento del flujo tenderá a volverse rápidamente homogéneo, así como las partículas serán más pequeñas y la

concentración en volumen de sólidos se incrementará. Durante las etapas de procesamiento, una variedad de químicos son adicionados, los cuales pueden afectar dramáticamente el comportamiento del flujo con suspensiones que contienen partículas finas principalmente.

1.3 Diseño hidráulico de tuberías

La “unidad” más común de manejo de pulpas en cualquier planta de procesamiento de minerales es una tubería. Una planta tendrá miles de tuberías de varios tamaños. Muchas de las operaciones mencionadas anteriormente son alimentadas y/o tienen sus salidas por medio de tuberías de pulpas.

Según D.J. Hallbom (Referencia 7), tuberías de pulpas pequeñas o cortas han sido usadas por muchos años en operaciones de dragado, en facilidades de procesamiento de mineral y para disposición de relaves. En 1957, ya existía en operación una tubería de 174 km con 250 mm de diámetro para la tubería de carbón consolidado de Ohio y también uno de 116 km de largo con 150 mm de diámetro para una tubería de gilsonita en Colorado - Utah. Entre 1957 y 1977, una docena de tuberías sobre los 25 km de longitud fueron construidas y operadas y una gran variedad de materiales fueron transportados incluyendo limos, fosfatos, concentrados de cobre y zinc.

Por ejemplo, existe una tubería de 85 km con 225 mm diámetro para una tubería de concentrado de hierro en Tasmania (1967) que hizo viable el usar tuberías para transportar materiales abrasivos. Otros de los mayores sistemas incluyen uno de 439 km con 450 mm de diámetro para la tubería de carbón en Arizona (1972) y uno de 395 km de largo con 500 mm de diámetro para la tubería de concentrado de hierro en Brasil (1977) y para no ir lejos en nuestro país tenemos el concentraducto de Antamina con 230 km de largo y diámetros de 250, 228 y 200 mm que transporta concentrados de cobre y zinc por lotes o “batches”, separados por agua de procesos.

Mientras el uso de grandes factores de seguridad, reglas de generales o empíricas (“rules-of-thumb”) y técnicas de “ensayo y error” fueron adecuadas para diseñar tuberías de 100 m de dragado o 1,000 m de tuberías de relaves, estas técnicas fueron inservibles para tuberías de transporte de 100,000 m. El desarrollo de las

tuberías de transporte de larga distancia requirió de un desarrollo significativo en la tecnología de transporte de pulpas. Programas extensivos y costosos de ensayos fueron llevados a cabo para proveer de métodos de diseño, comportamiento de materiales y la confiabilidad de los componentes mecánicos. Esto incluyó la determinación de:

- Tamaño óptimo de la molienda.
- Contenido óptimo de sólidos.
- Velocidades críticas de transición y deposición.
- Gradientes hidráulicas para varias velocidades de pulpas.
- Operación y metodologías para reiniciar una tubería llena de pulpa.

En la **Figura 1.1** se presenta un diagrama esquemático típico de un sistema de transporte de carbón.

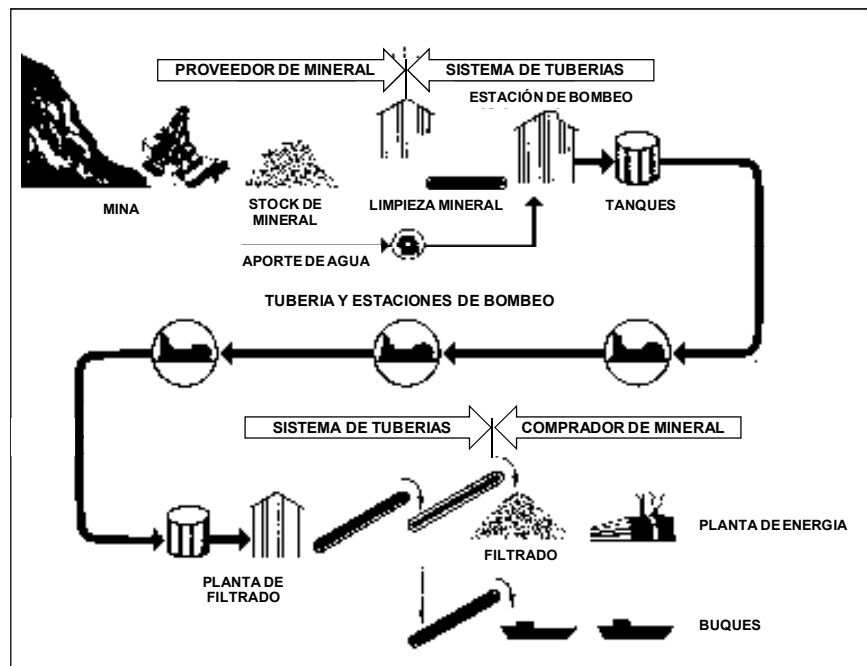


Figura 1.1: Diagrama esquemático típico de un sistema de transporte de carbón
(Adaptado de E.J. Wasp y otros - Referencia 8)

1.3.1 Caracterización de pulpas

El primer paso en el diseño de una tubería de transporte de pulpas es la caracterización del material. Un número estándar de pruebas son llevadas a cabo como:

- Medidas de la distribución de tamaños de partículas (por tamices y/o laser).
- Medidas de la densidad de sólidos secos (por picnómetro aireado o el matraz Le Chatelier).
- Ensayos de deposición, para determinar la profundidad de la cama depositada.
- Ensayos de penetración para determinar la “dureza” de la cama depositada, para predecir la facilidad de re-suspender los sólidos después de una detención del flujo en una tubería.
- Ensayos de deslizamiento (por ejemplo medir el ángulo en el cual, la cama depositada en una tubería empezará a deslizarse) para determinar la pendiente máxima para secciones largas de tuberías.
- Ensayos de conductividad, para determinar el potencial corrosivo de las tuberías de acero desnudo (sin “*liner*” o recubrimiento) o sin protección anticorrosiva.
- Ensayos de abrasión para determinar el desgaste potencial de las partes expuestas al movimiento de a la pulpa (ejemplo los pistones y cilindros en las bombas de pistones).

1.3.2 Estimación de la gradiente de presión

El parámetro crítico de diseño de cualquier tubería de transporte de pulpa, es la gradiente de presión o las pérdidas de presión por unidad de longitud. Esto permite que las tuberías, bombas y motores sean seleccionados y optimizados. Además, también permite el transporte óptimo para un rango de concentraciones de sólidos a ser definido. Las tuberías antiguas de larga distancia fueron diseñadas en base a gradientes de presión obtenidos en circuito de ensayos o “*test loops*”.

1.3.2.1 Diseño basado en circuito de ensayos

Un circuito de ensayos básico está compuesto principalmente por un tanque de pulpa, una bomba de pulpa, un método de medida de flujo (flujómetro) y dispositivos para medir los diferenciales de presión (trasmisores de diferencial de presión) sobre una longitud conocida de tubería recta. La pulpa es bombeada a través del circuito, con un rango de caudales, para medir el flujo y las caídas de presión, dando un gradiente de presión versus una curva de caudales.

Dos o más ensayos con secciones de diferentes diámetros o materiales de tuberías (por ejemplo varias rugosidades) pueden ser incluidas para admitir más información a ser reunida en cada corrida de ensayos y corregir los datos por deslizamiento en las paredes, si esto es necesario.

Se puede incluir instrumental adicional para recolectar más información como el contenido de sólidos (con una aguja movable de densidad gamma) o la distribución del tamaño de partículas (puertos de muestras) a lo largo del eje vertical de la tubería.

La degradación de las partículas sólidas puede ser medida tomando muestras antes y después del ensayo. Los ensayos pueden ser realizados por largos períodos para ver si los sólidos gruesos tienden a agruparse o depositarse en el fondo de la tubería en el tiempo (“arenamiento”), aunque esto es infructuoso si la alimentación de partículas gruesas es limitada.

En la **Figura 1.2** se muestra un diagrama esquemático de un circuito de ensayos utilizado para modelar el transporte de una pulpa con la medición de la presión a diferentes secciones de tuberías y condiciones de flujo.

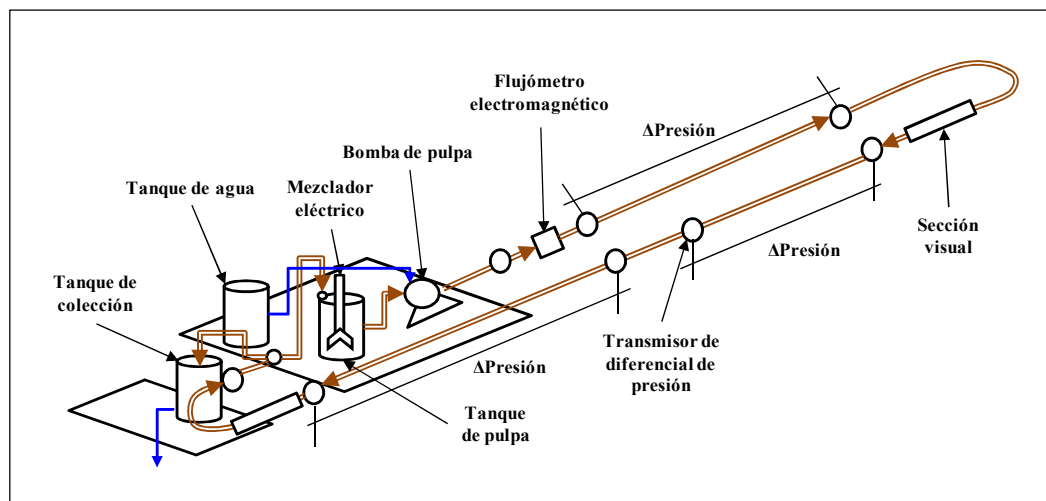


Figura 1.2: Diagrama esquemático de un circuito de ensayos de pulpas
(Adaptado de D.J. Hallbom - Referencia 7)

1.3.2.2 Diseño basado en reología

Por los años 1980, el transporte de pulpas a larga distancia logro ser una tecnología madura. Los resultados de los programas de ensayos previos y de datos

de sistemas operando, han sido correlacionados con ensayos de laboratorio a escala. Se volvió práctico diseñar sistemas convencionales de transporte hidráulico usando el comportamiento del flujo (“reología”) de un material ensayado en un laboratorio a escala, para predecir el comportamiento del flujo hacia una escala industrial, frecuentemente a una configuración muy diferente. Como resultado, no fue más necesario hacer circuitos de ensayos para diseñar tuberías.

1.3.3 Ventajas del diseño basado en reología

A primera vista, el uso de un circuito de pruebas podría aparecer como superior al diseño basado en reología, primero porque las curvas de gradiente de presión son medidas directamente, en vez que ser estimadas usando un modelo de flujo semi-empírico y segundo que los efectos secundarios como deslizamientos en las paredes y formación de la cama de fondo son automáticamente considerados, al menos en teoría. Además, información adicional, tal como la degradación de partículas y los factores de clasificación (“*de-rating*”) para bombas pueden ser obtenidos de una manera directa. Sin embargo, hay un número de ventajas del diseño basado en reología como son las siguientes:

1.3.3.1 Tamaño de la tubería del ensayo

Determinar el tamaño de las tuberías de una sección del circuito de ensayos es problemático, porque el tamaño final de una tubería no es conocido en la fase de diseño. De hecho, seleccionar el tamaño de tuberías es uno de los principales objetivos del diseño hidráulico.

El diseñador de un sistema, es forzado a adivinar ese tamaño, a menos que existan otras bases (por ejemplo una tubería existente). La probabilidad de tener la correcta tubería del ensayo es incrementada, si dos o tres tamaños son usados. Sin embargo, hay un límite práctico como un rango de tamaños que se puede tener, según D.J. Hallbom (Referencia 7).

Asumiendo un circuito de ensayos con instalaciones de secciones de tuberías de 100 y 200 mm. Un típico rango de velocidades para tuberías industriales será 1.0 a 3.0 m/s. Para conseguir la velocidad de diseño en una tubería pequeña, el rango de velocidad en una tubería más grande podría ser de 0.25 a 0.75 m/s y si la pulpa se

asienta, aparecerá como “arenado” (ejemplo de la constitución de una cama de sólidos y de atoro de una tubería). Para conseguir 1.0 a 3.0 m/s en una tubería grande, la velocidad en la tubería pequeña debería estar entre 4.0 a 12.0 m/s y la bomba deberá impulsar la pulpa sobre el rango total del flujo, osea desde 1.0 a 12.0 m/s en una tubería pequeña.

1.3.3.2 Muestras

Las instalaciones de circuitos de ensayos de diámetros mayores requieren de grandes cantidades de muestras. Sin embargo, pocas veces hay una gran cantidad de muestras de sólidos “representativas” y disponibles en las etapas iniciales de diseño. Además, una planta o mina no existe, cuando las tuberías de pulpa están siendo diseñadas para unas nuevas instalaciones, las muestras provienen de bancos o plantas pilotos.

También, las muestras disponibles no pueden ser “representativas” desde que los procesos (como los tamaños de molienda, reactivos de flotación, floculantes de los espesadores, etc.) están aún en desarrollo o investigación. Puede haber muchos procesos bajo consideración, cada uno con diferentes tamaños de partículas y propiedades de fluidos transportantes. Con pulpas finas (arcillas o limos), el impacto de sustancias disueltas en el fluido de transporte puede ser determinante para el transporte.

Una instalación de circuito de ensayos a gran escala y con una longitud total de 100 m, con 300 mm de diámetro de tubería, podría requerir cerca de 8,000 litros de pulpa. Para hacer doce circuitos de ensayos, serían necesarios 100,000 litros de pulpa para ser preparados, ensayados y dispuestos. En comparación, doce ensayos en un reómetro cilíndrico concéntrico toman menos que 10 litros de muestras sin considerar el tamaño de la tubería.

1.3.3.3 Instrumentación

Las instalaciones de los circuitos de ensayos necesitan instrumentación con el orden de producir datos para la curva del flujo. Los principales instrumentos requeridos son para medir el flujo de la pulpa y el diferencial de presiones. Los flujómetros o caudalímetros son calibrados con un fluido Newtoniano (agua), los cuales pueden dar errores significativos con fluidos no-Newtonianos.

Los flujómetros magnéticos darán medidas incorrectas si la pulpa contiene magnetita. Los transmisores de presión son diseñados para medir pequeñas diferencias de presión y tienden a ser frágiles y pueden ser dañados si son expuestos a altas presiones. Los transmisores de presión más resistentes, pueden no ser suficientemente precisos para medir pequeños diferenciales de presión.

Ciertos instrumentos no tienen una perfecta precisión y los errores tienden a ser un porcentaje de las lecturas de la escala total. La gradiente de presión de un fluido a baja velocidad puede ser solamente un porcentaje bajo de la escala total de las lecturas. Esto podría ser del mismo orden de magnitud como el error del instrumento. Los métodos para improvisar la precisión incluyen usar equipos de alta calidad y usar diferentes instrumentos para diferentes rangos de ensayos. Ambas opciones incrementarán el costo y la mejora en la precisión que puede ser no justificable para su uso en un sistema simple.

1.3.3.4 Extrapolación de resultados

Esos problemas pueden ser evitados por el uso de instalaciones de calidad en circuitos de ensayos, muchas de estas instalaciones están disponibles en universidades del extranjero. Esto elimina el costo de construir instalaciones, aunque los costos de transportar toneladas de muestras al lugar de los ensayos y disponer de ellos después, pueden ser sustanciales. Esas instalaciones de circuitos de ensayos, usualmente tienen instrumentos de alta calidad y sistemas sofisticados de colección de datos. Sin embargo, instalaciones de investigación existentes tendrán un limitado número de tamaños de tuberías disponibles. Como resultado, puede ser necesario extrapolar los resultados obtenidos en una tubería de ensayo de 50 mm hacia el diámetro final de la tubería, el cual puede ser de 300 mm o más.

Claramente, extrapolando entre tamaños de tuberías, invalida la mayor ventaja de un circuito de ensayos, que es la habilidad de medir directamente la gradiente de presión. La extrapolación requiere el uso de teorías estadísticas, para estimar el impacto del tamaño de la tubería en la gradiente de presión. De hecho, las instalaciones de circuitos de ensayos es usado como un reómetro capilarmente largo para un diseño basado en reología.

1.3.3.5 Degradación de partículas

Para limitar la cantidad de muestras usadas, la práctica común es diluir la pulpa en el circuito. Como resultado, la pulpa hará un mayor número de circuitos a través de la bomba y la tubería. Si bombas centrífugas son usadas, los altos esfuerzos de corte cerca al impulsor pueden causar el desgaste de las partículas. Partículas muy finas son formadas por la rotura de las partículas más grandes, causando que las propiedades físicas de la pulpa cambien entre ensayos y el resultado del circuito de ensayos no será representativo.

1.3.3.6 Otros equipos

Mientras la gradiente de presión en una tubería es importante, es solamente una parte pequeña del diseño de un sistema de transporte de pulpas. Un flujo de un circuito de ensayos da una simple pieza de información, un mejor conocimiento de la consistencia de la pulpa tiene mucha más aplicabilidad en los siguientes casos:

- Los tanques de almacenamiento de pulpa tienen agitadores que deben ser dimensionados (por ejemplo en diámetro, velocidad, potencia, etc.). Los anillos disipadores (orificios cerámicos) que necesitan ser dimensionados. Los drenajes de piso que necesitan ser dimensionados y a cierta inclinación. Todos los anteriores equipos o instalaciones, son afectados por la consistencia de la pulpa y no pueden ser diseñados directamente de los datos de un circuito de ensayos.
- La presión y eficiencia de impulsión de las bombas centrífugas de pulpa necesitan ser estimadas. Esto podría ser ensayado directamente en un circuito de ensayos. Sin embargo, a menos que la bomba usada en el ensayo sea del mismo tipo y tamaño que la que será usada en la tubería final, alguna teoría de escalamiento o leyes de afinidad debe ser usada, según A. Grzina (Referencia 1).
- En adición, el rendimiento de muchas unidades de procesamiento de mineral está afectado por la consistencia de la pulpa. Esto incluye la molienda, espesamiento, cicloneado, calefacción, separación, mezclado, transporte por

canaletas (rampa en flujo a superficie libre), separación media de densidades, etc. por mencionar las principales unidades de operación.

1.4 Aplicación de la reología en el procesamiento de minerales

Desde que la reología de una pulpa afecta el comportamiento de la mayoría de unidades de operación, será razonable asumir que el diseño basado en reología juega una rol clave en la ingeniería del procesamiento de minerales.

Pero actualmente, no se le da mucha importancia a la reología y solo es referida como complemento para el diseño de unidades de procesamiento de minerales o para el diseño de plantas de beneficio o metalúrgicas, indicando que la reología afecta la forma en que dichos procesos o equipos operarán, concluyendo que la reología no es “aplicada” comúnmente en la industria de procesamiento de minerales.

El comportamiento no-Newtoniano de una pulpa es ignorado grandemente, permitiendo el uso de “factores de seguridad”, evitado por la remoción de los “finos” (limos o arcillas) o eliminada usando agua de dilución. Hay situaciones, donde el comportamiento del flujo no-Newtoniano necesita ser considerada y la “solución de dilución” no puede ser usada como en el espesamiento de pulpas.

1.5 Espesamiento de pulpas

Según T.C. Aude y otros (Referencia 16), una pulpa puede ser considerada como un material de transición entre el rango líquido (a muy bajas concentraciones en volumen como el agua turbia) y sólido (a muy altas concentraciones en volumen como “*cake*” o tortas o tierra). El comportamiento del flujo de una pulpa también estará entre las transiciones de líquido a sólido, cuando la concentración en volumen se incremente.

El procesamiento de minerales ha sido frecuentemente transportado como pulpas diluidas “convencionalmente”. Los problemas asociados con comportamiento de flujos no-Newtonianos de pulpas finas, pueden ser siempre reducidos o eliminados por la adición de líquido transportante. Esto permite al diseñador u

operador trabajar en el buen “entendimiento” del régimen Newtoniano (o pseudo-Newtoniano).

Sin embargo, hay muchos casos donde está “solución de dilución” no es práctica o deseable. En las últimas décadas, ha habido un progreso gradual del procesamiento y transporte de “pulpas espesadas”.

Las pulpas espesadas son suspensiones, donde la concentración de sólidos es suficientemente alta, que las propiedades no-Newtonianas afectan grandemente el comportamiento del flujo en escala macro, pero no tan grande como para volverse frágil o quebradizo (por ejemplo una torta). Las pulpas espesadas están compuestas principalmente de partículas finas (limos y arcillas) a relativamente altas concentraciones de sólidos. Las pulpas espesadas pueden contener partículas gruesas, pero ello no significa que afecte el comportamiento del flujo.

La característica dominante de las pulpas espesadas es el esfuerzo de fluencia. Si el esfuerzo de fluencia es más grande que 100 Pa y su comportamiento es como un semi-sólido, con una consistencia suave y manejable, dicha pulpa espesada es frecuentemente referida como “pasta”.

Muchas áreas de desarrollo están moviendo a la industria minera a través del incremento en el uso de los sistemas de pulpas espesadas. Los más importantes son discutidos a continuación:

1.5.1 Relaves espesados

Una importante aplicación para las tuberías de pulpas, es el transporte hidráulico de relaves mineros (residuos o desechos) hacia relaveras, denominadas como “relaveras” o reservorios de relaves. Históricamente, los relaves han sido transportados y depositados a bajas concentraciones de sólidos.

Cuando los relaves son descargados en una relavera como un relave convencional (a bajas concentraciones de sólidos), las partículas tienden a segregarse. Los materiales gruesos se depositarán cerca de los puntos de descarga formando una “playa” y los materiales finos serán “lavados” o desplazados dentro de la relavera, formando una cama de lodos.

La cama de lodos tendrá una pequeña resistencia cuando este húmeda y no estará bien compactada. En el caso de una ruptura del dique de la relavera, los relaves perdidos pueden fluir y causar un flujo de lodo peligroso (por ejemplo un “huayco”), donde el lodo será difícil de drenar, haciendo difícil la recuperación de dicha área.

Cuando los relaves están espesados, las partículas gruesas y finas permanecen mezcladas cuando fluyen hacia la relavera. Esos relaves no segregados se auto compactan a altos contenidos de sólidos y donde el material fino queda retenido. La compactación de los relaves no segregados tiene un alto esfuerzo de corte como los relaves con finos; por lo tanto, son menos propensos a fluir en el evento de una ruptura o falla del dique de una relavera.

Además, llenar demasiado la relavera con un gran espejo de decantación y causar el lavado de finos, son algunos de los principales riesgos de las relaveras, un volumen apropiado de agua almacenada reduce este riesgo. La disposición de relaves espesados fue implementado inicialmente en 1973 en la mina Kidd Creek en Ontario – Canadá. Desde entonces, muchos centenares de sistemas de relaves espesados han sido instalados como nuevos sistemas o convirtiendo los sistemas existentes convencionales.

El flujo de pulpas espesadas hacia una relavera formará una pendiente global de 1 a 3% comparada con una pendiente gruesa de 0.2 a 0.5% para los relaves convencionales. Si los relaves espesados son vertidos en capas delgadas y se permite el secado entre las vertidas, se pueden obtener pendientes del 5 a 7%. Pendientes más altas son posibles, si el material es compactado mecánicamente entre vertidas o descargas.

Las pulpas espesadas, pueden ser vertidas desde un punto de descarga central para formar “montículos” de cientos de metros de ancho, con solamente un pequeño perímetro o borde y con una significativa reducción de los costos de las relaveras en áreas con una topografía plana.

1.5.2 Relleno de pasta

Las minas subterráneas resultan de la formación de grandes espacios vacíos que necesitan ser rellenos para estabilizar el área circundante a la extracción. Una

fuente potencial del material de relleno son los relaves de una mina, los cuales están fácilmente disponibles y también reducen la cantidad de relaves a ser dispuestos en la superficie.

Si los relaves son gruesos (arenas), pueden ser usados como descarga libre para un relleno hidráulico; sin embargo, si los relaves son finos (arcillas o limos) estos no pueden drenarse bien y resultaran en un relleno débil.

Un cementante (cemento) es adicionado frecuentemente para incrementar la resistencia del material de relleno fino, formando un concreto débil, similar a una lechada (“grout”).

Un cementante, es un costo operativo mayor para un sistema de relleno cementado; por lo tanto, muchos cálculos son realizados para reducir la dosificación requerida de cemento.

Además, reduciendo el contenido de agua en la pulpa, se reduce la cantidad de cementante requerido, para cumplir totalmente el curado necesario. La pasta resultante tiene un esfuerzo de fluencia de muchos cientos de Pascales, comparado con las pulpas convencionales.

Una manera económica de transportar una pasta por etapas, es por medio de una tubería de pulpa. Las tuberías para rellenos de pasta son de pequeños diámetros (100 a 200 mm) y de unos pocos kilómetros de largo; además, son costosas de instalar si una sección significativa de la ruta de la tubería requiere de túneles a través de roca dura o del desarrollo de caminos de accesos.

Además, hay que considerar que el trazo de la tubería cambiará constantemente debido a las operaciones de relleno que se moverán según las descargas.

En minas subterráneas profundas, los sistemas de pasta fluirán por gravedad o tendrán bombas con presión (o carga) que son solamente una pequeña porción de la presión estática. Estos sistemas son “reológicamente controlados” y el caudal es regulado, incrementando o disminuyendo la consistencia de la pulpa.

La **Figura 1.3** presenta un esquema de una disposición superficial de relaves (tipo pasta) impulsados por una bomba de desplazamiento positivo (bomba de

disposición) y generados por un espesador de cama profunda (espesador para pasta).

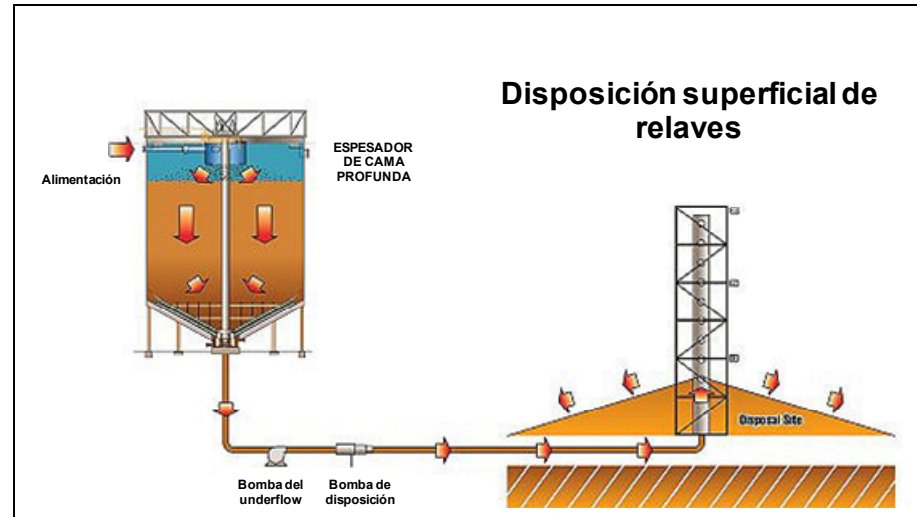


Figura 1.3: Disposición superficial de relaves utilizando un espesador para pasta (Adaptado de T.C. Aude y otros - Referencia 16)

1.5.3 Nuevos equipos

Desarrollos e investigaciones en equipos para procesos, han hecho práctico producir y transportar pulpas espesadas fácilmente “no asentadas” en grandes volúmenes. Algunos de los más importantes desarrollos son:

- Molinos con molienda ultra fina (ejemplo: molinos con agitadores), que permiten la molienda del mineral a tamaños más diminutos que anteriores molinos, resultando en la producción de pulpas finas, que exhiben fuertes parámetros no-Newtonianos a relativos bajos contenidos de sólidos.
- Espesadores de cama profunda (“DCT” o de alta compresión), que permiten altos esfuerzos de fluencia para las pulpas espesadas y producidas más económicamente que en los filtros; particularmente a altas tasas de tonelaje o producción. La habilidad de transferir el alto esfuerzo de fluencia por el “underflow” (parte inferior y de descarga del espesador) hacia tuberías, hace que toda la instalación tenga un costo más efectivo.
- Bombas de desplazamiento positivo (“PDP”), que permiten que pulpas espesadas sean transportadas sin pérdidas significativas y en mejor eficiencia que las observadas en las bombas centrífugas. Las PDP tipo bombas de

diafragma de pistón pueden manejar confiablemente pulpas con esfuerzos de fluencia sobre los 100 Pa y desarrollar presiones de descarga de 25 MPa o más elevadas.

Las bombas modificadas para concreto, pueden manejar pastas de muy altas consistencias con esfuerzos de fluencia sobre los 400 Pa e incluyendo a aquellas pastas que contienen partículas grandes (gravas) y que desarrollan presiones de operación de 12 MPa o más altas.

1.5.4 Nuevos cuerpos minerales

Cuerpos minerales grandes que requieren de tuberías para el transporte de mineral con sistemas grandes, requerirán de grandes cantidades de agua a ser obtenida o tratada para luego disponerla o bombearla de nuevo hacia la mina. La habilidad de incrementar los contenidos de sólidos en las pulpas (por decir del 25 al 40% de concentración en peso), podrían cortar drásticamente el uso de agua y reducir de una forma importante el volumen de agua a ser transferida.

Las operaciones de minas con rocas duras, tienen cuerpos de minerales diseminados. El procesamiento de estos minerales requiere de molienda a tamaños muy finos (frecuentemente menos que 10 μm) para optimizar la recuperación de mineral y el grado de concentración.

Esas partículas finas, pueden ser transportadas como pulpas convencionales a bajos contenidos de sólidos, pero pulpas espesadas podrían ser transportadas sin grandes cantidades de agua. Las pulpas con altas concentraciones de partículas finas tienden a tener un comportamiento no-Newtoniana.

1.5.5 Disponibilidad de agua

Muchas áreas de minas importantes están en regiones desérticas o semi-desérticas, tales como el norte de Chile, la costa del Perú, el suroeste de EEUU, buena parte de Australia o el sur de África. Obtener grandes volúmenes de agua en esas áreas es problemático y/o costoso.

Aun cuando existiesen grandes fuentes de agua fresca, hay usualmente otros involucrados, tales como agricultores (comunidades campesinas) y ganaderos quienes demandan también el recurso.

El abastecimiento por aguas subterráneas tiene una tasa límite de extracción y recuperación y podrían ser de pobre calidad (ejemplo agua con sales). El agua de lluvia tiende a ser por temporadas, dando como resultado períodos del año cuando los ríos son pequeños o no existen.

Las relaveras de relaves espesados no requieren de grandes reservorios asociados con las relaveras convencionales. El total de agua que ingresa en una relavera será pequeña y no necesita segregar el material fino por decantación. Como resultado, solamente un reservorio o espejo de agua pequeño drenará el agua de lluvia de ser requerido.

Desde que la evaporación en las relaveras es la mayor fuente de pérdidas de agua en las regiones áridas, una relavera pequeña es sugerida para los relaves espesados, reduciendo el agua neta a ser usada en relación con la tonelada de mineral procesado.

En regiones áridas donde la disponibilidad de agua es una limitante de operación (ejemplo la costa peruana o el norte de Chile), un sistema de relaves espesados podría incrementar efectivamente la tasa de viabilidad de la producción de una mina.

1.5.6 Diseño de sistemas de pulpas espesadas

Según D. J. Hallbom (Referencia 7), cientos de kilómetros de sistemas de tuberías de pulpa convencionales están siendo actualmente diseñados usando el diseño basado en reología. La habilidad de usar el diseño basado en reología reduce el costo y tiempo requerido para un programa de ensayos aproximadamente del 70 al 90%.

Esta metodología también funciona bien para pulpas nuevas. Muchos sistemas actuales ya están siendo diseñados sin circuitos de pruebas para estimar la gradiente de presión. Además, una vez que una organización ha elaborado una base de datos de ensayos, los estudios conceptuales pueden ser desarrollados para pulpas comunes sin algún ensayo.

Mientras que el tiempo adicional y costo relacionado a un circuito de ensayos es siempre una preocupación, es durante un estudio conceptual o uno de factibilidad

cuando es especialmente preocupante. El diseño de cualquier proceso o sistema comenzará sin la evaluación de muchas opciones potenciales. Para el transporte de pulpas, esto puede incluir camiones de carga, fajas transportadoras y tuberías de pulpas.

A pesar del éxito del diseño basado en reología para sistemas de pulpas convencionales, el circuito de ensayos es aun ampliamente usado para sistemas de pulpas espesadas. Hay muchas razones potenciales de porque el diseño basado en reología para pulpas espesadas ha sido infructuoso.

Sin embargo, el mayor impedimento parece ser los modelos reológicos usados para describir el comportamiento de pulpas espesadas.

La **Figura 1.4** muestra las facilidades o instalaciones dentro del alcance de la norma ASME B31.11: “Slurry transportation piping system”.

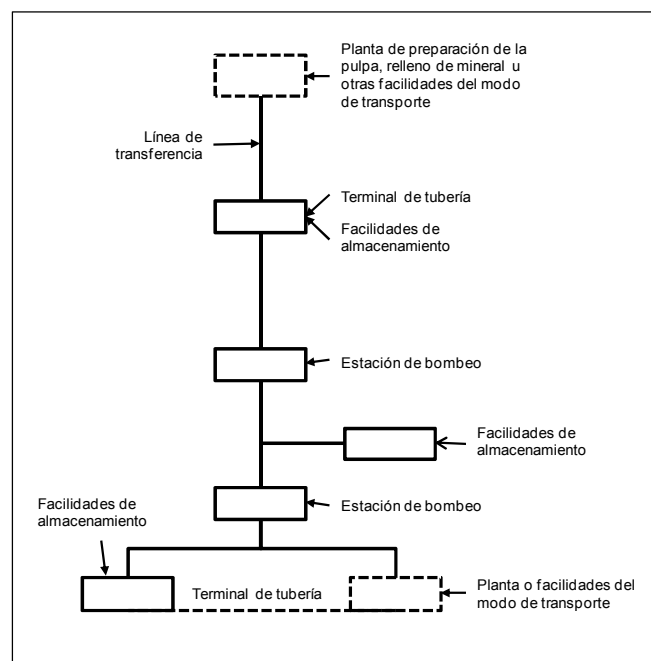


Figura 1.4: Facilidades o instalaciones dentro del alcance de la norma ASME B31.11 (Adaptado de ASME B32.11 - Referencia 2)

1.5.7 Reología virtual

Investigadores en reología de pulpas se han preguntado: “¿Por qué usar una ecuación constitutiva para todo, si se tiene un reograma? (data de un reómetro o de un circuito de ensayos). La data puede ser usada para calcular el

comportamiento de la tubería directamente”. La respuesta es que muchos ingenieros casi nunca tienen data reológica disponible. Aun cuando los resultados de ensayos sean disponibles, tendrán que ser llevados en un número finito de pequeñas muestras y esto no podría corresponder con el material que este fluyendo a través de una tubería en cualquier tiempo dado.

El diseño basado en reología usa lo que puede ser llamado “reología virtual” basado en los parámetros físicos que pueden ser medidos o controlados por un operador de una planta o de una mina.

Hay muchos parámetros físicos que pueden afectar la consistencia de una pulpa y sus efectos pueden ser más pronunciados, como la disminución del tamaño de partículas o de las concentraciones de sólidos. Otros parámetros que afectan la consistencia incluyen a la temperatura, pH, tamaño de partículas, densidad de partículas, material de las partículas, densidad de la pulpa, contenido de sólidos y concentración de coagulantes y/o dispersantes.

1.6 Objetivo de la tesis

1.6.1 Objetivo general

Al ser la hidráulica de pulpas una ciencia compleja y con muchas variables, se ha planteado como objetivo general caracterizar cuatro (4) pulpas minerales típicas, considerando la influencia directa de la concentración de sólidos de dichas pulpas, para que sirva como datos básicos en el diseño de un sistema de transporte de pulpas minerales basado en reología.

1.6.2 Objetivo específico

Como objetivo específico de esta tesis, se ha considerado estimar los parámetros físicos (Gravedad específica de sólidos y distribución granulométrica de partículas) y reológicos (esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica) de cuatro (4) pulpas minerales típicas (2 de concentrado de cobre y 2 de relaves espesados de cobre) a diferentes concentraciones de sólidos, ensayando muestras del mineral sección común del Sección, que es el cobre.

1.7 Perfil de la tesis

El desarrollo de esta Tesis está dividido en tres secciones:

1. La primera sección (Capítulos I y II) es teórica y trata aspectos como la introducción acerca de la industria del procesamiento y transporte de pulpas minerales a través de sistemas hidráulicos y como están influenciados de la caracterización de una pulpa, que es conocer sus parámetros físicos y reológicos.

Además, se efectúa una revisión de la literatura existente acerca de pulpas con conceptos como la descripción de las propiedades de las partículas sólidas y los conceptos de flujos de pulpas como velocidades críticas de transporte, viscosidades y la clasificación de las pulpas según su comportamiento.

2. La segunda sección (Capítulos III, IV y V) tratan acerca de los ensayos con pulpas minerales. Se inicia con la descripción de los ensayos existentes y más comunes en pulpas minerales. Luego se indica los procedimientos de toma y registro de datos de los tres ensayos a realizar como son el análisis de tamices (PSD), la gravedad específica de sólidos (SGs) y el análisis reológico (esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica).

Además, se hace el análisis y discusión de los resultados de estos ensayos, que llevan a caracterizar una pulpa mineral y así conocer sus parámetros físicos y reológicos para poder diseñar apropiadamente un sistema de transporte de pulpas minerales.

3. Como sección final, se tiene el Capítulo VI de conclusiones y recomendaciones del estudio de investigación, en donde se describen las principales conclusiones, recomendaciones y futuras investigaciones como resultados de los ensayos realizados para cada una de las cuatro muestras de pulpas minerales de cobre (2 de relaves y 2 de concentrado).

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Introducción

Según B.E. Abulnaga (Referencia 4), una pulpa es esencialmente una mezcla de sólidos y líquidos (generalmente agua). Sus características físicas son dependientes de muchos factores tales como el tamaño y distribución de partículas, concentración de sólidos en la fase líquida, tamaño de la tubería (diámetro interno de la tubería), nivel de turbulencia, temperatura y viscosidad absoluta (o dinámica) del fluido transportante. La naturaleza ofrece muchos ejemplos de pulpas como inundaciones que llevan partículas finas y gruesas. (Ver **Figura 2.1**)

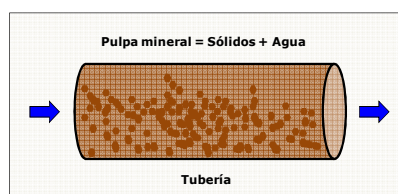


Figura 2.1: Diagrama de una pulpa mineral fluyendo a través de una tubería

El dragado es uno de los más comunes y antiguos procesos que involucran el flujo de pulpas. Los materiales dragados contienen un amplio rango de partículas, restos de árboles, rocas, etc. La minería también ha empleado el concepto de flujo de pulpas en tuberías desde la mitad del siglo XIX, cuando la técnica fue usada para recuperar oro de algunos lugares de California (USA).

Además, tuberías de larga distancia de pulpas han sido construidas en todos los continentes desde la mitad de 1950s. Algunas mezclas de pulpas consisten de sólidos muy finos con altas concentraciones, como las pulpas concentradas y otras mixturas que están basadas en partículas gruesas hasta un tamaño de 150 mm (6") como son algunos relaves mineros.

En este capítulo, se describirán algunos de los principios básicos de pulpas y flujos, ya que se debe conocer y caracterizar las propiedades del sólido a ser minado, transportado, dragado o mezclado con agua.

2.2 Propiedades de los sólidos para mezclas de pulpas

Los flujos de pulpas ocurren en la naturaleza en diferentes formas. Hay muchos asociados con el transporte de limos de una zona a otra. Las fuertes lluvias causan la erosión de sólidos, deslizamientos de lodos (“huaycos”) y el eventual drenaje de pulpas a través de los ríos. Todas estas son pulpas diluidas, en el sentido que la mezcla natural con sólidos será a una concentración en volumen de sólidos a líquidos menor que 15%.

El dragado es una actividad importante de ingeniería; en el cual, la grava es transportada en forma de pulpa hacia una tolva o hacia un bote especial. Una bomba especial es usada frecuentemente en la manga de dragado y una boquilla especial de succión es usada en el extremo de la manga de dragado. Para completar el dragado y formar la pulpa, es esencial cortar a través de las capas de arenas, rocas y restos, usando cortadores especiales de arena y rocas con hojas muy duras y reemplazables.

La composición de una pulpa depende de muchos factores como son el tamaño de las partículas y su distribución. Las partículas pueden ser encontradas en la naturaleza como sólidos o pueden ser creados por los procesos de chancado, molienda y tamizado o zarandeo.

Para aplicaciones como el dragado, los sólidos naturales son bombeados sin chancado o tamizado. Para los procesos mineros, es básico conocer las propiedades físicas de los sólidos para el dimensionamiento de equipos, especialmente de chancado y molienda, así como para la preparación de las pulpas para poder mezclarlas, transportar o bombearlas.

2.2.1 Clasificación de sólidos

Según B.E. Abulnaga (Referencia 4), hay una gran variedad de métodos usados para clasificar sólidos como son:

- Sólidos cohesivos tales como ciertos limos y arcillas con un diámetro de partículas medio más pequeño que 0.025” (0.0625 mm) o malla Tyler #250.
- Sólidos no cohesivos como ciertos limos y arcillas con un diámetro de partículas medio mayor que 0.0625 mm (más que 0.025” o malla Tyler #250)

Además, también existe el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) de la American Society for Testing of Materials (ASTM D2487). Este sistema fue propuesto por Arturo Casagrande como una modificación más general a su sistema de clasificación propuesto en el año 1942 para aeropuertos. Esta clasificación divide los suelos en:

- Suelos gruesos (como gravas o arenas) con partículas sólidas donde más del 50% son retenidas en la malla Tyler #200 o 0.074 mm.
- Suelos finos (como arcillas, limos o suelos orgánicos) con partículas sólidas donde más del 50% pasan la malla Tyler #200.

Para dragados bajo el agua, la fortaleza de una roca es determinada por su núcleo y esta propiedad tiene un efecto importante en la eficiencia del dragado.

Existen muchas clasificaciones de sólidos como la de Herbrich (1991) que propuso una clasificación de sólidos en términos de su fuerza de compresión no confinada. También la Permanent International Association of Navigation Congress (PIANC - 1972) adoptó un sistema de clasificación de sólidos que es recomendada para el uso en dragados.

El estándar ASTM D2488 también ofrece una clasificación de sólidos con un amplio rango de tamaño de partículas como es presentado en la **Tabla 2.1**. Este estándar es ampliamente usado en Norte América.

Tabla 2.1: Rango de tamaños de partículas de sólidos de acuerdo con ASTM D2488

Material	Rango de tamaños en mm	Rango de tamaños en pulgadas
Rocas	> 300	> 12
Empedrados	75 - 300	3 - 12
Grava gruesa	19 - 75	0.75 - 3
Grava fina	4.75 - 19	0.190 - 0.75
Arena gruesa	2.00 - 4.75	0.080 - 0.190
Arena media	0.43 - 2.00	0.017 - 0.080
Arena fina	0.08 - 0.43	0.003 - 0.017
Limos y arcillas	< 0.075	< 0.003

(B.E. Abulnaga – Referencia 4)

La **Tabla 2.2** presenta los factores de conversión entre las tres escalas más comunes para medir el tamaño de partículas.

Tabla 2.2: Conversión entre escalas más comunes de tamaño de partículas

U.S. N°	Tamiz Tyler	Abertura (µm)	Abertura (pulgada)	Tipo de sólidos
-	-	26,670	1.050	Grava
⋮	⋮	⋮	⋮	
-	-	9,423	0.371	
2.5	2.5	7,925	0.312	
3	3	6,680	0.263	
3.5	3.5	5,613	0.221	
4	4	4,699	0.185	
5	5	3,962	0.156	
6	6	3,327	0.131	Arena muy gruesa
7	7	2,794	0.110	
8	8	2,362	0.093	
9	9	1,981	0.078	
10	10	1,651	0.065	Arena gruesa
12	12	1,397	0.055	
14	14	1,168	0.046	
16	16	991	0.039	
20	20	833	0.0328	Arena media
24	24	701	0.0276	
28	28	589	0.0232	
32	32	495	0.0195	
35	35	417	0.0164	
42	42	351	0.0138	Arena fina
50	50	297	0.0117	
60	60	250	0.0098	
70	70	210	0.0083	
80	80	177	0.0070	
100	100	149	0.0059	
120	120	125	0.0049	
140	140	105	0.0041	Limo
170	170	88	0.0035	
200	200	74	0.0029	
250	250	63	0.0025	
-	270	53	0.0021	Limo pulverizado
-	325	43	0.0017	
-	400	38	0.0015	
-	500	25	0.0010	
-	625	20	0.0008	
-	1,250	10	0.0004	
-	2,500	5	0.0002	
-	12,500	1	0.00004	Lodo
-	< 12,500	< 1	< 0.00004	

(Adaptado de B.E. Abulnaga - Referencia 4)

2.2.2 Ensayos de sólidos

Varios ensayos de sólidos son recomendados antes de mezclar sólidos con agua en las etapas primarias de diseño de sistemas de dragado o transporte de pulpas, en donde la distribución del tamaño de partículas debería ser definida.

Un número de ensayos en sólidos son recomendados para determinar su comportamiento en los procesos mineros o en el mezclado de pulpas (Ver **Tabla 2.3**). Según E.J. Wasp y otros (Referencia 8), los siguientes grupos de ensayos son aceptados actualmente para el análisis de sólidos:

Tabla 2.3: Parámetros de ensayos en sólidos para mezclado de pulpas

Tipo de sólido	Parámetro de ensayo
Gravas y arenas	Densidad Contenido de agua Gravedad específica de sólidos Tamaño de partículas Permeabilidad del agua Propiedades friccionales Contenido de limos Contenido orgánico
Limos	Densidad Contenido de agua Permeabilidad del agua Esfuerzo de corte o resistencia al deslizamiento Plasticidad Contenido de limos Contenido orgánico
Arcillas y turbas	Densidad Contenido de agua Esfuerzo de corte o resistencia al deslizamiento Rango de consistencia (plasticidad) Contenido orgánico

(Adaptado de B.E. Abulnaga – Referencia 4)

Ensayos de composición:

- Inspección visual: Con el propósito de evaluación de la masa de roca, tal ensayo indica *in situ*, el estado de la masa de roca.

- Ensayo de espesor de sección: Ensayo de laboratorio conducido con el propósito de la identificación geotécnica de una sección y como una herramienta para determinar la composición mineral en la masa de una roca.
- Densidad de masa: Grupo de ensayos húmedos y secos que se conducen bajo condiciones de laboratorio para evaluar las relaciones entre peso y volumen.
- Porosidad: Este es el cálculo de los espacios vacíos como porcentaje del volumen total y es basado en los ensayos de laboratorio para la densidad de masa.
- Contenido de limos: Este ensayo de laboratorio debe medir el contenido de limos, particularmente en rocas calizas.

Ensayos de fortaleza, dureza y estratificación:

- Dureza de superficie: Este ensayo de laboratorio es realizado para determinar la dureza en términos de la escala de Mohr (de 0 para talco a 10 para diamantes). La dureza de los minerales es importante para la tasa de desgaste de los equipos asociados con flujos de pulpas.
- Compresión uniaxial: Este ensayo de laboratorio mide el esfuerzo último bajo el esfuerzo uniaxial. Este ensayo debe ser realizado en muestras completamente saturadas y se debe de considerar las dimensiones de la muestra a ensayar y las direcciones de influencia en la dirección del esfuerzo. Las muestras cilíndricas deben tener una relación de largo a diámetro de 2 a 1.
- Ruptura brasileña: Este es un ensayo de laboratorio para medir el esfuerzo derivado del ensayo de compresión uniaxial, pero con una diferente relación de largo a diámetro.
- Ensayo de punto de carga: Este es un ensayo rápido de laboratorio para medir el esfuerzo ante una carga. Debe ser conducido junto con el ensayo de compresión uniaxial.
- Ensayo de velocidad sísmica: Este es un ensayo *in situ* y es conducido para revisar las masas de rocas según su estratigrafía y sus fracturas. Es usado para hacer una extrapolación de campo, según las medidas de laboratorio del comportamiento rocoso.

- Ensayo de velocidad ultrasónica: Este ensayo de laboratorio es conducido para el núcleo de una masa y en direcciones longitudinales.
- Módulo de elasticidad estático: Este ensayo de laboratorio mide la tasa de esfuerzo y tensión en una masa rocosa y da un indicador de la fragilidad de la roca.
- Penetrabilidad: Este ensayo *in situ* mide la tasa de penetración, torque, fuerza de alimentación, presión del fluido, profundidad de capas, etc. y es usado para establecer la técnica de perforación y especificaciones para las actividades mineras y de dragado.
- Angularidad: Este es un ensayo de laboratorio realizado para evaluar la forma de las partículas sólidas por inspección visual.

2.2.3 Textura de sólidos

Las partículas sólidas son encontradas en la naturaleza como una mezcla de partículas de diferentes tamaños y a diferentes texturas. Dos coeficientes son usados para expresar la textura de las partículas sólidas:

1. Coeficiente de curvatura (C_c). **(Fórmula 2.1)**

$$C_c = d_{30}^2 / (d_{60} d_{10}) \quad (2.1)$$

2. Coeficiente de uniformidad (C_u). **(Fórmula 2.2)**

$$C_u = d_{60} / d_{10} \quad (2.2)$$

Donde d_{10} , d_{30} y d_{60} son definidos como los diámetros característicos de las partículas sólidas que al 10%, 30% y 60%, son más pequeñas que los valores obtenidos de la distribución granulométrica de partículas (curva granulométrica).

De acuerdo con Herbrich (1991):

- Si $1 < C_c < 3$, la distribución del tamaño de partículas será suave.
- Si $C_u > 4$, las gravas tendrán un amplio rango de tamaños.
- Si $C_u > 6$, las arenas tendrán un amplio rango de tamaños.

2.2.4 Plasticidad de sólidos

Para las arcillas y limos, los ensayos adicionales para el límite líquido (L_L) y límite plástico (P_L) son recomendados. El límite líquido es definido como el contenido de humedad sobre el cual las partículas sólidas empiezan a actuar como líquido y debajo del cual actúa como plástico. Este ensayo es llamado el ensayo de Atterberg.

El límite plástico es definido como el límite bajo el cual las arcillas finalizarán su comportamiento plástico y empezarán a desmenuzarse. La diferencia entre los límites líquido y plástico está definida como el índice plástico (**Fórmula 2.3**).

$$P_I = L_L - P_L \quad (2.3)$$

2.3 **Flujo de pulpas**

Una pulpa es esencialmente una mezcla de un fluido transportante y de partículas sólidas en suspensión. El fluido más usado comúnmente es el agua, pero con el transcurso de los años, varios intentos exitosos han sido desarrollados usando aceites con carbón molido y aun aire como en el transporte neumático.

El flujo de pulpa en una tubería es muy diferente que un flujo líquido de una sola simple fase. Teóricamente, un líquido de una sola fase con baja viscosidad absoluta (o dinámica) puede fluir a bajas velocidades desde un flujo laminar a un flujo turbulento. Sin embargo, una mezcla de dos fases tal como una pulpa, debe superar una velocidad crítica de deposición o una velocidad crítica de transición viscosa.

La analogía puede ser hecha en términos de una avioneta: Si la velocidad disminuye excesivamente, la avioneta se detendrá y dejará de volar. Si la velocidad del flujo de una pulpa no es suficientemente alta (velocidad crítica), las partículas no se mantendrán en suspensión y se depositarán.

Por otro lado; en el caso de mezclas altamente viscosas, si la tasa de corte en una tubería es excesivamente baja, la mezcla será tan viscosa que se resistirá a fluir.

A continuación, se definirán los tipos básicos de flujos de pulpa que más se presentan en la naturaleza o en los procesos industriales o mineros:

2.3.1 Flujo homogéneo

En este tipo de flujo, los sólidos están uniformemente distribuidos a través del fluido transportante. Un ejemplo de flujo homogéneo es el concentrado después de los procesos de molienda y espesado, donde las partículas son tan finas y la mezcla está a una alta concentración de sólidos (usualmente $C_w > 40\%$), esta mezcla se vuelve más viscosa y desarrolla propiedades no-Newtonianas.

Además de las pulpas bien concentradas; los lodos de perforaciones y las piedras limosas (horno de cemento para formar pulpas cementadas) se comportan como flujos homogéneos. Los tamaños típicos de partículas para mezclas homogéneas son más pequeños que 40 a 70 μm (325 a 200 malla Tyler), dependiendo de la densidad de los sólidos.

Según D.J. Hallbom (Referencia 7), la presencia de arcillas en ciertos circuitos no se debe ignorar. Si la arcilla está aglomerada, la pulpa será un poco viscosa. Las bombas y tuberías de un sistema de transporte hidráulico de pulpas deben de ser dimensionadas adecuadamente para manejar la viscosidad absoluta (o dinámica) resultante.

Ciertas minas en el Perú contienen el material llamado arcilla suave, la cual incrementa la viscosidad absoluta (o dinámica) de una pulpa hasta los 400 mPa a concentraciones en peso que solo exceden el 45%. El proceso de usar agua para diluir y así bajar la concentración en peso y los cambios en la presión de bombeo, son soluciones a tal problema.

2.3.2 Flujo heterogéneo

En un flujo heterogéneo, las partículas sólidas no están uniformemente mezcladas en un plano horizontal. En el plano vertical, existe un gradiente de concentración, pudiendo formar en una tubería dunas o una cama suave de sólidos, con las partículas más pesadas en el fondo y las más livianas en suspensión, particularmente en la velocidad crítica de deposición.

Las dos fases mantienen sus propiedades y las partículas más grandes no necesariamente causarán los problemas de atoros, realmente esto depende de la relación de mezcla con las partículas finas.

Las pulpas heterogéneas son encontradas en muchas instalaciones mineras, rocas de fosfatos y aplicaciones de dragado. La concentración en peso de partículas permanece baja, típicamente menos que 25% en muchas aplicaciones de dragado y debajo de 35% en muchas aplicaciones de disposición de relaves.

Los flujos heterogéneos requieren de una velocidad mínima de transporte. En algunas aplicaciones con relaves, la velocidad típica crítica de deposición debe exceder los 2 a 4 m/s.

En la naturaleza hay mucha complejidad, los flujos tienen características de flujos homogéneos y heterogéneos. El concepto de flujos pseudo-homogéneos es también usado, cuando una gran parte de las partículas son finas, pero mantienen una suficiente parte de partículas gruesas que se puedan transportar a velocidades de flujo reducidas a un mínimo valor (Velocidad crítica de deposición).

La **Figura 2.2** presenta el concepto de velocidades críticas en sistemas de pulpa y con relación a pulpas homogéneas y heterogéneas.

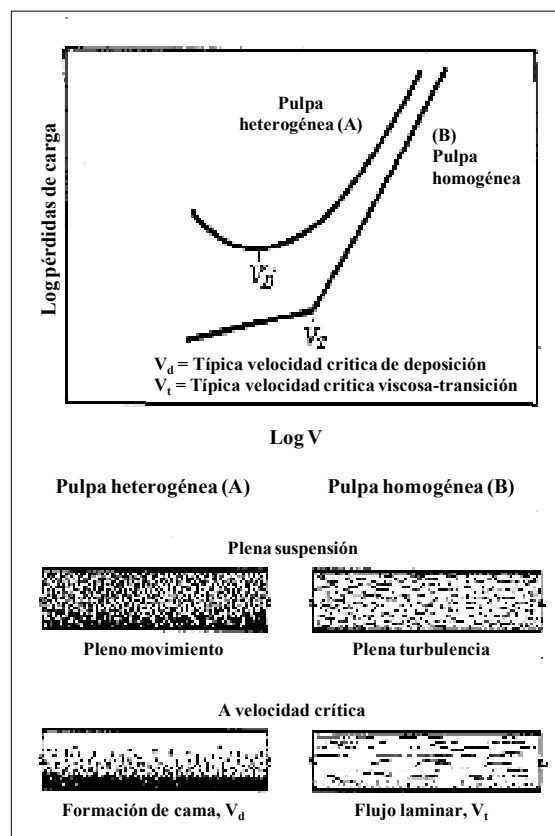


Figura 2.2: Concepto de velocidad crítica en sistemas de pulpas (Adaptado de E.J. Wasp y otros – Referencia 8)

2.3.3 Flujo de regímenes intermedios

Flujos de regímenes intermedios ocurre cuando algunas de las partículas están homogéneamente distribuidas y otras están heterogéneamente distribuidas. Flujos de regímenes intermedios incluyen relaves de plantas de procesamiento de minerales y un amplio rango de industrias con pulpas.

2.3.4 Flujo de emulsiones

Según B.E. Abulnaga (Referencia 4); estrictamente hablando, una emulsión no es una pulpa. Una emulsión es una mezcla de dos fases a ciertas temperaturas, resultando en un flujo esencialmente homogéneo. Un ejemplo de emulsión es una mezcla en volumen de 70% de bitumen con 30% de agua. Si químicos tensoactivos son usados, el bitumen permanece bien mezclado con el agua a cierto rango de temperaturas. Las emulsiones pueden volverse inestables bajo ciertas tasas de corte altas.

Las emulsiones no tienen una velocidad de deposición como las pulpas, pero como sus flujos se vuelven inestables con finas gotas de aceites pesados o bitumen, pueden agruparse causando cambios en el flujo.

2.4 **Velocidades y pérdidas de presión del flujo**

Varios parámetros acerca de la velocidad de un flujo, determinan si una mezcla puede separarse o continuar junta para fluir. De hecho, el diseñador de un espesador o de un sistema de transporte de pulpas está frecuentemente más interesado en la velocidad de caída de las partículas. Por otro lado, el diseñador de una tubería tiene que prestar atención a la velocidad crítica del flujo, a la velocidad de deposición y si el flujo es vertical u horizontal, particularmente en el caso de flujos heterogéneos.

2.4.1 Velocidad terminal o de caída de partículas

La velocidad de caída o terminal de partículas, es la mínima velocidad necesaria para mantener a las partículas sólidas en suspensión, particularmente en un

proceso de mezclado y espesado. Esta velocidad no es idéntica a la velocidad crítica del flujo.

La velocidad terminal de las partículas sólidas en una pulpa, puede ser estimada según la **Fórmula 2.4** de Goviez y Aziz; en función del coeficiente de arrastre (C_D) como indicador del grado :

$$V_{te} = \sqrt{[4g d_{95} (SG_s - 1)/(3\rho_{agua} C_D)]} \quad (2.4)$$

Según B.E. Jacobs (Referencia 5), la **Tabla 2.4** presenta ejemplos de velocidad de caída de partículas de varios sólidos. El diseñador de un sistema de transporte de pulpas o de un espesador, está obligado a llevar a cabo ensayos de laboratorio, debido a que las arcillas pueden estar mezcladas con las arenas en algunas zonas o el sólido puede estar estratificado con capas de diferentes materiales, lo cual afecta la viscosidad final de una pulpa.

Tabla 2.4: Velocidad terminal o de caída de partículas sólidas

Malla Tyler o US	Diámetro de partículas (µm)	Velocidad terminal (m/s)	Identificación del tamaño de partículas	
			Tamaño de la partícula (ASTM)	Tamaño de la partícula general
-	0.2	3×10^{-8}	Arcilla	Arcilla fina
-	0.6	2.8×10^{-7}		Arcilla gruesa
12,500	1	7×10^{-6}		
-	2	9.2×10^{-6}		
2,500	5	17×10^{-6}	Limo	Limo fino
-	6	25×10^{-6}		Limo grueso
625	20	28×10^{-5}		
270	53	17×10^{-4}	Arena fina	Intermedio entre limo y arena fina
250	63	25×10^{-4}		Arena fina
140	105	0.070		
70	210	0.002	Arena gruesa	Arena media gruesa
60	250	0.026		
50	297	0.032		Arena gruesa
35	417	0.053		
28	589	0.063		
16	991	0.100		
10	1,651	0.170		Arena muy gruesa

Adaptado de B.E. Jacobs (Referencia 5)

2.4.2 Velocidades críticas del flujo

Dos parámetros muy importantes en el transporte de pulpas, son las velocidades críticas del flujo.

La **Figura 2.3** (Adaptado de la Referencia 16) muestra la pérdida de presión por unidad de longitud (H_f) en el eje Y , versus la velocidad (V) de un flujo de pulpa en el eje X . Además, se presenta el flujo de la pulpa a concentración en volumen (C_w) constante.

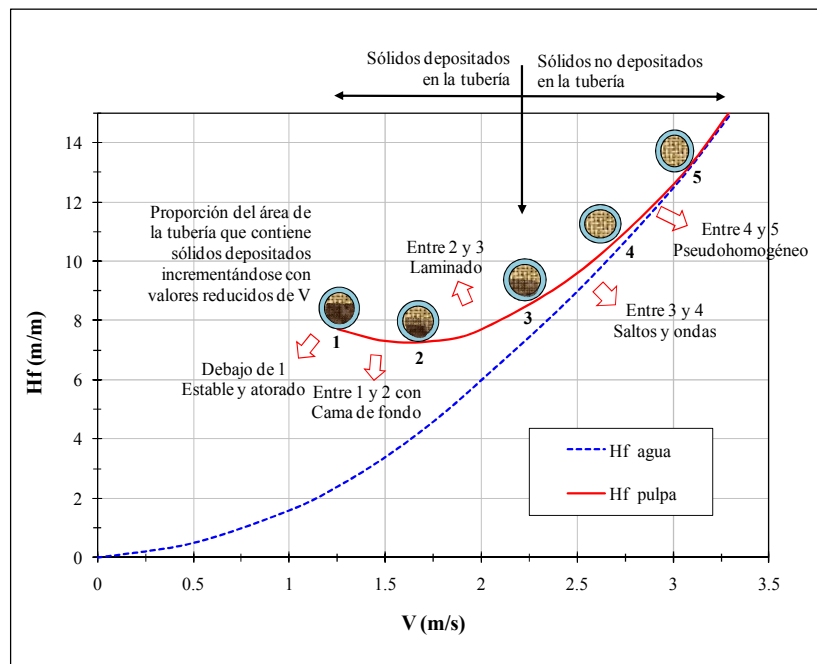


Figura 2.3: Pérdida de presión versus Velocidad para agua y una pulpa
Adaptado de T.C. Aude y otros (Referencia 16)

Para esta pulpa de viscosidad moderada, el flujo será estable y los sólidos llenarán la sección transversal de la tubería para valores debajo del **punto 1** y por lo tanto la velocidad es insuficiente para mover a las partículas sólidas.

Cuando el flujo se acelera, la velocidad alcanza el **punto 2** que es llamado velocidad crítica de deposición (V_d) o velocidad mínima para iniciar el flujo. Esta velocidad de deposición es estimada según la **Fórmula 2.5**, usando la ecuación de Durand y Condolios, como una función del factor de Durand (F_L):

$$V_d = 0.5 F_L [2g ID (SG_s - 1)]^{1/2} \tag{2.5}$$

$$F_L = \{4\sqrt{[\mu_{agua} (1 + 2.5C_v)]/2.4}\} \text{Log} (d_{50}) \tag{2.6}$$

Entre los puntos 1 y 2 se forma una cama de fondo, así como dunas. Entre los puntos 2 y 3 el flujo es laminado. Entre los puntos 3 y 4 hay suficiente velocidad para causar saltos y ondas de las partículas sólidas gruesas. Sobre el **punto 4**, la velocidad es suficientemente alta para permitir un flujo pseudo-homogéneo, en el cual las partículas finas actúan como transportadoras de las partículas gruesas.

Cuando la viscosidad absoluta (o dinámica) es un factor importante, tal como en las pulpas con arcillas o flujos homogéneos, otro parámetro aparece y es denominado velocidad crítica de transición viscosa (V_t), que debe ser determinado. Hay dos regímenes para flujos de mezclas homogéneas. Los flujos a velocidades menores de V_t son asociados con flujos laminares y los flujos sobre V_t son característicos de flujos turbulentos.

La velocidad de transición viscosa es estimada según la **Fórmula 2.7**, usando la ecuación de Govier y Aziz, como una función de la velocidad terminal (V_{te}), estimada en la **Fórmula 2.4**:

$$V_t = 134 C_D^{0.816} ID_{[ft]}^{0.633} V_{te[ft/s]}^{1.63} \quad (2.7)$$

2.4.3 Pérdidas de presión

Los flujos en el régimen laminar son frecuentemente caracterizados por un factor de pérdidas friccionales, como es el factor de Darcy ($f_D = 64/Re$) o su equivalente para el factor de Fanning ($f_N = 16/Re$) independientes de la rugosidad de la tubería (relacionados según la **Fórmula 2.8**), dando como resultado que las pérdidas friccionales (según **Fórmula 2.9**) en el régimen laminar aparecen como una función lineal de la velocidad; mientras que en régimen turbulento es proporcional al cuadrado de la velocidad.

$$f_D = 4 f_N \quad (2.8)$$

$$H_f = f_D L V^2 / (2g ID) = 2 f_N L V^2 / (g ID) \quad (2.9)$$

2.4.3.1 Pérdidas de presión basadas en reología

Una metodología para estimar las pérdidas de presión en una tubería por el transporte de una pulpa, es empleando el diseño basado en reología y utilizando la ecuación de Buckingham (**Fórmula 2.10**) que relaciona el esfuerzo de corte en las

paredes de una tubería (τ_w) con las pérdidas de presión de la mezcla o pulpa (H_{fm}/L).

$$\tau_w = (H_{fm}/L) (ID/4) \quad (2.10)$$

Iterando con las pérdidas de presión de la pulpa (H_{fm}/L), se va estimando con la **Fórmula 2.11** el valor de la tasa de esfuerzo en las paredes (Z), con el fin de poder estimar las velocidades de flujo laminar y flujo turbulento.

$$Z = \tau_y/\tau_w \quad (2.11)$$

Luego, se prosigue estimando la velocidad de flujo laminar ($V_{laminar}$) con la **Fórmula 2.11**, en función del esfuerzo de corte en las paredes (τ_w) y de la tasa de esfuerzo en las paredes (Z).

$$V_{laminar} = ID \tau_w/8\eta (1 - 4/3 Z + 1/3 Z^4) \quad (2.12)$$

Además, se debe estimar la velocidad friccional en una tubería (u^*) con la **Fórmula 2.13**, para luego calcular la velocidad de flujo turbulento ($V_{turbulento}$) con la **Fórmula 2.14**.

$$u^* = \sqrt{(\tau_w/\rho_m)} \quad (2.13)$$

$$V_{turbulento} = 2.5u^* \ln (\rho_m ID u^* /\eta) + 2.5u^* \ln [(1-Z)/(1+Z)] + u^* Z (14.1+1.25Z) \quad (2.14)$$

Con el estimado de las velocidades de flujo laminar y flujo turbulento, se grafican las curvas de pérdidas de presión vs velocidad para diferentes C_w . El régimen del flujo de la una tubería, será resultado del valor donde se encuentre la velocidad de diseño de la tubería.

2.4.3.2 Pérdidas de presión basadas en el coeficiente de arrastre

Otra metodología para estimar las pérdidas de presión en una tubería por el transporte de una pulpa, es utilizando la ecuación de Zandi y Govatos (**Fórmula 2.15**) que relaciona las pérdidas de presión de la mezcla o pulpa (H_{fm}) con las pérdidas de presión del líquido transportante (H_{fl}), que en procesos mineros usualmente es agua.

$$H_{fm}/H_{fL} = 1 + 280 \psi - 1.93 C_v \quad (2.15)$$

Para poder emplear la **Fórmula 2.15**, se requiere antes estimar los valores de ψ y N_e , según la **Fórmula 2.16** y **Fórmula 2.17** respectivamente, que se encuentra en función del coeficiente de arrastre (C_D) de las partículas sólidas.

$$\psi = N_e/C_v \quad (2.16)$$

$$N_e = V^2 \sqrt{C_D/[C_v ID (SG_s - 1)]} \quad (2.17)$$

Similarmente para el diseño basado en reología, para el diseño basado en el coeficiente de arrastre, se grafican las curvas de pérdidas de presión vs velocidad para diferentes C_w .

2.5 Densidad de una pulpa

Según B.E. Abulnaga (Referencia 4), la densidad de una pulpa está en función de:

1. La densidad del fluido transportante.
2. La densidad de las partículas sólidas.
3. La concentración en volumen o en peso de la fase sólida.

La densidad de las partículas sólidas es determinada cuidadosamente por varios métodos experimentales. Las partículas finas tienden a atrapar aire, el cual se debe remover en el laboratorio con una apropiada agitación o por la adición de pequeñas cantidades de agentes húmedos o químicos.

Algunos materiales exhiben un cambio de la facilidad de agrupamiento y por lo tanto, su densidad estará en función del tamaño de las partículas. Esto puede ocurrir si las partículas sólidas son pasadas a través de un proceso de trituración, por ejemplo un molino SAG (semi autógeno) o un molino de bolas; en donde se producirá un incremento de densidad, por la mayor concentración de partículas finas.

Por lo tanto, se debe de tener cuidado al medir la densidad de las partículas sólidas según un tamaño de partículas propuesto para ser transportados en forma de pulpa.

Ciertos errores pueden ocurrir al evaluar la densidad de los sólidos para mezclas heterogéneas, como en el caso si las partículas pesadas de una pulpa se depositan y una muestra es tomada, se puede reflejar una mayor densidad que una muestra con partículas finas. Ante estas posibles fuentes de error, la medida de la densidad de una pulpa se debe hacer después de un adecuado mezclado y de usar los datos de concentración en peso o en volumen. La densidad de una pulpa es estimada según la **Fórmula 2.18**.

$$\rho_m = 1/[C_w/\rho_s + (1-C_w)/\rho_L] = \rho_L/[1 - C_w (1 - \rho_L/\rho_s)] = \rho_L + C_w (\rho_s - \rho_L) = \rho_L (C_v - 1)/(C_w - 1) \quad (2.18)$$

El término de concentración en peso (C_w) es muy usado, como la manera más práctica para convertir el tonelaje total de sólidos en un flujo de pulpa a ser transportado por medio de una tubería o a través de una planta metalúrgica extractiva. Sin embargo, las características de la mezcla, la mecánica del fluido y las propiedades físicas resultantes están más relacionadas a la concentración por volumen. La concentración por volumen de sólidos (C_v) en una mezcla es expresada según la **Fórmula 2.19**.

$$C_v = C_w \rho_m / \rho_s = (\rho_m - \rho_L) / (\rho_s - \rho_m) = \rho_L / (\rho_L - \rho_s + \rho_s / C_w) = 1 + \rho_m (C_w - 1) / \rho_L \quad (2.19)$$

Por lo tanto, la concentración de sólidos en peso de una pulpa es expresada según la **Fórmula 2.20**.

$$C_w = C_v \rho_s / \rho_m = \rho_s (\rho_m - \rho_L) / [\rho_m (\rho_s - \rho_L)] = \rho_s C_v / [\rho_L + C_v (\rho_s - \rho_L)] = 1 + \rho_L (C_v - 1) / \rho_m \quad (2.20)$$

2.6 Pulpas Newtonianas

Aunque la densidad es esencialmente una propiedad estática, la viscosidad absoluta (o dinámica) es una propiedad dinámica y tiende a reducirse en magnitud, cuando la tasa de corte en una tubería aumenta. Existen diferentes formas de viscosidad como: la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática y la viscosidad efectiva en la tubería.

La viscosidad de una pulpa en estado estacionario, es efectivamente lo que una bomba o un mezclador necesitarán para la puesta en marcha de una planta. Como es frecuente, cuando el equipo no puede dar suficiente torque para superar a la viscosidad absoluta, el operador es forzado a diluir la pulpa.

Por definición, la viscosidad absoluta (o dinámica) de un fluido, es la relación entre el esfuerzo requerido para mover un fluido y su tasa de corte o gradiente de velocidad, según se muestra en la **Figura 2.4** y definido en la **Fórmula 2.21** para fluidos Newtonianos.

$$F = K dV/dy$$

$$\tau = K/A dV/dy = \mu dV/dy \quad (2.21)$$

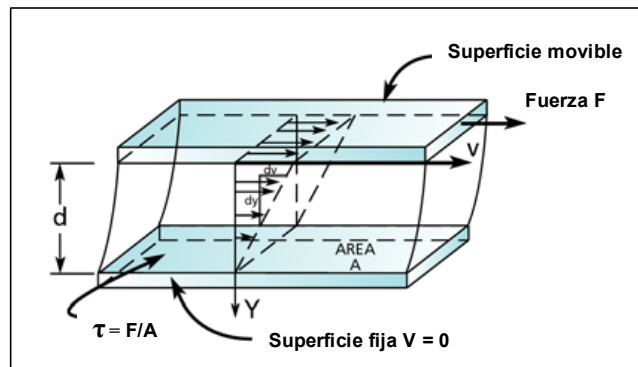


Figura 2.4: Esfuerzo de corte versus Tasa de corte

Hay numerosas pulpas en la naturaleza, tales como arena y agua o grava y agua, en el cual los sólidos contribuyen poco al total de la viscosidad absoluta, excepto en términos de su concentración en volumen.

2.6.1 Viscosidad absoluta de pulpas con $C_v \leq 1\%$

Para tales mezclas sólido – líquido en forma diluida, Einstein desarrollo la siguiente **Fórmula 2.22** para una relación lineal entre la viscosidad absoluta (o dinámica) y la concentración en volumen.

$$\eta/\mu = 1 + 2.5 C_v \quad (2.22)$$

Esta simple ecuación está basada en las siguientes asunciones:

- Las partículas sólidas son bastante rígidas.

- La mezcla está bastante diluida y no hay interacción entre las partículas sólidas.

Tal tipo de flujo no es común, excepto en regímenes laminares con concentraciones muy diluidas (debajo de un C_v del 1%)

2.6.2 Viscosidad absoluta de pulpas con $C_v \leq 20\%$

Thomas (1965) extendió la ecuación de Einstein para calcular concentraciones volumétricas más altas de mezclas Newtonianas según la **Fórmula 2.23**.

$$\eta/\mu = 1 + K_1 C_v + K_2 C_v^2 + K_3 C_v^3 + K_4 C_v^4 + \dots \quad (2.23)$$

Donde K_1 a K_4 son constantes. $K_1 = 2.5$ que es la constante de Einstein, K_2 ha sido encontrada que está entre el rango de 10.05 a 14.10 de acuerdo a Guth y Simha (1936). Es difícil extrapolar hacia altos términos de K_3 y K_4 , que usualmente son ignorados con C_v menores que 20%.

2.6.3 Viscosidad absoluta de pulpas con altas $C_v \geq 20\%$

Para altas concentraciones, Thomas (1965) propuso la siguiente ecuación con una función exponencial según la **Fórmula 2.24**.

$$\eta/\mu = 1 + 2.5 C_v + 10.05 C_v^2 + 0.00273 e^{(16.6 C_v)} \quad (2.24)$$

La **Fórmula 2.24** es ampliamente aceptada en la industria, para mezclas heterogéneas con una reología Newtoniana.

2.7 **Pulpas no-Newtonianas**

Varios modelos han sido desarrollados a lo largo de los años para clasificar las mezclas de dos fases (Ver **Tabla 2.5**). En el caso de minería, las siguientes mezclas son frecuentemente encontradas:

- Mezclas de dispersión fina, que contienen pequeñas partículas sólidas, las cuales están uniformemente distribuidas en un fluido continuo y que se encuentran en tuberías de concentrado y en pulpas de molienda, después de su clasificación, etc.

- Mezclas de dispersión gruesa, que contienen partículas gruesas distribuidas en un fluido continuo y que se encuentran en los molinos SAG, descarga de ciclones y en ciertas líneas de relaves, etc.
- Mezclas tipo flujo macro-mezclado, que contienen espumas o alta turbulencia de mezcla de gas y líquidos o de dos líquidos inmiscibles, bajo condiciones en el cual ninguno es continuo.

Tales patrones son encontrados en circuitos de flotación; en el cual, la espuma es usada para separar el concentrado del resto.

- Mezclas tipo flujo estratificado con contenido de un gas, un líquido, dos pulpas de diferentes tamaños de partículas o dos líquidos inmiscibles; bajo condiciones en el cual, ambas fases son continuas.

Tabla 2.5: Regímenes de flujos para pulpas Newtonianas y no-Newtonianas

Flujos de fase simple	Flujos de multi-fases (gas-líquido, líquido-líquido, gas-sólido, líquido-sólido)	
Comportamiento de fase simple		Comportamiento de multifase
Verdadero homogéneo	Pseudo-homogéneo	Heterogéneo
	Laminar, transición y régimen de flujo turbulento	Régimen solamente de flujo turbulento
Puramente viscoso	Flujos Newtonianos	
Puramente viscoso, no-Newtoniano e independiente del tiempo	Plástico Bingham	
	Dilatante Pseudo-plástico Pseudo-plástico fluido	
Puramente viscoso, no-Newtoniano y dependiente del tiempo	Tixotrópico Reopéctico	
Viscoelástico	Muchas formas	

Diseñar una tubería para operar en un régimen de flujo no-Newtoniano, debe de estar basado en data confiable, especialmente en referencia a la reología y al tamaño de partículas. Se debe de tener cuidado de aventurarse en generalizaciones acerca de propiedades reológicas, porque cada pulpa tiene sus características propias, que requieren de un diseño especial.

La minería e industria ha aceptado el criterio de que las pérdidas friccionales son altamente dependientes de la viscosidad de una pulpa, teniendo que como

promedio, el diámetro de las partículas sólidas es más pequeño que 40 a 60 μm y con una concentración en volumen que excede el 30% (dependiendo de la gravedad específica de sólidos), según J.P. Tullis (Referencia 12).

Existen también las pulpas floculadas que son encontradas en circuitos de celdas de flotación, espesadores y varias plantas de extracción de mineral. Con la formación de floculas, la pulpa puede desarrollar una estructura interna.

Esta estructura puede desarrollar propiedades de un flujo no-Newtoniano, con comportamiento de corte (pseudo-plástico) y algunas veces comportamiento tixotrópico dependiente del tiempo.

Cuando un esfuerzo de corte es aplicado a la pulpa, el tamaño de las floculas puede reducirse y se vuelven menos capaces de adherirse al líquido transportable de la pulpa. Con altos esfuerzos de corte, las floculas pueden reducirse al tamaño de las partículas sólidas y el flujo puede perder su comportamiento no-Newtoniano.

2.8 Pulpas no-Newtonianas independientes del tiempo

Ciertas pulpas requieren de un mínimo nivel de esfuerzo antes de que puedan fluir. Por ejemplo tenemos al concreto fresco, que no fluirá al menos que el ángulo del vertedor exceda cierto valor mínimo. Tal mezcla, es descrita que posee una magnitud de esfuerzo de fluencia que debe superar antes de que el flujo pueda iniciarse.

Un número de flujos tales como los plásticos Bingham, pseudo-plásticos, pseudo-plásticos fluidos y dilatantes son clasificados como fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo.

La relación del esfuerzo de corte en las paredes es mostrada en la **Figura 2.5** y la relación entre la viscosidad aparente y la tasa de corte es mostrada en la **Figura 2.6**. La viscosidad aparente es definida según la **Fórmula 2.25**.

$$\eta = (\tau - \tau_y)/(d\gamma/dt) \quad (2.25)$$

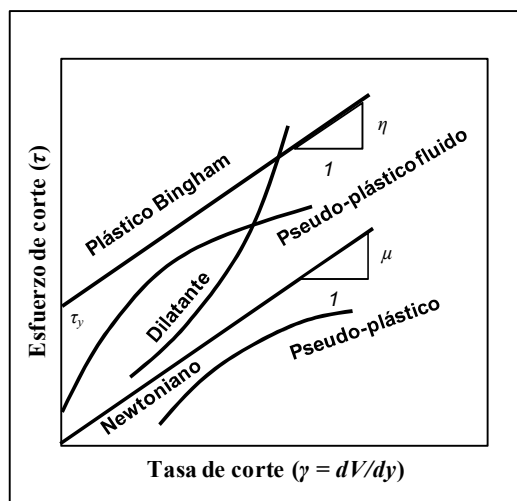


Figura 2.5: Esfuerzo de corte versus Tasa de corte de fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo
Adaptado de E.J. Wasp y otros (Referencia 8)

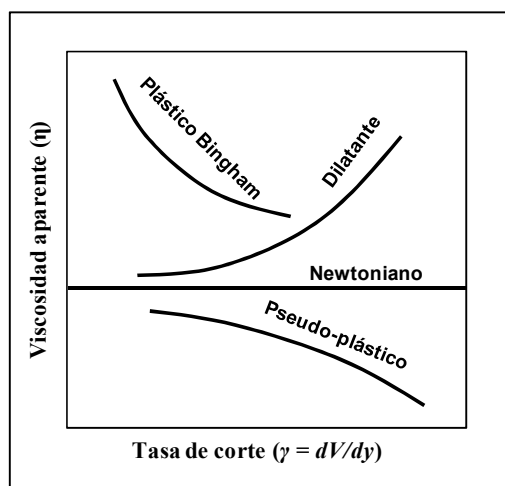


Figura 2.6: Viscosidad aparente versus Tasa de corte de fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo
Adaptado de E.J. Wasp y otros (Referencia 8)

Prácticamente, todas las pulpas mineras y que son de interés para esta Tesis, están dentro de la clasificación de fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo, tipo plásticos Bingham, el cual es descrito a continuación:

2.8.1 Pulpas no-Newtonianas tipo plásticos Bingham

Para un plástico Bingham, es esencial superar un esfuerzo de fluencia (τ_y) antes de que el fluido se empiece a mover. El esfuerzo de corte versus la tasa de corte es expresada según la **Fórmula 2.26**:

$$\tau = \eta \, d\gamma/dt + \tau_y \tag{2.26}$$

La magnitud del esfuerzo de corte (τ_y) puede ser más bajo que 0.01 Pa para lodos de aguas servidas o tan alto como 1,000 MPa para asfaltos o bitúmenes. La viscosidad aparente (o viscosidad no-Newtoniana) puede ser tan baja como la viscosidad del agua (1 cP = 0.001 Pa.s) o tan alta como 1,000 poises (100 Pa s) para algunas pinturas y mucho más alto para asfaltos y bitúmenes. En el caso de ciertas emulsiones o arenas, es costumbre adicionar ciertos químicos para reducir la viscosidad aparente.

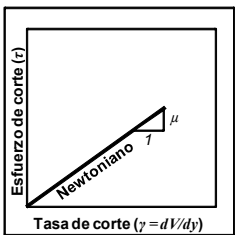
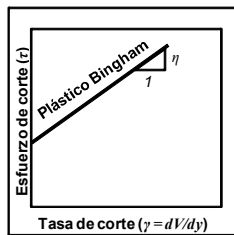
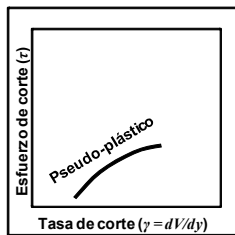
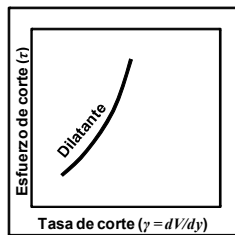
El esfuerzo de fluencia se incrementa cuando se aumenta la concentración de sólidos. Thomas (1961) propuso las siguientes relaciones entre el esfuerzo de fluencia (τ_y), viscosidad plástica o aparente (η), concentración en volumen (C_v) y viscosidad absoluta del medio transportante (μ):

$$\tau_y = K_1 C_v^3 \tag{2.27}$$

$$\eta/\mu = e^{(K_2 C_v)} \tag{2.28}$$

Donde K_1 y K_2 son constantes, que dependen del tamaño y forma de las partículas sólidas y su concentración en una pulpa. Hay una serie de descripciones y modelos para los demás tipos de pulpas no-Newtonianas independientes del tiempo, que no son parte de esta Tesis y que solo serán descritas en forma de ejemplos de fluidos típicos y mostrados en la **Tabla 2.6**.

Tabla 2.6: Ejemplos de fluidos según sus propiedades reológicas

Newtoniano	No-Newtoniano		
			
Newtoniano	Plástico Bingham	Pseudo-plástico	Dilatante
Agua Combustible de alta viscosidad Aceites de motor Aceites de muchos minerales Gasolina Kerosene Soluciones salinas en agua Suspensiones de tintas Caolín Partículas de hollín	Pulpas minerales Soluciones termoplásticas Lodos de aguas residuales Arcillas Barro o lodo Ketchup Chicles Alquitrán Altas concentraciones de asbesto en aceites	Soluciones de látex Lodos de aguas residuales Grasa Melaza Pinturas Almidón Jabones Muchas emulsiones Tinta de impresoras Pulpa de papel	Almidón en agua Arena de playa Arenas movedizas Feldespatos Micas Arcillas Componentes de caramelos Mantequilla de maní

Adaptado de J.P. Tullis (Referencia 12)

2.9 Pulpas no-Newtonianas dependientes del tiempo

Existen aceites crudos y pulpas de arenas de alquitrán de ciertas minas que desarrollan comportamientos de fluidos no-Newtonianos dependientes del tiempo en bajas temperaturas; por lo tanto, tienen propiedades tixotrópicas complejas para este tipo de flujos.

En flujos no-Newtonianos dependientes del tiempo, la estructura de la pulpa y la orientación de las partículas son sensibles a la tasa de corte.

Si se producen cambios estructurales o la reorientación de las partículas a cierta tasa de corte, el esfuerzo de corte se vuelve dependiente del tiempo cuando las partículas se realinean ellas mismas en el flujo. En otras palabras, el esfuerzo de corte toma tiempo en reajustarse para la tasa de corte que prevalecerá.

Algunos de esos cambios pueden ser reversibles, cuando la tasa de deformación es la misma a la tasa de deterioro. Sin embargo, en el caso de flujos en el cual la deformación es extremadamente lenta, los cambios estructurales o la reorientación de partículas puede ser irreversible.

La **Figura 2.7** presenta el esfuerzo de corte versus la tasa de corte para fluidos no-Newtonianos dependientes del tiempo con sus dos tipos de flujos, los cuales no serán descritos a más detalle, ya que no son desarrollados en esta Tesis.

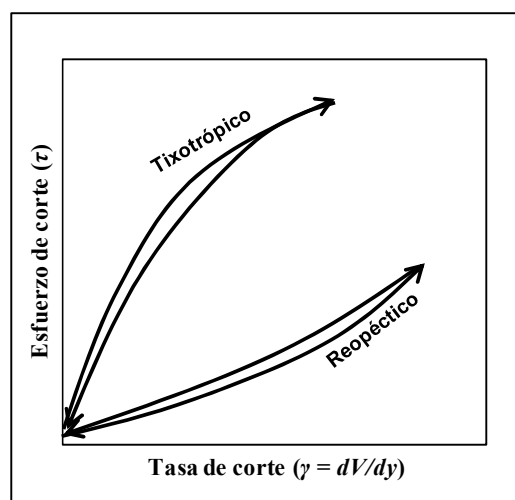


Figura 2.7: Esfuerzo de corte versus Tasa de corte de fluidos no-Newtonianos dependientes del tiempo

Adaptado de E.J. Wasp y otros (Referencia 8)

2.10 Resumen

En este capítulo, se realizó la revisión de los conceptos básicos de las mixturas de pulpas y flujos, necesarios para poder profundizar en esta investigación, que tiene como objetivo específico estimar las características físicas y reológicas de cuatro pulpas minerales a diferentes concentraciones de sólidos. Como punto inicial, se describieron los elementos básicos que componen una pulpa, como son las partículas sólidas mezcladas en un medio transportante que usualmente es el agua.

Se definieron las principales propiedades de las partículas sólidas que componen una pulpa, como son su clasificación por tamaño y distribución de partículas, los ensayos típicos para partículas sólidas y la textura y plasticidad de sólidos como propiedades básicas a conocer, para poder caracterizar una pulpa que depende de los sólidos que la conforman.

Posteriormente, se describen los flujos predominantes para las pulpas, como son los flujos homogéneos (e ideales) y los flujos heterogéneos que se encuentran más presentes en la naturaleza y en los procesos mineros y/o industriales. También se definió dos conceptos de velocidad, muy importantes en el transporte de pulpas, como son la velocidad de caída o terminal de las partículas sólidas y la velocidad crítica de los flujos, con sus dos variantes: la velocidad crítica de deposición (V_d) o mínima velocidad para iniciar el flujo y la velocidad crítica de transición viscosa (V_t) que define el tipo de flujo predominante (laminar o turbulento).

También se detallaron dos metodologías para estimar las pérdidas de presión por unidad de longitud (H_{fm}/L) en una tubería, por fricciones al paso de la pulpa mineral, estas dos metodologías, son el diseño basado en reología con el cálculo de las velocidades de los flujos laminar y turbulento y el diseño basado en el coeficiente de arrastre con el cálculo de la velocidad terminal o de caída de las partículas sólidas. Todos estos métodos se grafican en las denominadas curvas “J” que son las pérdidas de presión vs la velocidad de flujo en una tubería.

Y finalmente, se definió la densidad de una pulpa (ρ_m) y la viscosidad absoluta (o dinámica) de un fluido, que puede ser clasificado dentro de dos criterios: un fluido Newtoniano, cuando su esfuerzo de corte es proporcional a su tasa de corte ($\tau = \mu dV/dy$) o un fluido no-Newtoniano cuando esta relación no es directa, sufriendo

diversas variaciones con diferentes modelos, según la orientación y/o estructura de sus partículas sólidas, temperatura, concentración, etc. Para el caso de estudio de esta Tesis, la mayoría de pulpas minerales son del tipo de fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo y que se adaptan muy bien al modelo de plásticos Bingham ($\tau = \eta \, d\gamma/dt + \tau_y$).

SECCIÓN II

CAPÍTULO III:

ENSAYOS CON PULPAS MINERALES

3.1 Introducción y antecedentes

El diseño de un sistema de transporte de pulpas minerales requiere de la caracterización de las partículas sólidas, del fluido transportante, así como de la pulpa resultante. Como conceptos o criterios generales podemos mencionar que:

- La hidráulica de una pulpa que contiene cantidades significativas de partículas finas más pequeñas que $74\ \mu\text{m}$ depende de la reología.
- Las tuberías de transporte de pulpas, se diseñan para operar en flujo turbulento y con velocidades superiores a la velocidad de deposición, evitando así el asentamiento de las partículas sólidas en el fondo de una tubería.
- Los resultados de los ensayos con pulpas minerales, sirven para estimar las pérdidas friccionales, la velocidad de transición laminar - turbulento y la velocidad de deposición.
- Los resultados de los ensayos con pulpas minerales, sirven también para definir la máxima pendiente permitida para la instalación de la tubería.
- Los resultados del ensayo de corrosión - erosión, son utilizados para seleccionar el material de una tubería y/o determinar si un recubrimiento interior para la tubería es necesario.

En la mayoría de sistemas de transporte de pulpas minerales, la concentración de sólidos en la pulpa, se selecciona para reducir al mínimo los costos del transporte. Si la pulpa es muy diluida, una gran cantidad de agua se bombea y requiere de más consumo de energía; así como de una tubería de un diámetro más grande para una misma producción de sólidos o minerales. Si la concentración es demasiado alta, la caída de presión (pérdidas friccionales) en la tubería puede llegar a ser alta y el costo del bombeo puede aumentar, pero se requerirá de una tubería de un diámetro menor.

3.2 General

A continuación, se describen los ensayos de laboratorio más usuales y el propósito de cada ensayo. Con esta información, se puede seleccionar que pruebas son requeridas para una pulpa mineral en particular, con el fin de optimizar el diseño de un sistema de transporte de pulpas, determinando un programa de ensayos de muestras.

Con un programa de ensayos, se debe de estimar un cronograma y determinar el tamaño de la muestra. Por lo tanto, se debe de realizar una solicitud para el volumen de pulpa requerido y las instrucciones de cómo empaquetar y enviar la muestra. Finalmente, se describirá como las muestras son recibidas y preparadas para ensayar.

3.3 Pruebas de laboratorio

Un laboratorio de pulpas minerales, debe de ofrecer como mínimo los siguientes ensayos:

1. Análisis de tamices - Distribución de tamaño de partículas (*PSD*).
2. Gravedad específica de los sólidos (*SGs*).
3. Análisis de sub tamizado.
4. Factor de forma de partículas.
5. Reología.
6. Asentamiento.
7. Penetración.
8. Corrosión.
9. Ángulo de deslizamiento y Ángulo de reposo.
10. Número de Miller.

3.3.1 Análisis de tamices (*PSD*)

La distribución de partículas sólidas tiene una fuerte influencia en la viscosidad de una pulpa. La hidráulica de una pulpa que contiene cantidades significativas de partículas finas más pequeñas que 74 μm depende de la reología.

Este procedimiento de ensayo descrito, cumple con la norma ASTM E 276: Método estándar de ensayos para el tamaño de partículas o el análisis del tamiz N° 4 (4.65 mm) y más finos, para minerales metálicos y materiales relacionados.

Los tamices usados son los tamices estándar ASTM E11-04 tamices de malla Tyler, descritos en la **Tabla 2.2** (Sección 2.2.1). La **Figura 3.1** muestra a un grupo de tamices Tyler y al equipo vibrador de tamices.



Figura 3.1: Tamices Tyler y equipo vibrador de tamices
Laboratorio de pulpas de PSI – Referencia 14

3.3.2 Gravedad específica de los sólidos (SG_s)

La SG_s es requerida para estimar las pérdidas friccionales, la velocidad de transición laminar - turbulento y la velocidad de deposición.

Este procedimiento de ensayo descrito, se basa en el método estándar del ensayo ASTM C188 para la densidad del cemento hidráulico, que describe el uso del matraz de Le Chatelier. La **Figura 3.2** presenta a tres matraces Le Chatelier en pleno baño María para poder determinar la SG_s de las partículas sólidas de una pulpa.

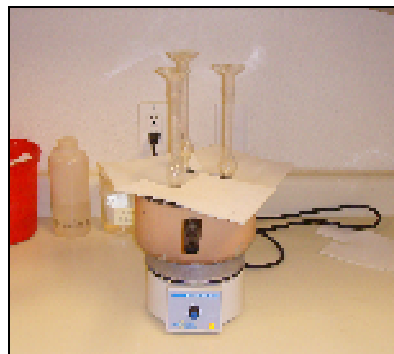


Figura 3.2: Matraces de Le Chatelier en baño María para determinar la SG_s
Laboratorio de pulpas de PSI – Referencia 14

3.3.3 Análisis de sub tamizado

Normalmente, es usual determinar la *PSD* de las partículas sólidas en una pulpa sobre los 37 μm de tamaño (análisis de tamices). Sin embargo, en casos donde un porcentaje significativo de las partículas sólidas estén por debajo de los 44 μm (N° 325 de tamiz Tyler), la *PSD* de los finos en el rango de sub tamizado, es decir desde los 25 μm hacia cerca de los 5 μm , es de interés.

Este procedimiento de ensayo descrito, cumple con la norma ASTM D422: Método estándar de ensayo para el análisis del tamaño de partículas de suelos.

3.3.4 Factor de forma

La forma de las partículas sólidas de una pulpa afecta la velocidad de asentamiento de dichas partículas. La forma de una partícula es determinada observando la velocidad de asentamiento de las partículas sólidas de un tamaño dado; efectuado en un cilindro vertical lleno de agua y a una temperatura constante.

El factor de forma se determina como cociente del diámetro real de la partícula y el diámetro de una esfera de la misma densidad o gravedad específica, teniendo la misma velocidad de asentamiento.

Este ensayo está definido por la norma ASTM D3398: Método estándar de ensayo para el índice de forma y textura de partículas de agregados.

3.3.5 Reología

La reología es la relación entre el esfuerzo de corte y la tasa resultante de corte. La mayoría de los líquidos naturales son mezclas homogéneas y exhiben una reología Newtoniana; en el cual, el esfuerzo de corte es proporcional a la tasa de corte. La constante de dicha proporcionalidad se define como la viscosidad del fluido.

La presencia de los sólidos (específicamente finos) en una pulpa, cambia el reología del fluido o líquido transportante. Los viscosímetros de tubos rotatorios y capilares, se utilizan para determinar las características reológicas a cierta concentración de sólidos, como el que se muestra en la **Figura 3.3**.



Figura 3.3: Viscosímetro con diferentes tazas y péndulos
Laboratorio de pulpas de PSI – Referencia 14

3.3.6 Asentamiento

Una preocupación cuando se diseña una tubería de transporte de pulpas, está en los “atoros” o detención del flujo a través de una tubería debido a la obstrucción por asentamiento de las partículas sólidas. Uno de los factores que acentúan los atoros, es la tasa de asentamiento de las partículas sólidas de una pulpa.

Cuando el flujo de una pulpa es detenido en una tubería, los sólidos de la pulpa se asentarán. Con que rapidez esos sólidos se asientan y que tal firmemente sean compactados, será definido por cuánto tiempo la tubería puede estar sin flujo; antes de que un atoro, se convierta en un problema.

3.3.7 Penetración

Este ensayo mide la resistencia a la penetración y/o compactación de una cama asentada de partículas sólidas de una pulpa.

Los resultados de este ensayo, sugieren los problemas potenciales de atoros, que pueden resultar en paradas con una tubería llena de pulpa. Durante la parada de una tubería llena de pulpa, los sólidos se separaran de la pulpa y se asentarán en un cierto plazo.

Una pulpa con un alto grado de compactación, es más probable que presente problemas de atoros, pues esta pulpa será más resistente a la fuerza del movimiento en el reinicio. Inversamente, una pulpa con un bajo grado de compactación, es menos probable de presentar problemas de atoros.

3.3.8 Corrosión

El objetivo de esta prueba es medir el índice de la corrosión y la tendencia de la formación de “pits” (huecos o picadas) de una pulpa a niveles específicos de pH y de oxígeno.

Es necesario conocer la tasa de corrosión de una pulpa, para la selección del material y el espesor de pared de una tubería y determinar cuándo un recubrimiento interno (liner de HDPE) es necesario. La tasa de corrosión es también necesaria al seleccionar equipos (tal como bombas, etc.). La **Figura 3.4** muestra un equipo típico para realizar el ensayo de corrosión en una pulpa.



Figura 3.4: Equipo para el ensayo de corrosión de una pulpa
Laboratorio de pulpas de PSI – Referencia 14

3.3.9 Ángulo de deslizamiento / Ángulo de reposo

Las tuberías de transporte de pulpa son rara vez totalmente horizontales. Estos dos ensayos, son diseñados para medir cualitativamente el comportamiento de una pulpa en una sección de tubería y a una pendiente establecida durante una parada.

A cierto ángulo, una pulpa se asentará después de una parada y las partículas sólidas se deslizarán hacia el punto más bajo de una tubería, causando un atoro en ese punto bajo. En una sección inclinada de una tubería, la pulpa se deslizará para atorar la tubería o solo se asentará dejando una sección superior con solo líquido para reiniciar el movimiento.

La **Figura 3.5** muestra los tubos acrílicos a diferentes pendientes, para determinar los ángulos de deslizamiento y de reposo de las pulpas a ensayar.

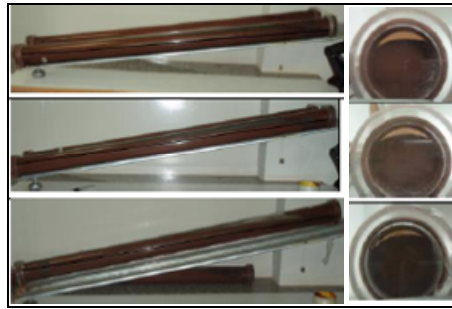


Figura 3.5: Tubos acrílicos para el ensayo de deslizamiento y reposo
Laboratorio de pulpas de PSI – Referencia 14

3.3.10 Número de Miller

Así como con la corrosión, la abrasividad de una pulpa afecta la selección del material y del espesor de las paredes de una tubería y/o equipos. Este número, determina cuando un recubrimiento interno de una tubería y de sus componentes es necesario.

3.4 Muestra de pulpa

3.4.1 Requisito de la cantidad de muestra

Para determinar el volumen requerido para realizar los ensayos con pulpas, se debe de analizar el requerimiento de pulpa por cada ensayo a realizar y sumarlos. Las cantidades aproximadas de pulpa para cada ensayo pueden ser estimadas según la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1: Cantidades aproximadas de pulpa para realizar los ensayos

Ensayo de pulpa	Cantidad aproximada	Observación
Concentración recibida	1/4 litro	-
Análisis de tamices	1/2 litro	-
Análisis de sub-tamizado	1/2 litro	-
Gravedad específica de los sólidos	1/2 litro	Se puede usar la pulpa del ensayo de reología
Factor de forma de partículas	-	Se puede usar la pulpa del análisis de tamices
Reología	1 litro	Para ensayar mínimo 3 concentraciones ($C_w \pm 5\%$)
Asentamiento	1 1/4 litro	-
Penetración	2 litros	-
Corrosión	3 1/2 litros	-
Ángulo de deslizamiento y de reposo	1 litro	-
Número de Miller	1 kg	Se puede usar la pulpa de ensayos anteriores

Adaptado de Laboratorio de pulpas de PSI – Referencia 14

Para un programa completo del laboratorio, que incluye todos los ensayos disponibles, no más de 4 galones (15 litros) de muestra serán requeridos y asumiendo que la muestra enviada se encuentra a una concentración en peso de sólidos representativa.

3.4.2 Instrucciones para la muestra

Una vez que el programa de ensayos de laboratorio haya sido decidido por el ingeniero de procesos, se determinará el volumen de muestra requerida, para lo cual el ingeniero de procesos enviará un pedido de muestra. La muestra enviada debe ser representativa de la pulpa que se transportará por medio de una tubería, con parámetros preliminares que deben ser indicados, como: concentración, *PSD*, pH, químicos agregados, etc.

Además, de reiterar que cantidad de muestra, se debe indicar las instrucciones de cómo empaquetar y enviar la muestra, para asegurarse que la integridad de la muestra sea asegurada (es decir que no sufra pérdida de finos, agua, etc.).

3.5 **Muestra recibida y preparación para ensayar**

3.5.1 Muestra recibida

Cada muestra recibida debe ser registrada y se le debe de asignar un código. Cualquier daño al envase de envío o la pérdida potencial de la integridad de la muestra debe ser informado y registrado.

Además, se debe de indicar la fecha de recibo de la muestra, si el volumen de la muestra es adecuado y de cualquier problema sospechoso con la muestra.

3.5.2 Preparación para ensayar: Mezclado para uniformizar

Para realizar la totalidad de los ensayos descritos en la **Tabla 3.1**, la muestra no debe ser más grande que 4 galones (15 litros), si la muestra está en un envase ancho, se recomienda que solo debe de estar lleno cerca de los 2/3 (dos tercios), entonces el mezclado puede ser realizado en este envase, si es que la muestra no está muy asentada y pesada.

La vibración o movimiento del transporte, causa con frecuencia la compactación de los sólidos asentados. En este caso, el líquido flotante (sobre los sólidos asentados) se debe de transferir a un segundo envase y los sólidos asentados deben ser retirados con una cuchara grande.

Posteriormente, los sólidos serán mezclados con el líquido, revolviendo en cada adición, hasta que una consistencia uniforme sea lograda.

El mejor instrumento para mezclar es la mano, la cual debe de estar protegida con un guante grueso de goma que proteja hasta el codo. Entonces, así es fácil “sentir” cuando la pulpa está mezclada uniformemente. Los agitadores eléctricos tienden a causar salpicaduras y por lo tanto la pérdida de muestra.

También, es más difícil de juzgar cuando una pulpa es mezclada con uniformidad. Además, la presencia de partículas de gran tamaño, puede ser fácilmente detectada por una mano con guantes de goma.

3.5.3 Partición de la muestra

Una vez que la muestra entera este mezclada uniformemente, una “muestra de trabajo”, de aproximadamente 1 litro es extraída.

Esto es realizado, revolviendo la muestra y vertiéndola rápidamente en una jarra con capacidad de 2 litros con asa e inmediatamente vertiendo toda esa muestra a un vaso de cristal de 2 litros. Esta muestra es de un tamaño manejable para mantener uniformemente mezclada la muestra usando una espátula plástica o de goma. Además, se debe de medir y de registrar el pH recibido de la muestra.

Nota: Este método no es adecuado para partir la muestra para el análisis de tamices, si la muestra tiene muchos gruesos que rápidamente pueden asentarse.

3.5.4 Concentración recibida

La determinación de la concentración de sólidos recibida, es determinada por la siguiente secuencia de actividades:

1. Un molde debe ser enumerado en un lado, después se debe pesar limpio, seco y vacío y registrar los valores obtenidos.

2. Se debe mezclar uniformemente la muestra de trabajo y aproximadamente 200 ml se vierten rápidamente en un molde. Si la pulpa es “fácilmente asentable”, es mejor hacer 2 o 3 trasvases cortos, en vez de 1 solo vertido largo, que permitiría que la pulpa comenzará a “asentarse”.
3. Se mueve el molde, de modo que la pulpa cubra el fondo entero del molde (facilitando la evaporación del agua); se pesa de nuevo el molde y la pulpa y se registra su peso.
4. El molde con la pulpa se coloca en un horno (generalmente a 105 °C, a menos que la naturaleza química de la pulpa requiera una temperatura más baja) y se debe de registrar el tiempo.
5. Se deben de repetir los pasos 1 a 4 ya descritos, para una segunda muestra.
6. Cuando las muestras de pulpa en los moldes parecen secas, se retiran del horno para pesarlas y registrar el tiempo y luego los moldes son regresados al horno.
7. Este proceso de pesaje se repite a intervalos convenientes (1/4 a 1/2 hora), hasta que lecturas idénticas y consecutivas indican que la pulpa está totalmente seca. La concentración en peso de la muestra recibida, es entonces calculada por la **Fórmula 3.1**:

$$C_w (\%) = \frac{(\text{Peso del molde} + \text{sólidos secos}) - \text{Peso del molde vacío}}{(\text{Peso del molde} + \text{muestra de pulpa}) - \text{Peso del molde vacío}} \quad (3.1)$$

8. Se determina para ambas muestras 1 y 2, el valor de las concentraciones. Los valores deben de converger dentro de $\pm 0.2\%$. Esta verificación confirma que la muestra fue adecuadamente mezclada.

Entonces, el valor medio de la concentración se registra como la concentración en peso de sólidos recibida.

9. Los cálculos y los resultados se deben de registrar.

3.5.5 Precauciones por asentamiento rápido

Si una pulpa tiene un alto porcentaje de partículas gruesas, las cuales se asientan muy rápidamente, es esencial que la muestra sea tomada inmediatamente después de revolver.

La velocidad del muestreo es esencial, puesto que estas pulpas con gruesos permanecen uniformemente suspendidas solamente por un corto plazo después de mezclarse.

3.6 Ajuste de la concentración

A continuación se describirán los pasos necesarios para obtener la concentración en peso de sólidos requerida o deseada, en base a la concentración de sólidos recibida:

1. Se empieza con la muestra de trabajo (como fue descrito anteriormente y que está en un envase de 2 litros) denominado "como recibida" y en donde ya se ha medido la concentración.
2. Se pesa de nuevo el vaso y la pulpa, calculando de esta forma, la masa de la pulpa.
3. Con el valor conocido de la concentración de sólidos de la pulpa, se calcula la masa de los sólidos secos presentes por la **Fórmula 3.2**.

$$\text{Masa de sólidos secos (X gr)} = \text{Masa de la pulpa} \times \% \text{ de } C_w \quad (3.2)$$

4. Para el nuevo valor de concentración requerido, se calcula la masa de pulpa para esta nueva concentración, que tiene X gr de sólidos secos, según la **Fórmula 3.3**.

$$\text{Masa de pulpa (gr)} = \text{Masa de sólidos secos (X gr)} / \text{Nuevo \% de } C_w \quad (3.3)$$

5. Se adiciona el peso conocido del vaso, para obtener el peso bruto (pulpa más vaso) para la nueva concentración.
6. Si la nueva concentración es más baja que la concentración de inicio, se agrega agua (agua de procesos proveída, agua potable o agua destilada), hasta que se alcance el nuevo peso bruto requerido.
7. Si la nueva concentración es más alta que la concentración de inicio, se deja a la pulpa en el envase para que se asiente (durante la noche si es necesario), entonces se retira con una pipeta, la cantidad suficiente de agua clara, hasta que el nuevo peso bruto sea alcanzado.

Nota: Si se revuelve uniformemente la pulpa a la nueva concentración. Esta muestra, entonces estará lista para usarla en los siguientes ensayos. A la hora de uso, se revuelve la pulpa a fondo y se realiza la prueba de la torta, para obtener el valor actual de la concentración.

Si la pulpa contiene finos (los cuales no se asientan), incluso después de un tiempo prolongado; entonces, el agua debe ser eliminada por evaporación en el horno. Este proceso debe ser supervisado de cerca y la pulpa se debe revolver regularmente para prevenir cualquier efecto de “nata o capa superficial”, que retrasaría la evaporación del agua.

Si este método tiene que ser utilizado (debido a la naturaleza de poca sedimentación de la pulpa), no será posible predecir la nueva concentración tan precisamente, debido a las pérdidas incurridas en el retiro de esta nata o capa superficial.

3.6.1 Ejemplo de ajuste de la concentración

Un vaso de laboratorio que pesa 125.3 gr tiene un peso total de 425.3 gr cuando contiene pulpa a una concentración en peso de 35.4%.

Como ejemplo, se calculará el nuevo peso total y la masa del agua a ser agregada o retirada con una pipeta, si la concentración se va ajustar a: a) 30.5% o b) 43.4%.

$$\text{Masa de la pulpa a 35.4\% de concentración} = 425.3 - 125.3 = 300 \text{ gr}$$

$$\text{Masa de sólidos secos} = 300 \text{ gr} \times 35.4\% = 106.2 \text{ gr}$$

a) Para la nueva concentración en peso de 30.5%:

$$\text{Masa de pulpa} = 106.2 \text{ gr} / 30.5\% = 348.2 \text{ gr}$$

$$\text{Nuevo peso bruto incluyendo el vaso} = 348.2 + 125.3 = 473.5 \text{ gr}$$

Por lo tanto, se agrega agua hasta que el peso bruto sea de 473.5 gr.

b) Para la nueva concentración en peso de 43.4%:

$$\text{Masa de la pulpa} = 106.2 \text{ gr} / 43.4\% = 244.7 \text{ gr}$$

$$\text{Nuevo peso bruto incluyendo el vaso} = 244.7 + 125.3 = 370.0 \text{ gr}$$

La pulpa se deja asentar y el agua se retira con una pipeta medida, hasta que el peso bruto sea de 370.0 gr.

3.7 **Resumen**

En este capítulo, se describieron los diferentes ensayos con pulpas minerales realizados en laboratorios especializados y que cumplen las normas o estándares vigentes; ya que los resultados de los mismos, pueden definir el diseño de un sistema de transporte de pulpa de corta o larga distancia, ya que una adecuada caracterización de una pulpa (conocer sus parámetros físicos y reológicos), llevará a efectuar un diseño más adecuado, optimizando sus componentes y asegurando que posea la flexibilidad y confiabilidad de una operación continua.

Entre los ensayos más importantes, podemos mencionar el análisis de tamices (*PSD*) y de sub tamizado para poder determinar la distribución de tamaño de las partículas sólidas; que es muy importante, ya que afecta directamente a la reología de una pulpa. Luego tenemos el ensayo de gravedad específica (SG_s) que es un dato básico para cualquier fórmula que estima las pérdidas friccionales o las velocidades críticas del flujo. Finalmente, el ensayo de reología, con el cual, se puede inferir el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica de la pulpa a ensayar.

Además, se tienen ensayos complementarios como el de factor de forma, asentamiento, penetración, corrosión, ángulo de deslizamiento, ángulo de reposo y número de Miller, que son ensayos necesarios para definir el diseño y la operación de un sistema de transporte de pulpa.

Finalmente, se describen los requisitos mínimos de una muestra, según los ensayos a realizar, también las instrucciones de envío para garantizar la integridad de una muestra y los pasos necesarios para recibir la muestra como son: preparar la muestra a ensayar, partición de la muestra, concentración de sólidos recibida y ciertas precauciones para el manipuleo y ensayo de una muestra, la cual debe de ser representativa, a la pulpa que se transportará a futuro, vía una tubería.

CAPÍTULO IV:

PROCEDIMIENTO DE TOMA Y REGISTRO DE DATOS

4.1 Introducción

Los procedimientos de toma y registro de datos en cualquier estudio de investigación son de mucha importancia; ya que son la fuente de información básica, en el cual se basarán los estudios, fórmulas o procedimientos posteriores y por lo tanto se deben de realizar con el mayor cuidado y responsabilidad.

Cuando se trata de estudios de pulpas, estos procedimientos y registros tienen características definidas por normas y/o las buenas prácticas de laboratorios especializados; donde se realizan estos tipos de ensayos, ya que sus resultados pueden afectar directamente el diseño de un sistema de transporte de pulpas, que generalmente es muy costoso.

En este capítulo, se describirán los procedimientos y registro de tres ensayos principales a realizar, para cada una de las cuatro muestras de pulpas minerales materia de esta Tesis. Los ensayos a describir son: el análisis de tamices (*PSD*), gravedad específica de sólidos (*SG_s*) y reología, que son los ensayos más importantes para poder caracterizar una pulpa y así tener una noción más clara de la pulpa que se desea transportar, según los resultados a obtener.

Con los resultados de estos ensayos, se podrá estimar los parámetros físicos y reológicos de las pulpas minerales a diferentes concentraciones de sólidos, como objetivo específico de esta Tesis.

4.2 Muestras a analizar

Las cuatro (4) muestras a analizar provienen de dos minas en operación y de dos proyectos mineros en el Perú. Dos muestras son de relaves de cobre de minas subterráneas actualmente en operación y las otras dos muestras son de

concentrado de cobre de proyectos futuros a tajo abierto que se planean operar en el Perú.

Todas las muestras fueron analizadas en los laboratorios de Pipeline System Incorporated (PSI) en Concord – California (EEUU), entre los meses de julio a diciembre del 2008, ya que posee los instrumentos y/o equipos necesarios para realizar este tipo de ensayos. Con esa data obtenida de los ensayos, se ha desarrollado esta Tesis de investigación.

La **Tabla 4.1** presenta el resumen de las muestras a analizar, así como su denominación a ser empleada para su registro, análisis e interpretación de datos de acá en adelante, ya que es más adecuado nombrarlos por tipo (relaves de cobre o concentrado de cobre) en vez de su fuente de origen (mina en operación o proyecto a futuro), ya que puede distorsionar la interpretación de los resultados, que se deben de basar solamente en el análisis de las propiedades físicas y reológicas de las pulpas y así poder estimar sus parámetros reológicos a diferentes concentraciones de sólidos, como objetivo de esta Tesis de investigación.

Tabla 4.1: Muestras a analizar en la Tesis de investigación

Ítem	Tipo de muestra a analizar	Fuente de origen	Lugar de toma	Denominación en la Tesis
1	Relaves de cobre	Mina Iscaycruz	Relavera	Relaves de Cobre - Tipo A
2	Relaves de cobre	Mina Yauliyacu	Relavera	Relaves de Cobre - Tipo B
3	Concentrado de cobre	Proyecto Galeno	Planta piloto	Concentrado de Cobre - Tipo A
4	Concentrado de cobre	Proyecto Las Bambas	Planta piloto	Concentrado de Cobre - Tipo B

A continuación, se describirán los procedimientos y las metodologías de ensayo y registro de datos de los ensayos a realizar, para las muestras de la **Tabla 4.1**.

4.3 Análisis de tamices (PSD)

4.3.1 Introducción

La distribución del tamaño de las partículas sólidas en una pulpa, tiene una gran influencia en la viscosidad de una pulpa. La hidráulica de una pulpa que contiene significativas cantidades de partículas más pequeñas de 74 μm (tamiz #200) depende de la reología.

4.3.2 Objetivo

El objetivo de este ensayo, es medir la distribución del tamaño de las partículas sólidas sobre los 20 µm (tamiz #625), usando los tamices Tyler.

4.3.3 Requisito de la cantidad de muestra

La determinación de la cantidad de muestra es importante, pues se requiere una muestra representativa; pero como precaución, es necesario que la muestra no sea demasiada grande, sino llenará los tamices.

Según la **Tabla 3.1**, la cantidad aproximada para este ensayo será de ½ litro de pulpa. Además, la **Tabla 4.2** provee de una guía, según la experiencia con muestras previas de ciertas pulpas minerales; por lo tanto, el peso de la pulpa a ensayar debe ser calculado.

Tabla 4.2: Peso seco requerido para el ensayo de *PSD* según tipo de mineral

Tipo de mineral	Peso seco requerido
Concentrado de hierro	160 a 180 gr de sólidos secos
Carbón	80 a 100 gr de sólidos secos
Concentrado	160 a 180 gr de sólidos secos
Mineral de cobre o Relaves	140 a 160 gr de sólidos secos
Concentrado de fosfato	120 a 140 gr de sólidos secos

4.3.4 Equipo requerido

El siguiente equipo es requerido para el análisis de tamices:

- Set de seis (6) a diez (10) tamices Tyler. (Ver **Tabla 2.2** de tamaño de tamices)
- Seis (6) moldes para pulpa.
- Vibrador para tamices.
- Cojín de goma espumosa gruesa (para actuar como apoyo y por el ruido del vibrador para tamices).
- Vasos de cristal.
- Recipiente de colección para recibir finos.

- Botellas de abastecimiento y/o lavado con boquilla.
- Cepillo de cerdas gruesas.
- Cepillo de alambre (alambres fijados en un tubo metálico).

Los seis (6) tamices con la cacerola inferior, se deben de acomodar en el vibrador para tamices.

4.3.5 Procedimiento

El procedimiento del ensayo es el siguiente:

1. Se comienza con una muestra de trabajo, cuya concentración ha sido establecida por la prueba de la torta. Se revuelve a la muestra de trabajo para uniformizarla. Se pesa un molde limpio y seco y un vaso de cristal limpio y seco de 600 ml.
2. Se agrega una masa conveniente de pulpa (calculada según el ajuste de concentración deseada para la muestra) al vaso de cristal, se anota el peso total y el peso solo de la mezcla.
3. Se realiza el ensayo de la muestra recibida, teniendo cuidado de revolver uniformemente la muestra.
4. Se coloca hasta 6 tamices lavados (o 7 si se usa 2 profundidades medias de los tamices) en el vibrador de tamices, colocados los tamices en orden ascendente según el tamaño de la abertura del tamiz; el tamaño de abertura más pequeño debe estar al lado de la cacerola inferior.

Se debe colocar una manguera en la cacerola inferior, para recoger los finos en el recipiente de colección. Se vierte la muestra sobre el tamiz superior.

Nota: Se debe tener cuidado de que todos los restos de la muestra sean transferidos al tamiz superior.

5. Se prende el vibrador y se lava cuidadosamente la muestra a través del tamiz superior, usando un chorro fino de agua de la botella de lavado. Se debe continuar hasta que no hayan más partículas que pasen a través de la pantalla superior. Se debe asegurar de que agua este goteando a través de todos los tamices, el agua debe fluir hasta el recipiente inferior de colección.

Precaución: El agua no debe estar en la superficie exterior de los tamices. No se debe agregar demasiada agua a la vez o los tamices pueden rebalsar, haciendo que algunas partículas se pierdan por los lados.

Se debe levantar la pantalla superior hacia un lado y se lava cuidadosamente su superficie inferior, de modo que cualquier partícula que se ubique allí, sea lavada y se precipite hacia el tamiz de abajo.

6. Se coloca la pantalla superior en un molde limpio y secado en el horno a 105 °C de una a dos horas.
7. Se deben de repetir los pasos 5 y 6 para cada uno de los tamices en secuencia. Se realiza los chequeos del peso para verificar su sequedad.
8. Se coloca los tamices secos en el vibrador de tamices, en orden ascendente según el tamaño de la abertura del tamiz, el más pequeño al lado de la cacerola inferior. Primero, para la pantalla más pequeña, se saca el tamiz del vibrador y se coloca cuidadosamente la cacerola inferior en vez del tamiz retirado. Se cepilla cuidadosamente cualquier partícula que se adhiera al molde dentro del tamiz.

Se repite, hasta que todos los tamices se apilen en el vibrador de tamices secos y sean asegurados con la abrazadera en la posición de la tapa del tamiz superior. Se funciona el vibrador seco por aproximadamente 25 minutos.

9. Se inclina el tamiz superior y se cepilla la superficie inferior cuidadosamente con el cepillo de cerdas, de modo que cualquier partícula adherida a la superficie inferior caiga en el tamiz de abajo.
10. Se retira el tamiz superior de la vibradora y se lo coloca en un molde seco y limpio. Se pesa el molde seco y limpio, que se utilizará como molde de recepción.
11. Se coloca el molde de recepción encima del previo tamiz. Y agarrando firmemente con las manos las abrazaderas del tamiz, se da media vuelta (es decir, se rota 180°) al sistema, de modo que las partículas del tamiz caigan en el molde de recepción pesado.
12. Se pasa firmemente el cepillo de alambre a través de la superficie inferior del tamiz, en las direcciones de los alambres del acoplamiento, de modo que

cualquier partícula todavía adherida caiga del acoplamiento del tamiz en el molde de recepción.

13. Se pesa el molde de recepción y su contenido y se obtiene el peso de la fracción de ese tamiz. La fracción de transferencia del tamiz debe ser etiquetada. Se repite esta secuencia para todas las fracciones de los tamices.

Nota: Se debe comprobar el peso del molde de recepción para asegurarse de que dicho molde este totalmente vacío y limpio antes de volverlo a usar en la siguiente fracción de tamices.

14. Se guardan las fracciones secas, para la determinación del factor de la forma.

4.3.5.1 Método del ensayo de la torta

El método del ensayo de la torta se utiliza para determinar la concentración de sólidos en peso de la pulpa que es ensayada y su secuencia es:

1. Se enumera un molde limpio, seco y vacío. Se pesa el molde y se anota el peso.
2. Se pesa el molde con la masa de la pulpa, se anota el peso total y por diferencia el peso de la pulpa.
3. Se coloca el molde con la masa de la pulpa en el horno a 105 °C por una a dos horas, hasta que este seca. Se pesa con intervalos, hasta que el peso sea constante, que indica que se ha evaporado toda la agua.
4. Se anota el peso total del molde con los sólidos secos y por diferencia el peso de los sólidos.
5. Se calcula el porcentaje en peso de los sólidos de la pulpa.

4.3.6 Metodología del ensayo y calibración del equipo

4.3.6.1 Metodología

Este procedimiento cumple con la norma ASTM E 276: Método estándar de la prueba para el tamaño de partículas o el análisis del tamiz N° 4 (4.65 mm) o más finos para minerales metálicos y materiales relacionados. Los tamices usados son los tamices estándares ASTM E11-04 tamices Tyler (Ver **Tabla 2.2** de la Sección 2.2.2)

4.3.6.2 Calibración del equipo

Los tamaños del tamiz se aceptan como los tamaños manufacturados por el fabricante. Ninguna “calibración” puede ser realizada. La comprobación periódica de las balanzas, se debe realizar usando un peso estandarizado de un kilogramo (1 kg). Cualquier calibración de balanzas, debe ser realizar por el fabricante.

4.3.7 Registro de datos

Los registros de los datos del ensayo de tamices se encuentran detallados en el **ANEXO A**. La **Tabla 4.3** muestra el resumen de datos del ensayo de PSD.

Tabla 4.3: Resumen del registro de datos para el ensayo de *PSD* de las muestras

Malla Tyler	Tamaño (µm)	% Pasante acumulado			
		Relaves de Cobre - Tipo A	Relaves de Cobre - Tipo B	Concentrado de Cobre - Tipo A	Concentrado de Cobre - Tipo B
16	1,000	100.00%	-	-	-
24	710	-	100.00%	-	-
28	595	98.93%	99.94%	-	-
32	500	96.89%	99.74%	-	-
48	297	82.95%	95.78%	-	-
65	210	64.54%	84.41%	100.00%	100.00%
100	149	52.57%	75.63%	99.76%	95.72%
150	105	-	-	98.12%	89.23%
200	74	34.28%	56.85%	93.56%	80.61%
270	53	28.13%	48.99%	80.85%	68.75%
325	44	25.16%	45.38%	73.40%	63.42%
400	37	-	-	65.80%	57.38%
Bandeja		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

4.4 Gravedad específica de sólidos (SG_s)

4.4.1 Introducción

El diseño de tuberías de transporte de pulpa requiere de la caracterización de los sólidos, así como de la pulpa. La gravedad específica de los sólidos es requerida para estimar las pérdidas de presión y las velocidades de transición laminar - turbulenta y de la velocidad de deposición.

4.4.2 Objetivo

El objetivo de este ensayo es determinar la gravedad específica de sólidos secos de una pulpa mineral, usando el método del matraz de Le Chatelier.

4.4.3 Requisito de la cantidad de muestra

Para completar el ensayo, tres (3) matraces serán utilizados. El bulbo de cada matraz Le Chatelier debe estar entre 1/3 a 1/2 lleno de sólidos secos.

De experiencias previas, los requisitos aproximados para cada matraz se resumen en la **Tabla 4.4**. La muestra total requerida será de tres veces estas cantidades para utilizar los tres matraces.

Tabla 4.4: Peso requerido por cada matraz para el ensayo de SG_s

Tipo de mineral	Peso seco requerido (por cada matraz)
Concentrado de hierro	120 a 150 gr de sólidos secos
Carbón	60 a 80 gr de sólidos secos
Concentrado	120 a 150 gr de sólidos secos
Mineral de cobre o Relaves	120 a 140 gr de sólidos secos
Concentrado de fosfato	140 a 160 gr de sólidos secos

4.4.4 Equipo requerido

Los siguientes equipos de laboratorio y productos químicos son necesarios para completar este ensayo:

- Tres matraces Le Chatelier.
- Dispersante (hexametafosfato de sodio), aproximadamente 0.1 gr por matraz.
- Termómetro (con escala de 0 a 50 °C).
- Placa y molde (para ser utilizados en el baño de agua hirviendo).
- Tapa plástica para sellar los alrededores del cuello de los matraces en el baño de agua (esto inhibe la evaporación y permite que el agua sea mantenida en su punto de ebullición).
- Embudo plástico pequeño.

4.4.4.1 Datos de referencia

1. Ver los procedimientos para los pesos secos y los volúmenes del matraz (estandarizados) de uso actual.

2. La densidad del agua para diversas temperaturas, será considerado como en la **Tabla 4.5**.

Tabla 4.5: Densidad del agua para diversas temperaturas

T (°C)	$\rho_{\text{agua}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	T (°C)	$\rho_{\text{agua}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$
17	0.99877	22	0.99777
18	0.99860	23	0.99754
19	0.99840	24	0.99733
20	0.99820	25	0.99704
21	0.99799	-	-

4.4.5 Procedimiento

4.4.5.1 Día 1

1. Se registra el peso de los matraces vacíos (peso seco de los matraces). Se comprueba el valor medido contra el valor del peso seco registrado del matraz en su registro (se debe asegurar de que el matraz esté totalmente seco y limpio).
2. Una muestra de pulpa se seca en el horno a 105 °C, hasta obtener un peso constante, para luego permitir que los sólidos se aireen.
3. Se agrega una cantidad apropiada de sólidos a cada matraz Le Chatelier usando un embudo plástico pequeño (el bulbo del matraz debe estar por lo menos 1/3 lleno).

Los sólidos agregados por medio de este embudo pasarán directo hacia abajo del matraz, con el mínimo de contacto con el cristal (cuando partículas sólidas secas pasan por una superficie de cristal seca, el cristal tiende a cargarse electrostáticamente, lo cual causa que las partículas sólidas sean atraídas y se adhieren a él).

4. Se registra el peso total (bruto) y por diferencia el peso de los sólidos para cada matraz.
5. Se vierten los 0.1 gr de hexametáfosfato de sodio en cada matraz. El embudo también se utiliza para agregar el hexametáfosfato de sodio (dispersor) a cada matraz. Esto permite que las partículas del dispersor caigan directamente en

el matraz sobre los sólidos secos. Si el embudo no se utiliza, las partículas tienden a “volar” y perderse en la boca del matraz.

6. Se agrega el agua hasta que el bulbo este aproximadamente 3/4 lleno, asegurándose de que todos los sólidos sean mezclados. Una mezcla a fondo, debe dispersar a las partículas sólidas.
7. Se calienta los matraces en agua hirviendo por 2 a 3 horas.
8. Se debe agregar agua, para mantener el nivel aproximado de 23 a 24 ml. Se debe permitir que se asiente durante toda la noche.

4.4.5.2 Día 2

1. Se agrega agua al nivel aproximado de 22 a 23 ml (los niveles habrán disminuido durante la noche anterior).
2. Se lee los niveles en ml y se pesa (peso bruto). Los matraces deben ser limpiados a fondo y secados en su exterior e interior, sobre el nivel líquido.
3. Se toman la temperatura. El bulbo del termómetro se debe situar en el agua, apenas sobre los sólidos asentados y no dentro de los sólidos asentados.

4.4.6 Limpieza del equipo de ensayo

4.4.6.1 Limpieza del matraz Le Chatelier después de su uso

1. Se sostiene los matraces por el bulbo (de forma que el vástago no sea dañado). Se sacude el matraz suavemente para mezclar los sólidos y el líquido, para así poder verter la mezcla en un envase conveniente.
2. Se lava los matraces en varias ocasiones, hasta que no hayan partículas sólidas. Se invierten los matraces (de forma vertical) en la bandeja de drenaje, con sus bulbos apoyados en un estante. Se deja drenar y secar durante la noche.

Nota: Si las partículas persisten en el interior del bulbo donde ningún cepillo puede alcanzar, se debe:

- a) Agregar un puñado de “grava de acuario” (grava revestida de plástico) al matraz, junto con un poco de limpiador abrasivo (refregando suavemente) y se sacude a fondo hasta que las partículas sean removidas.

- b) Vaciar la grava en un tamiz grueso Tyler (se lava la grava y se deja secar para reutilizar).
- c) Lavar el matraz en varias ocasiones con agua, para quitar todos los rastros de las partículas agregadas y del limpiador abrasivo. Se invierte el matraz (exactamente de forma vertical) en la bandeja del drenaje, con sus bulbos apoyados en un estante. Se deja drenar y secar durante la noche.

4.4.7 Metodología del ensayo y calibración del equipo

4.4.7.1 Metodología

Este procedimiento se basa en el método estándar de la norma ASTM C188, para estimar la densidad del cemento hidráulico, que describe el uso del matraz Le Chatelier. Sin embargo; los pasos del procedimiento, han sido descritos en mayor detalle, que los presentados en la norma referida de la ASTM.

La precisión prevista de los resultados se describe en el párrafo 6 de la norma ASTM C188. La calibración del método es determinada por la capacidad de repetición de los resultados. Se recomienda realizar siempre un mínimo de tres determinaciones a menos que sea restringido por la escasez de la muestra.

4.4.7.2 Calibración del equipo

Los matraces secos y limpios se pesan al principio de cada prueba y se comprueban contra los pesos previamente registrados.

Nota: Debido al desgaste (abrasión, etc.), una disminución muy leve del peso (en el orden de -0.01 gr) se puede observar de un matraz, que ha estado siendo utilizado por un cierto tiempo. El volumen del bulbo del matraz (hasta el nivel cero marcado en el vástago del matraz), se determina cuando un matraz nuevo se pone en uso y se debe evaluar periódicamente como chequeo.

4.4.8 Registro de datos

Los registros de los datos del análisis de gravedad específica de sólidos (SG_s) se encuentran detallados en el **ANEXO B** que presentan los datos de las muestras recibidas. La **Tabla 4.6** presenta el resumen de los datos del ensayo de SG_s .

Tabla 4.6: Resumen del registro de datos para el ensayo de SG_s de las muestras

Muestra ensayada	Pruebas			Promedio
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
Relaves de Cobre - Tipo A	3.52	3.13	3.56	3.40
Relaves de Cobre - Tipo B	2.71	2.74	2.84	2.76
Concentrado de Cobre - Tipo A	4.55	4.29	4.19	4.34
Concentrado de Cobre - Tipo B	4.42	4.34	4.45	4.40

4.5 Reología

4.5.1 Introducción

La reología es la relación entre el esfuerzo de corte y el índice de corte resultante. La mayoría de los líquidos naturales exhiben una reología Newtoniana; en la cual, el esfuerzo de corte es proporcional al índice de corte. La constante de proporcionalidad se define como la viscosidad del fluido. La presencia de las partículas sólidas, específicamente de finos en las pulpas, cambian mucho la reología del fluido portador.

Los viscosímetros rotatorios y de tubos capilares son usados para determinar los parámetros reológicos. Históricamente, se utiliza normalmente el viscosímetro Contraves, pero actualmente este viscosímetro está fuera de producción y la mayoría de los laboratorios están empezando a utilizar el viscosímetro Haake.

4.5.2 Objetivo

El objetivo de este ensayo es medir la viscosidad y la fuerza de fluencia de una pulpa a concentraciones específicas de sólidos, usando un viscosímetro Contraves Rheomat 15T.

4.5.3 Requisito de la cantidad de la muestra

Este ensayo se realiza generalmente a tres diferentes concentraciones. Cada ensayo requiere aproximadamente de 350 ml de pulpa a la concentración en peso requerida. El sistema A (taza y péndulo) requiere aproximadamente de 175 ml de pulpa. Los sistemas B, C o D requieren menos cantidad de pulpa. Además, aproximadamente 175 ml son necesarios para el ensayo de la torta para cada concentración en peso.

4.5.4 Equipo requerido

El siguiente equipo es requerido para el ensayo de reología:

- Viscosímetro Contraves Rheomat 15T.
- Taza y péndulo apropiados (sistema A, B, C o DIN seleccionados según las características de la pulpa).
- Molde y barra para revolver.
- Medidor de pH con punta de prueba de la temperatura.
- Recipiente para baño de agua a temperatura constante (recipiente pequeño, que reciba a la base del viscosímetro); solamente si el ensayo requiere que la reología sea efectuada a temperaturas significativamente más altas o bajas que la temperatura ambiente.

Nota: Si se va a efectuar el ensayo de reología a una temperatura constante usando el baño de agua, se debe de dejar un tiempo adecuado entre las lecturas, para que la muestra recupere la temperatura de equilibrio del baño, antes de ser revuelta inmediatamente y antes de la siguiente lectura a tomar.

Esto significa que una reología, opera rigurosamente a una temperatura constante y que tomará un tiempo considerablemente más largo que el ensayo de una reología “normal” (ejemplo de una reología, en donde la temperatura se permite elevarse levemente, debido a la acción de revolvimiento del viscosímetro, durante el ensayo). En este caso, el promedio de las temperaturas iniciales y finales se tomará como la temperatura del ensayo.

4.5.5 Procedimiento

4.5.5.1 Disposición

1. Se prepara la muestra de pulpa a la concentración y pH requeridos y con los aditivos requeridos (por ejemplo el reactivo que se utilizará para el ajuste del pH y cualquier otro aditivo requerido, debe ser especificado).
2. Se instala el baño de agua a temperatura constante y según la temperatura requerida, solo si es necesario.

3. Se selecciona la taza Contraves y el péndulo a ser utilizado.

Se debe de utilizar el sistema A siempre que sea posible. Si la mezcla tiene una gran viscosidad y/o fuerza de fluencia, de modo que las lecturas del viscosímetro excedan de 100 (máximo de la escala) para alguno o todas las velocidades de rotación del péndulo con el sistema A, entonces se debe de utilizar el sistema B.

Los sistemas C o DIN, pueden ser necesarios para pulpas muy pesadas o densas. Si es posible, es deseable tener todas las reologías a las diferentes concentraciones deseadas y usando el mismo sistema de taza y péndulo. Se debe de analizar, si la concentración más alta a ser ensayada requiere cambiar a un sistema diferente.

La **Tabla 4.7** muestra los coeficientes del viscosímetro Contraves Rheomat 15T para los diversos sistemas de medición de la reología de una pulpa.

Tabla 4.7: Coeficientes del viscosímetro Contraves Rheomat 15T

Velocidad (rpm)	Sistema A	Sistema B	Sistema C	Sistema DIN
1	10.58	2.52	1.59	7.22
2	14.20	3.39	2.14	9.71
3	18.69	4.46	2.82	12.20
4	24.90	5.95	3.76	17.00
5	32.90	7.85	4.96	22.50
6	47.40	11.32	7.14	32.40
7	63.70	15.19	9.59	43.50
8	83.80	19.99	12.62	57.30
9	111.70	26.70	16.84	76.30
10	147.40	35.20	22.20	101.00
11	214.00	51.10	32.20	146.00
12	287.00	68.60	43.30	196.00
13	378.00	90.20	57.00	258.00
14	504.00	120.40	76.00	345.00
15	665.00	158.80	100.30	454.00
$C_{v\ rep}$	0.2690	2.0500	19.0200	0.3440
$\tau_{\ rep}$	1.7912	3.2480	19.0760	1.5630

4. Se pesa un molde limpio y seco (para la prueba de la torta).

4.5.5.2 Método de prueba de la torta

El método de prueba de la torta se utiliza para determinar la concentración en peso de sólidos de la pulpa a ser ensayada y tiene la siguiente secuencia:

1. Se pesa el molde con la masa de la pulpa, se anota el peso total y por diferencia el peso de pulpa.
2. Se coloca el molde con la masa de la pulpa en el horno a 105 °C por una a dos horas, hasta que este seca.
3. Se pesa el molde con los sólidos secos, se anota el peso total y por diferencia el peso de los sólidos.
4. Se calcula el porcentaje de sólidos de la pulpa.

4.5.5.3 Procedimiento

1. Se revuelve la mezcla a fondo y se agrega al sistema (de taza y péndulo) y al molde, alternadamente y revolviendo en 2 o 3 vertidas.
2. Si es requerido, se coloca en baño de agua la plataforma del viscosímetro Contraves, para poder retirar la taza y el péndulo a un lado (mientras que el resto permanece en el baño de agua), para facilitar la agitación de la pulpa entre las lecturas, asegurándose de que permanece suspendida.

Se coloca la taza, el péndulo y la pulpa en el baño de agua y se deja por un tiempo, para lograr la temperatura del baño (el péndulo se debe retirar de tiempo en tiempo, para poder revolver la pulpa y revisar su temperatura).

3. Se rota el péndulo, mientras que se levanta la taza y se la coloca en un molde limpio. La rotación reduce a un mínimo la muestra adherida al péndulo.
4. Se revuelve la muestra en la taza y se inserta el probador de pH. Se registra el pH y la temperatura de la pulpa.
5. Se revuelve la muestra en la taza, se substituye el péndulo rápidamente y se coloca la taza en el viscosímetro y se junta el péndulo a la cabeza de medición. En el ajuste de la velocidad máxima (15 rpm), se prende la máquina e inmediatamente, se toma la lectura en la escala cuando está estabilizada (se utiliza la perilla del humidificador en el lado de la máquina).

6. Se detiene la máquina, se quita la taza y el péndulo del viscosímetro, se rota el péndulo mientras que se levanta la taza suficientemente, para poder revolver la muestra en la taza (se sostiene el extremo del péndulo verticalmente sobre la taza, de modo que cualquier goteo de la pulpa caiga en la taza). Si se utiliza el baño de agua, la taza y el péndulo y su contenido deben permanecer en el baño mientras que se revuelva a la pulpa.
7. Se substituye a la taza y al péndulo rápidamente, después de revolver la pulpa y se toma la lectura en el siguiente ajuste de la velocidad (14 rpm).
8. Repita este proceso (pasos 5 a 7) para los ajustes de 15 a 1 rpm de velocidad, registrando las lecturas de escala cada hora. Repita el proceso entero tres veces, cada vez empezando (de ser posible), con la velocidad fija a 15 rpm.

Notas:

- a. En la práctica, es raramente necesario tomar las lecturas para los ajustes de la velocidad debajo de 5 rpm, desde que bajas velocidades, presenta condiciones para una pulpa cortada, que no se ajusta a los requerimientos teóricos y por lo tanto no es útil.

Precaución: Se debe dar vuelta suavemente a la velocidad que fija la perilla, de modo que no caiga el cojinete fuera. Se necesita tener cuidado en la manipulación del control de la velocidad, de modo que se localice positivamente en cada ajuste de velocidad.

En el final de cada corrida de ensayo, se debe volver el control lentamente, a través de los ajustes de la velocidad de 5 hacia 15 rpm de nuevo y listo para el siguiente funcionamiento.

- b. El revolvimiento cuidadoso es esencial, cerciorándose de que cualquier partícula colocada en el fondo de la taza este revuelta nuevamente dentro de la suspensión, esto se debe hacer antes de cada lectura.
- c. Se comprueba la temperatura de la pulpa en intervalos regulares (por lo menos después de cada tercera lectura), para asegurarse de que la pulpa permanezca a temperatura constante en el baño de agua. Si la temperatura de la pulpa varía; la taza, el péndulo y el contenido se deben dejar en el baño, con un revolvimiento intermitente, hasta que se recupere la temperatura del baño.

9. En el final de la tercera corrida, se debe contraer el péndulo y rotarlo, levantando la taza. Se revuelve la pulpa a fondo y se inserta la punta de prueba del pH. Finalmente, se debe registrar el pH y la temperatura final.
10. Se pesa un molde limpio, se revuelve de nuevo la pulpa en la taza y se transfiere toda la muestra de pulpa al molde. Se pesa de nuevo el molde y la muestra y se pone a secar en el horno, para determinar la concentración en peso de la pulpa, en el final de la prueba (método de la prueba de la torta). Este valor será generalmente más alto que la concentración de inicio, debido a la transferencia de la pulpa en la barra de revolvimiento, cada vez que se retira la muestra.

Nota: Se debe de comprobar (el peso total de la taza más péndulo más pulpa), por lo menos cada tres lecturas y del líquido a llenar, para así compensar las pérdidas por evaporación y mantener una concentración constante.
11. Se anota cualquier problema encontrado en el funcionamiento de la prueba, como tendencias o datos inusuales.

4.5.6 Metodología del ensayo y calibración del equipo

4.5.6.1 Metodología

El viscosímetro Contraves se utiliza para medir el esfuerzo de corte (τ) de una pulpa a cierta concentración de sólidos.

4.5.6.2 Calibración del equipo

El viscosímetro será calibrado según los procedimientos del fabricante.

4.5.7 Registro de datos

Los registros de los datos del análisis reológico se encuentran detallados en los **ANEXOS C, D, E y F** que presenta los datos tomados con el viscosímetro Contraves Rheomat 15T para una C_w específica.

Desde la **Tabla 4.8** hasta la **Tabla 4.11**, se presenta el resumen de los datos principales tomados en la realización del ensayo de reología para las 4 muestras de pulpa ensayadas.

Tabla 4.8: Datos del ensayo de reología para los Relaves de Cobre – Tipo A

Velocidad (rpm)	Relaves de Cobre - Tipo A (Ver Tabla C.1)			
	<i>C_w</i> = 43.41% Prueba 1	<i>C_w</i> = 47.27% Prueba 2	<i>C_w</i> = 51.90% Prueba 3	<i>C_w</i> = 55.95% Prueba 4
14	21.07	26.33	41.00	60.00
13	15.03	21.83	35.40	52.83
12	12.87	19.83	32.77	49.50
11	11.37	17.90	30.27	45.83
10	10.07	16.33	27.67	42.83
9	8.67	14.93	25.40	40.33
7	7.30	12.50	22.67	36.00
6	-	11.87	21.00	34.00

Tabla 4.9: Datos del ensayo de reología para los Relaves de Cobre – Tipo B

Velocidad (rpm)	Relaves de Cobre - Tipo B (Ver Tabla D.1)			
	<i>C_w</i> = 53.61% Prueba 1	<i>C_w</i> = 55.77% Prueba 2	<i>C_w</i> = 59.45% Prueba 3	<i>C_w</i> = 61.30% Prueba 4
14	27.40	31.07	40.90	52.33
13	20.97	24.33	32.50	42.83
12	17.53	20.77	28.00	36.57
11	15.23	18.23	25.27	32.50
10	13.00	15.67	21.60	28.53
9	10.83	13.43	19.13	25.83
7	9.10	11.00	16.10	21.83
6	7.70	10.13	15.07	20.17

Tabla 4.10: Datos del ensayo de reología para los Concentrados de Cobre – Tipo A

Velocidad (rpm)	Concentrado de Cobre - Tipo A (Ver Tabla E.1)		
	<i>C_w</i> = 55.35% Prueba 1	<i>C_w</i> = 60.63% Prueba 2	<i>C_w</i> = 68.38% Prueba 3
15	31.80	40.80	66.00
14	21.90	27.70	51.30
13	14.00	18.40	40.90
12	9.70	13.80	34.90
11	7.40	11.50	30.90
10	5.90	9.90	27.20
9	5.20	8.80	24.90
8	4.70	7.70	22.90
7	4.00	7.00	21.10

Tabla 4.11: Datos del ensayo de reología para los Concentrados de Cobre – Tipo B

Velocidad (rpm)	Concentrado de Cobre - Tipo B (Ver Tabla F.1)			
	$C_w = 55.11\%$ Prueba 1	$C_w = 60.09\%$ Prueba 2	$C_w = 64.60\%$ Prueba 3	$C_w = 72.07\%$ Prueba 4
15	31.30	40.10	49.30	-
14	21.60	26.60	33.50	87.30
13	13.60	17.90	25.70	72.80
12	9.60	13.90	22.20	64.70
11	7.50	11.70	19.20	58.50
10	6.30	10.20	17.10	52.60
9	5.60	9.50	15.50	48.50
8	5.00	8.30	14.40	45.40
7	4.50	7.60	13.40	43.40

4.6 Resumen

Este capítulo describe los procedimientos de toma y registro de los datos, que incluye los requisitos mínimos de muestras, el equipo requerido, los procedimientos y metodología de los ensayos y finalmente el registro de los datos como fuente básica para los siguientes ensayos, para las cuatro muestras de pulpas minerales (2 de relaves de cobre y 2 de concentrados de cobre), que provienen de 2 minas en operación y de 2 futuros proyectos respectivamente.

Los ensayos a realizar y descritos en este capítulo, son: el análisis de tamices (*PSD*), en donde se registraron los datos y se graficaron las curvas granulométricas respectivas, determinándose los diámetros característicos de las partículas sólidas en análisis. El segundo ensayo fue el de gravedad específica de sólidos (SG_S), que dio como resultado la determinación de la SG_S y la concentración en peso de sólidos (C_w) de la muestra recibida, como datos iniciales para los siguientes análisis.

Finalmente, se realizó el ensayo de reología y con el cual se determinaron los reogramas, que son curvas que relacionan el Esfuerzo de corte (τ) versus la Tasa de corte ($\dot{\gamma} = dV/dy$) para cierta C_w y donde se puede estimar el esfuerzo de fluencia (τ_y). Con todos estos datos básicos, se puede estimar los parámetros físicos y reológicos de las pulpas en estudio.

CAPÍTULO V:

ANÁLISIS DE DATOS Y DISCUSIÓN

5.1 **Introducción**

El análisis de los datos y la discusión de resultados engloba a los resultados finales de esta Tesis, en donde se procesará los datos de los diferentes ensayos, para así poder estimar los parámetros físicos como: la distribución de partículas (*PSD*) y la gravedad específica de sólidos (SG_s) y los parámetros reológicos como son: el esfuerzo de fluencia (τ_y) y la viscosidad plástica (η).

Con estos datos estimados, se podrá caracterizar una pulpa mineral, dando un paso fundamental para poder efectuar el diseño adecuado de un sistema de transporte de pulpas.

Un punto importante a considerar, es que los resultados de los ensayos son valores generales y se les debe de considerar dentro de un rango de posibles resultados, ya que los componentes de una pulpa (especialmente las partículas sólidas) varían mucho en su concentración, calidad, temperatura, etc.

Por lo tanto, al diseñar un sistema de transporte, se debe tener ese criterio y considerar que las características de un pulpa son variables, debiéndose de diseñar un sistema siempre para la condición más desfavorable y considerando también que debe ser económicamente viable.

5.2 **Análisis de tamices (*PSD*)**

5.2.1 Introducción

La distribución del tamaño de partículas sólidas en una pulpa, tiene una fuerte influencia en la viscosidad. Además, se tiene que considerar que si se tiene un amplio rango de tamaños de partículas, se debe de considerar los datos más desfavorables para un transporte hidráulico.

Las condiciones más desfavorables son: las partículas más gruesas y grandes (ya que son más fáciles de depositarse y tratar de obturar la tubería) y algunas veces las partículas más finas y pequeñas (que aumentan la viscosidad de una pulpa haciéndola, más difícil de transportar).

Los resultados más importantes del análisis de tamices, son los diámetros característicos (en μm), con estos valores se puede comparar a otras pulpas y así tener una noción de cómo están distribuidas las partículas de la muestra.

Con esta distribución, se puede estimar una velocidad de deposición, transición viscosa y finalmente las pérdidas de presión para el diseño de un sistema de transporte de pulpas.

5.2.2 Reporte de los resultados

Los pasos para el reporte de los resultados del análisis son los siguientes:

1. Se calcula el peso total de sólidos en la muestra del tamiz (paso 3 de la **Sección 4.3.5**) y el C_w obtenido de la prueba de la torta (paso 4 de la **Sección 4.3.5**) tomada al mismo tiempo que la muestra de los tamices.
2. Se calcula el peso de cada fracción de los tamices de la muestra analizada. Se calcula el peso total de todas las fracciones recogidas y se resta este valor del peso total de sólidos en la muestra, para obtener el peso de la fracción de “finos”.
3. Se calcula el porcentaje de los sólidos retenidos en cada tamiz y el porcentaje acumulado de sólidos que pasan por cada tamiz.
4. Finalmente, se dibuja la distribución del tamaño de partículas utilizando un gráfico semi-logarítmico llamado curva granulométrica.
5. De estas curvas granulométricas para las cuatro muestras, se obtienen fácilmente los diámetros característicos, como una relación o interpolación entre los datos más próximos.

Los diámetros característicos más utilizados, para cálculos de velocidades críticas y pérdidas de presión son: d_{95} , d_{80} y d_{50} , teniendo cada uno, una diferente aplicación e interpretación.

5.2.3 Resultados

Los resultados del análisis de tamices de las 4 muestras han sido mostrados en el **ANEXO A** donde además se presentan las curvas granulométricas y los diámetros característicos de estas muestras, los cuales son resumidos en la **Tabla 5.1**.

Tabla 5.1: Resumen de diámetros característicos del análisis de tamices

Muestra ensayada	d_{95} (μm)	d_{80} (μm)	d_{50} (μm)
Relaves de Cobre - Tipo A	472	283	138
Relaves de Cobre - Tipo B	291	179	56
Concentrado de Cobre - Tipo A	84	52	-
Concentrado de Cobre - Tipo B	144	73	-

Las curvas granulométricas de los cuatro ensayos realizados se encuentran agrupadas en la **Figura 5.1**.

5.2.4 Interpretación de resultados

Como ya se indicó, los valores más importantes del análisis de tamices son los diámetros característicos que se obtienen de las curvas granulométricas y como se observa en la **Tabla 5.1**, se observa que los valores más altos de d_{95} son para los Relaves de Cobre, lo que claramente indica que, estos relaves contienen partículas más gruesas que los Concentrados de Cobre, los cuales presentan partículas más finas y por lo tanto, serán más fáciles de transportar.

La gran mayoría de fórmulas para estimar la velocidad de deposición de una pulpa tienen una relación directa con el d_{95} y d_{80} ; por lo tanto, a mayores valores de estos diámetros característicos, se tendrán mayores velocidades de deposición, a superar por la velocidad del flujo en una tubería o sino las partículas más gruesas se empezarán a depositar causando un atoro.

El d_{50} es más usado para determinar la velocidad de deposición de las pulpas con mayor cantidad de partículas gruesas (tipo relaves o minerales) y tiene el mismo criterio que los otros diámetros característicos.

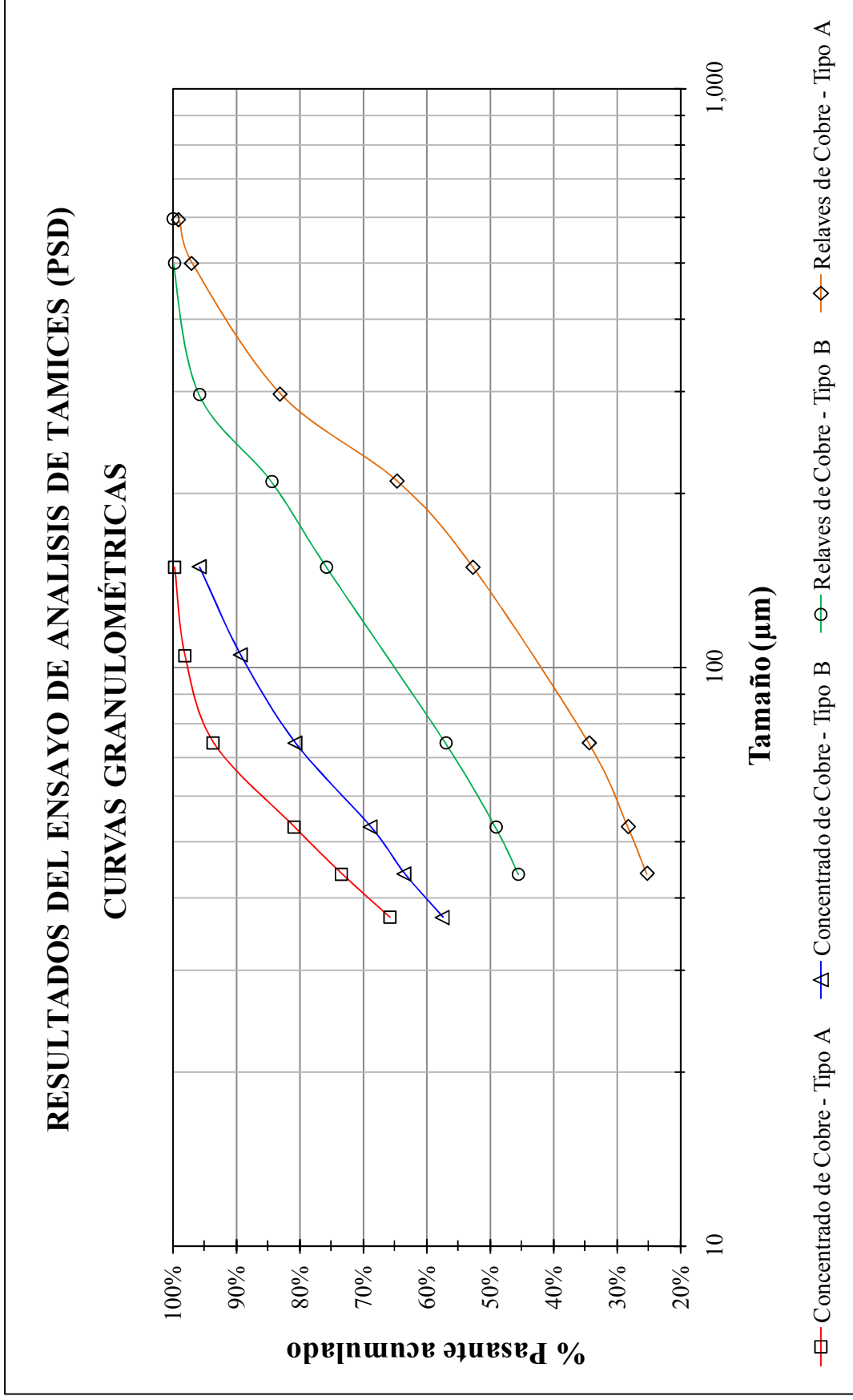


Figura 5.1: Resultados del ensayo de análisis de tamices (Curvas granulométricas)

5.3 Gravedad específica de sólidos (SG_s)

5.3.1 Introducción

La gravedad específica de sólidos (SG_s), así como la distribución del tamaño de partículas sólidas en una pulpa, tienen una fuerte influencia en la viscosidad de la pulpa. Además, el valor de la SG_s es usada en la mayoría de fórmulas para estimar las velocidades críticas de deposición y de transición viscosa y es dato necesario para el cálculo de las pérdidas friccionales para el diseño de un transporte hidráulico de una pulpa a través de una tubería.

Otra consideración muy importante para determinar la SG_s , es que es un dato básico requerido para el cálculo de parámetros como ρ_m , C_w , C_v , V_r , etc. que son valores necesarios para la gran mayoría de procesos mineros e industriales y que es importante determinarlos para hacer una adecuada caracterización de una pulpa mineral y por lo tanto, un adecuado transporte hidráulico de la pulpa mineral.

5.3.2 Reporte de los resultados

Los pasos para el reporte de los resultados del ensayo de SG_s son los siguientes:

1. Se calcula la gravedad específica usando la **Fórmula 5.1**. El resultado final será el promedio de los 3 resultados para los 3 matraces.

$$SG_s = \frac{\text{Peso de los sólidos secos (gr)}}{\text{Volumen del matraz - } \frac{\text{Peso bruto - (Matraz + Peso seco de los sólidos)}}{\text{Densidad del agua a la } T \text{ (}^\circ\text{C) del día 2}}}$$

(5.1)

2. Se registra cualquier tendencia o datos inusuales.
3. Si los sólidos pudieran contener cualquier sustancia soluble en el agua, se deben de hacer correcciones.

5.3.3 Resultados

Los resultados del ensayo de SG_s de las cuatro muestras, han sido mostrados en el **ANEXO B**, donde además se presentan las C_w de las muestras recibidas. Los valores de SG_s son resumidos en la **Tabla 5.2**, que además indica el rango de valores típicos según el tipo de mineral a analizar.

Tabla 5.2: Resumen de SG_s obtenidos del análisis a las muestras

Muestra ensayada	SG_s	Rango de SG_s típicos	Cumple
Relaves de Cobre - Tipo A	3.40	≈ 2.5 a 3.5	Ok!
Relaves de Cobre - Tipo B	2.76		Ok!
Concentrado de Cobre - Tipo A	4.34	≈ 4.0 a 4.5	Ok!
Concentrado de Cobre - Tipo B	4.40		Ok!

5.3.4 Interpretación de resultados

Como se observa en la **Tabla 5.2**, se presenta los valores de SG_s para las cuatro muestras ensayadas y además, se presenta un rango de valores típicos, donde todos los resultados caen dentro de este rango, dando una apreciación general de que los ensayos fueron realizados de manera adecuada.

El valor de SG_s es importante, ya que con este valor, se pueden determinar varios parámetros de los procesos mineros e industriales, donde las fórmulas guardan una relación directa (C_w y ρ_m) o inversa (C_v y V_r); es decir que cuando el SG_s es mayor, los parámetros con relación directa serán mayores e inversamente para los parámetros con relación inversa.

5.4 **Reología**

5.4.1 Introducción

El análisis de reología es prácticamente el más importante ensayo a realizar en una pulpa, ya que estima dos parámetros muy importantes para el diseño de un sistema de transporte de pulpas, como son el esfuerzo de fluencia (τ_y) que indica el mínimo esfuerzo requerido antes de que un fluido se empiece a mover y la viscosidad plástica (η), como un indicador de la facilidad o complejidad para mover un fluido.

Como ya se ha indicado anteriormente, mientras más se conozca cómo se comporta una pulpa y como está caracterizada, se tendrán mejores opciones de poder hacer un diseño más adecuado para un sistema de transporte de pulpas. Conocer los parámetros reológicos de una pulpa, tiene la ventaja de poder modelar

un sistema, considerando ciertas propiedades, las cuales pueden variar y así obtener resultados válidos para otras condiciones.

5.4.2 Reporte de los resultados

Los datos se deben registrar y posteriormente se deben de analizar, como se describe más adelante.

Precaución: Se debe de tomar la decisión sobre la inclusión o no de algunos puntos de referencias y la interpretación de los datos. También, se debe evaluar los valores resultantes, para asegurarse de que son reales y/o dentro de rangos razonables de ensayos de pulpas similares. Los pasos para el reporte de los resultados del ensayo de reología son los siguientes:

1. Se estima la lectura de la escala del reómetro en cada ajuste de velocidad (el promedio de las tres lecturas a cada velocidad). El pH de la prueba será el promedio de los pHs medidos al inicio y final del ensayo. La temperatura de la prueba será el promedio de las temperaturas inicial y final. La C_w de la pulpa será el promedio de las C_w al comienzo y fin del ensayo.
2. Se transfiere todos los datos a una hoja de registro.
3. Se dibuja el reograma según los datos registrados.
4. Se repite la prueba dos veces o más y a diferentes concentraciones (mínimo a $3 C_w$), según sea requerido.

5.4.3 Resultados

Los resultados del ensayo de reología seguirán la siguiente secuencia de cálculo:

1. Se deben de anotar los datos en una hoja de registro, que incluirá la descripción de la muestra y el sistema usado para el ensayo.
2. Se registra la concentración media (% en peso), la SG_s y la temperatura.
3. Se registra los valores leídos en el viscosímetro por cada velocidad.
4. Se determina qué cantidad de puntos (3 o 4 puntos) deben ser utilizados. (es decir, que puntos señalan de la mejor forma posible una relación lineal del reograma). Para el sistema A, el rango estará entre los puntos 9 a 13 rpm. Para otros sistemas, se debe de ver la guía del viscosímetro.

5. Se ingresa los valores de la tasa de corte (γ), según el sistema utilizado y se hace el cálculo del esfuerzo de corte (τ) para los puntos seleccionados.
6. Se debe observar una posible línea recta generada por los puntos seleccionados. Dos o tres puntos en el extremo inferior del reograma deben de estar debajo de la línea recta, mientras que dos o tres puntos en el extremo superior del gráfico deben de estar sobre la línea.

Nota: Se debe de lograr un buen ajuste de la línea recta. La persona que realiza el ensayo, puede desear agregar o remover un “punto efectivo”, si solamente 3 o 4 puntos fueron seleccionados originalmente.

7. El resultado de las hojas de registros deben de ser graficados en los reogramas, para finalmente por una regresión lineal de la **Fórmula 5.3**, obtener los valores de los coeficientes $F = \eta$ y τ_y .

$$\tau (Pa) = \eta dy/dt + \tau_y (Pa) \tag{5.2}$$

$$\tau (Pa) = F \gamma + \tau_y (Pa)$$

$$y (Pa) = F x + \tau_y (Pa) \tag{5.3}$$

La **Tabla 5.3** presenta el resumen de las relaciones del esfuerzo de corte (τ) para diferentes C_w de las muestras analizadas.

Tabla 5.3: Resumen de las relaciones del τ de las muestras a diferentes C_w

Muestra ensayada	$\tau (Pa) = F\gamma + \tau_y$			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Relaves de Cobre - Tipo A (Ver Tabla C.1)	$C_w = 43.41\%$ $0.004 \gamma + 1.220$	$C_w = 47.27\%$ $0.004 \gamma + 2.293$	$C_w = 51.90\%$ $0.006 \gamma + 4.110$	$C_w = 55.95\%$ $0.008 \gamma + 6.327$
Relaves de Cobre - Tipo B (Ver Tabla D.1)	$C_w = 53.61\%$ $0.006 \gamma + 1.478$	$C_w = 55.77\%$ $0.006 \gamma + 1.821$	$C_w = 59.45\%$ $0.008 \gamma + 2.679$	$C_w = 61.30\%$ $0.011 \gamma + 3.409$
Concentrado de Cobre - Tipo A (Ver Tabla E.1)	$C_w = 55.35\%$ $0.005 \gamma + 0.317$	$C_w = 60.63\%$ $0.0050 \gamma + 1.018$	$C_w = 68.38\%$ $0.01 \gamma + 3.418$	-
Concentrado de Cobre - Tipo B (Ver Tabla F.1)	$C_w = 55.11\%$ $0.003 \gamma + 0.636$	$C_w = 60.09\%$ $0.004 \gamma + 1.264$	$C_w = 64.60\%$ $0.007 \gamma + 2.041$	$C_w = 72.07\%$ $0.016 \gamma + 6.939$

La persona que realiza el ensayo debe evaluar si las constantes F y τ_y , como coeficientes de las regresiones lineales de los datos medidos por el viscosímetro y presentados en los reogramas, son adecuadas para este tipo de ensayos, según la experiencia de ensayos anteriores.

8. Se repite los pasos del 1 al 7 para los siguientes ensayos 2 y 3. Además, esta secuencia debe de realizarse para las cuatro muestras de pulpas a analizar, las cuales fueron registradas desde la **Tabla 4.8** hasta la **Tabla 4.11**.
9. Se ingresa la SG_s determinado por el ensayo de gravedad específica o proporcionada por la fuente de origen de la pulpa.
10. Se debe de trazar el gráfico $Log(\tau_y)$ vs $Log(C_w)$ y se debe de graficar, para determinar por medio de una regresión lineal, los coeficientes B y A de la **Fórmula 5.5**.

$$\tau_y = A C_w^B \quad (5.4)$$

$$Log(\tau_y) = Log(A) + B Log(C_w)$$

$$Log(\tau_y) = B Log(C_w) + Log(A)$$

$$y = B x + Log(A) \quad (5.5)$$

La **Tabla 5.4** presenta el resumen de las relaciones para la estimación del esfuerzo de fluencia (τ_y en Pa) a diferentes C_w de las muestras analizadas.

Tabla 5.4: Resumen de las relaciones para la estimación del τ_y a diferentes C_w

Muestra ensayada	$\tau_y = A C_w^B$
Relaves de Cobre - Tipo A (Ver Tabla C.2)	$278.9 C_w^{6.4662}$
Relaves de Cobre - Tipo B (Ver Tabla D.2)	$68.4 C_w^{6.1804}$
Concentrado de Cobre - Tipo A (Ver Tabla E.2)	$250.2 C_w^{11.1890}$
Concentrado de Cobre - Tipo B (Ver Tabla F.2)	$112.5 C_w^{8.8031}$

11. Se debe de trazar el gráfico $Log(\eta/\mu)$ vs $Log(C_w)$ y se debe de graficar, para determinar por medio de una regresión lineal los coeficientes C y D de la **Fórmula 5.7**.

$$\eta/\mu = C C_w^D \quad (5.6)$$

$$Log(\eta/\mu) = Log(C) + D Log(C_w)$$

$$y = D x + Log(C) \quad (5.7)$$

La **Tabla 5.5** presenta el resumen de las relaciones para la estimación de la viscosidad reducida (η/μ) a diferentes C_w de las muestras analizadas.

Tabla 5.5: Resumen de las relaciones para la estimación del η/μ a diferentes C_w

Muestra ensayada	$\eta/\mu = C C_w^D$
Relaves de Cobre - Tipo A (Ver Tabla C.3)	$56.898 C_w^{3.2651}$
Relaves de Cobre - Tipo B (Ver Tabla D.3)	$110.51 C_w^{4.6818}$
Concentrado de Cobre - Tipo A (Ver Tabla E.3)	$34.348 C_w^{3.4164}$
Concentrado de Cobre - Tipo B (Ver Tabla F.3)	$115.11 C_w^{6.1214}$

12. Finalmente, se tienen los resultados del ensayo de reología, con los dos parámetros (τ_y , η/μ y η) estimados, los cuales son resumidos en la **Tabla 5.6** para diferentes C_w y asumiendo una μ_{agua} a 25 °C, estos resultados están relacionados con respecto a la C_w , como parámetro más utilizado en minería y de más fácil conocimiento entre el personal de operaciones (de mantenimiento y de procesos) de una unidad minera.

Tabla 5.6: Resultados del ensayo de reología de las muestras a diferentes C_w

Muestra ensayada	Parámetro	Concentración en peso C_w (%)							
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
Relaves de Cobre - Tipo A (Ver Tabla C.4)	τ_y (Pa)	0.00	0.01	0.12	0.75	3.15	10.26	27.79	65.90
	η/μ	0.03	0.30	1.12	2.86	5.92	10.73	17.76	27.46
	η (cP)	0.03	0.26	0.99	2.54	5.27	9.56	15.81	24.45
Relaves de Cobre - Tipo B (Ver Tabla D.4)	τ_y (Pa)	0.00	0.00	0.04	0.24	0.94	2.91	7.55	17.23
	η/μ	0.00	0.06	0.39	1.51	4.31	10.11	20.81	38.88
	η (cP)	0.00	0.05	0.35	1.35	3.83	9.00	18.53	34.62
Concentrado de Cobre - Tipo A (Ver Tabla E.4)	τ_y (Pa)	0.00	0.00	0.00	0.01	0.11	0.82	4.62	20.61
	η/μ	0.01	0.14	0.56	1.50	3.22	6.00	10.16	16.03
	η (cP)	0.01	0.13	0.50	1.34	2.86	5.34	9.04	14.27
Concentrado de Cobre - Tipo B (Ver Tabla F.4)	τ_y (Pa)	0.00	0.00	0.00	0.04	0.25	1.25	4.87	15.77
	η/μ	0.00	0.01	0.07	0.42	1.65	5.05	12.97	29.37
	η (cP)	0.00	0.01	0.06	0.38	1.47	4.49	11.55	26.15

Adicionalmente, en la **Tabla 5.7** se presenta la comparación de los resultados reológicos obtenidos para las muestras ensayadas (agrupándolas en relaves y concentrados de cobre) contra los rangos de valores típicos para este tipo de

muestras, obtenidos de la base de datos del laboratorio reológico de PSI (Referencia 14). El rango seleccionado a comparar es el de 50 a 60% de concentración en peso de sólidos.

Tabla 5.7: Comparación de resultados entre los ensayos y valores típicos

Muestra de pulpa mineral	Parámetro	Muestras ensayadas	Rango de valores típicos	Cumple
		Cw = 50 - 60%	Cw = 50 - 60%	
Relaves de Cobre	τ_y (Pa)	0.94 - 10.26	0.23 - 34.53	Ok!
	η/μ	4.31 - 10.73	3.35 - 39.68	Ok!
	η (cP)	3.83 - 9.56	2.98 - 35.33	Ok!
Concentrado de Cobre	τ_y (Pa)	0.11 - 1.25	0.03 - 8.19	Ok!
	η/μ	1.65 - 6.00	1.11 - 11.04	Ok!
	η (cP)	1.47 - 5.34	1.16 - 9.83	Ok!

5.4.4 Validación de resultados

La validación de los resultados del ensayo de reología consiste en la comparación entre los datos iniciales y obtenidos directamente por medio del viscosímetro (τ_y medido y $\eta_{med-25^\circ C}$) y los datos estimados por los modelos, tanto para el esfuerzo de fluencia (τ_y), como para la viscosidad plástica (η , con μ_{agua} a 25 °C).

El resumen de la validación del ensayo de reología, es presentado en la **Tabla 5.8**, que muestra valores mayoritariamente en el rango de $\pm 10\%$ para ambos parámetros, lo cual indica una buena modelación, pero además existen ciertos puntos que presentan mayores diferencias.

Tabla 5.8: Resumen de la validación de los ensayos de reología

Muestra ensayada	Parámetro	Prueba			
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Relaves de Cobre - Tipo A (Ver Tabla C.5)	$\% \Delta \tau_y$ medido	-3.7%	4.3%	2.3%	-3.2%
	$\% \Delta \eta$ medido	5.1%	-10.5%	-12.9%	9.3%
Relaves de Cobre - Tipo B (Ver Tabla D.5)	$\% \Delta \tau_y$ medido	1.8%	-1.7%	-2.7%	2.5%
	$\% \Delta \eta$ medido	3.8%	-3.8%	-7.7%	7.4%
Concentrado de Cobre - Tipo A (Ver Tabla E.5)	$\% \Delta \tau_y$ medido	-5.5%	9.0%	-4.1%	-
	$\% \Delta \eta$ medido	2.6%	-31.9%	-0.7%	-
Concentrado de Cobre - Tipo B (Ver Tabla F.5)	$\% \Delta \tau_y$ medido	6.7%	-0.5%	-17.6%	9.3%
	$\% \Delta \eta$ medido	10.8%	-27.6%	-9.4%	4.5%

5.4.5 Interpretación de resultados

La **Figura 5.2** presenta el τ_y versus C_w , para las diferentes muestras ensayadas, donde se aprecia claramente que por ejemplo para una $C_w = 70\%$ para el Relave de Cobre – Tipo A presentará un $\tau_y \approx 27.79 Pa$, en comparación con las otras tres pulpas minerales, que tienen $\tau_y \leq 10 Pa$.

Lo que nos indica, que se requerirá un mayor esfuerzo inicial, para poder transportar esta pulpa (a dicha C_w) y esto puede ser debido a que tiene un gran rango de tamaño de partículas, con un límite superior de partículas gruesas con $d_{95} = 472 \mu m$ y con una gran cantidad de finos (34.28% de las partículas son menores a $74 \mu m$ o a la malla Tyler #200), como se puede apreciar en la **Tabla A.1** y su curva granulométrica.

Para el análisis de la **Figura 5.3**, se tiene que similarmente para una $C_w = 70\%$ y para el Relave de Cobre – Tipo A, se presenta el valor de $\eta \approx 15.81 cP$, que guarda relación con el análisis ya efectuado en los dos párrafos anteriores. Cabe resaltar que el Relave de Cobre – Tipo B presenta el mayor valor de $\eta \approx 18.53 cP$ (para $C_w = 70\%$), porque posee una cantidad importante de finos (56.85%) y un $d_{95} = 291 \mu m$.

Para el caso de los dos Concentrados de Cobre a una $C_w = 70\%$, se obtienen valores similares, tanto para el esfuerzo de fluencia ($\tau_y \leq 5 Pa$) como para la viscosidad plástica ($\eta \leq 12 cP$); esto puede ser debido a que presentan $d_{95} \leq 150 \mu m$, así como SG_s .

Estos parámetros, hacen que sea factible y “relativamente fácil” el transporte de este tipo de pulpas a altas concentraciones, ya que requerirán menores esfuerzos para entrar en movimiento.

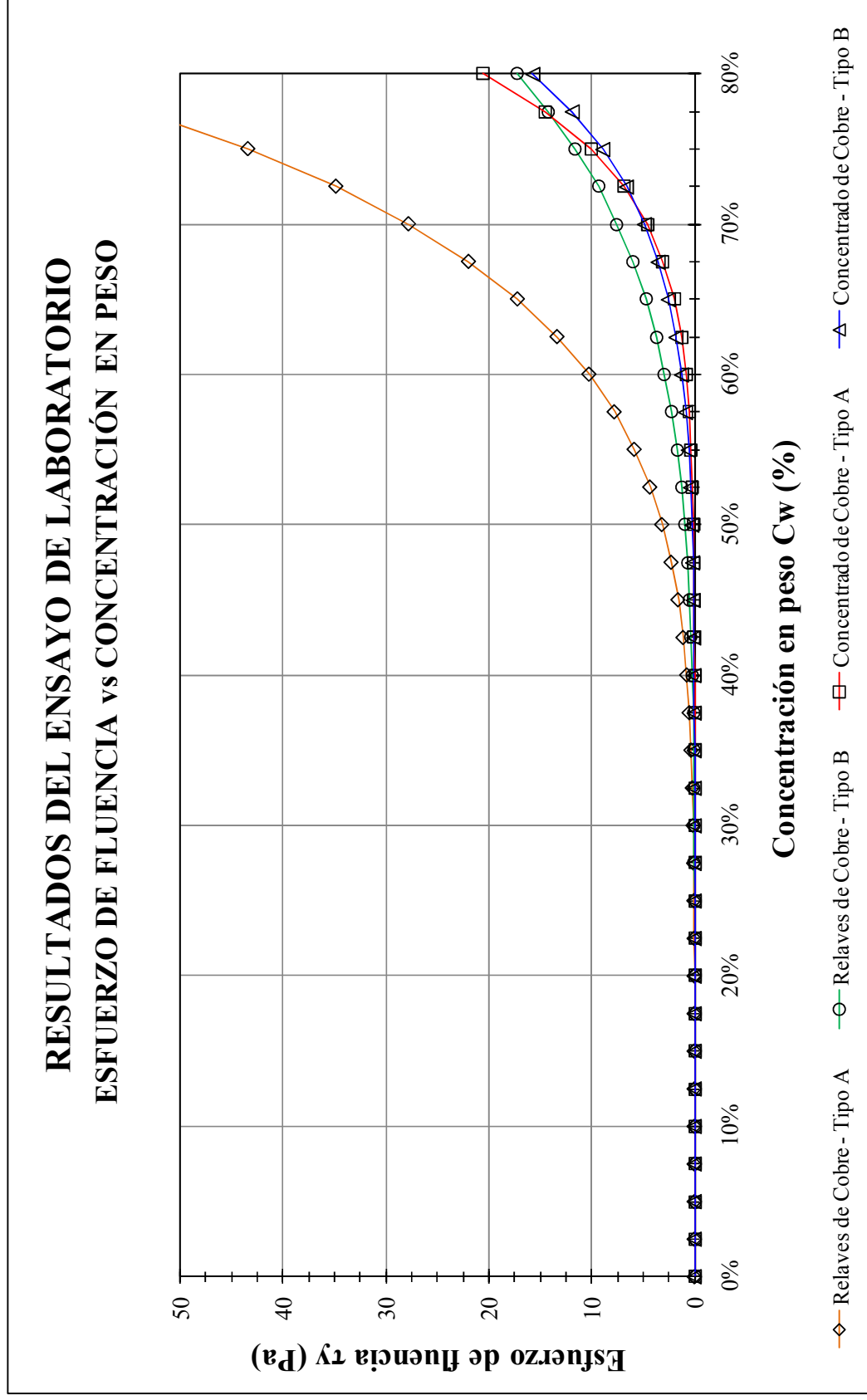


Figura 5.2: Resultados del ensayo de reología (Curvas τ_y vs C_w)

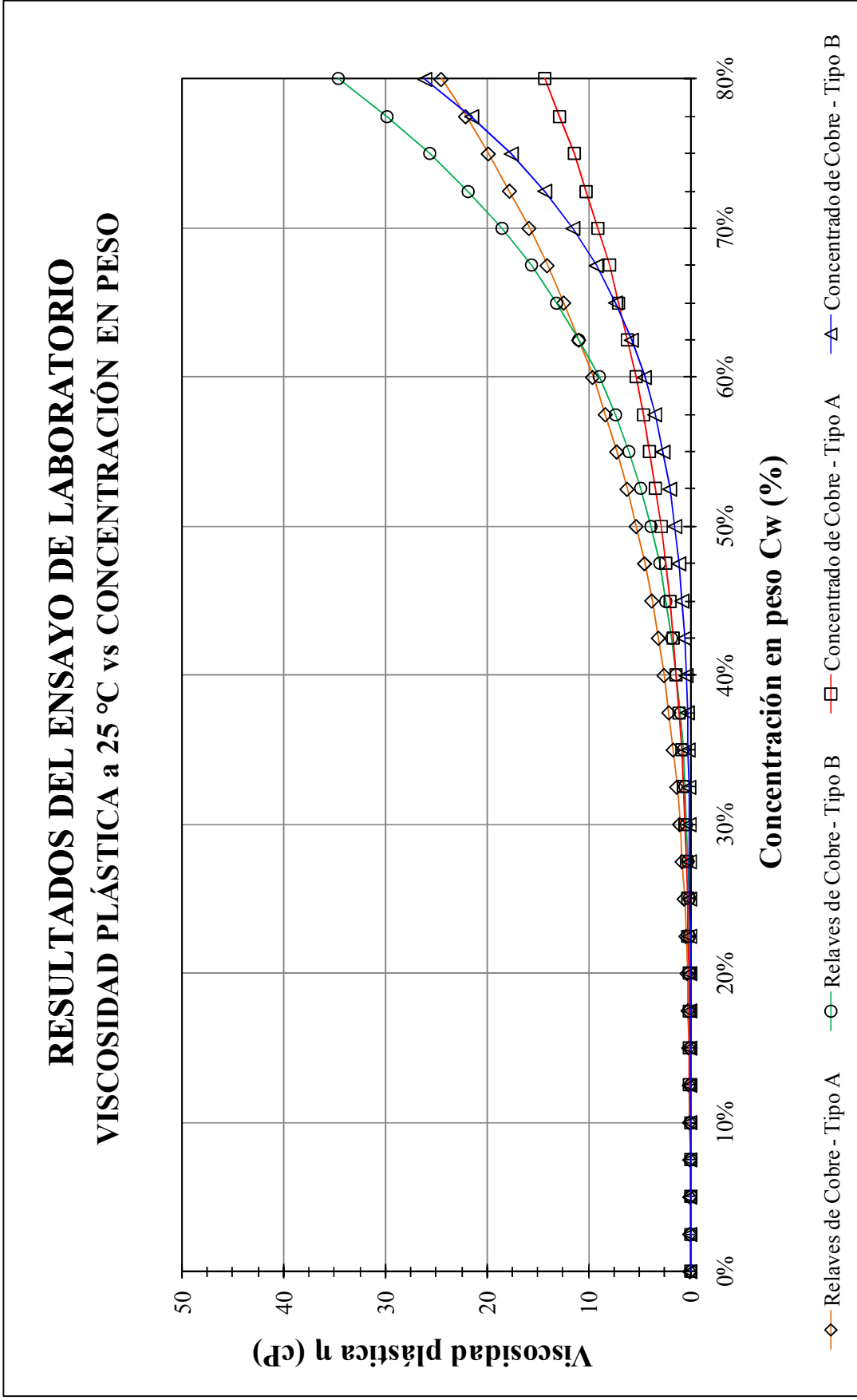


Figura 5.3: Resultados del ensayo de reología (Curvas η vs C_w)

5.5 Resumen

Este capítulo describe el análisis de datos y la discusión de resultados de los ensayos realizados a las cuatro muestras de pulpas minerales ensayadas. El primer ensayo fue el análisis de tamices (*PSD*), donde se indicó que la determinación de los diámetros característicos (d_{95} , d_{80} y d_{50}) es muy importante, ya que la gran mayoría de fórmulas que estiman las velocidades críticas de deposición y de transición viscosa requieren estos valores y además son indicadores de la distribución de las partículas sólidas, especialmente de las gruesas, que requieren mayores velocidades de flujo, porque si no se podrían depositar en una tubería.

El segundo ensayo realizado, es el de SG_s que también es dato para calcular las velocidades críticas de un flujo y además es un valor requerido para calcular las pérdidas friccionales para el transporte hidráulico a través de una tubería. Además, este valor es importante para calcular otros parámetros como ρ_m , C_v , C_w , V_r , etc. que son requeridos para la gran mayoría de procesos mineros e industriales.

Finalmente, se analizaron los resultados del ensayo reológico, que resulto en la estimación del esfuerzo de fluencia (τ_y) y de la viscosidad plástica (η), como valores necesarios para caracterizar una pulpa y poder efectuar un adecuado diseño de un sistema de transporte de pulpas. Para ello, se realizaron diversos modelos a fin de poder estimar τ_y y η en función de la C_w , que es un parámetro más usado para los diseñadores y para el personal de operaciones mineras.

Para las 4 muestras analizadas en el ensayo reológico, la **Tabla 5.4** presenta los resultados de la relación entre el τ_y para diferentes C_w y la **Tabla 5.5** presenta los resultados de la relación entre la η/μ para diferentes C_w . Con estas relaciones, fácilmente se puede determinar el τ_y y η (μ_{agua} a cierta T °C) de una pulpa mineral a diferentes C_w , como lo presenta la **Tabla 5.6**.

Además, las **Figura 5.2** y **Figura 5.3**, presentan las curvas de τ_y y η a diferentes C_w respectivamente, que muestran ambas la tendencia de aumentar significativamente los valores de τ_y y η , a partir de C_w mayores que 30 a 35%. Por lo tanto, se puede inferir que a C_w menores que 30 a 35%, las pulpas minerales ensayadas presentan valores mínimos de τ_y y η (ver **Tabla 5.6**), comportándose como fluidos Newtonianos.

SECCIÓN III

CAPÍTULO VI:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

6.1.1 Conclusión general

Como conclusión general del desarrollo de esta Tesis de investigación, es que es posible caracterizar una pulpa mineral, estimando sus parámetros físicos y reológicos de las cuatro pulpas minerales ensayadas a diferentes C_w .

6.1.2 Conclusiones específicas

Las conclusiones específicas de los resultados de los ensayos realizadas son los siguientes:

1. Del análisis de tamices (*PSD*), se ha podido determinar las curvas granulométricas y los diámetros característicos de las 4 pulpas minerales analizadas. Estos diámetros característicos son datos necesarios para la gran mayoría de fórmulas que estiman la velocidad crítica de deposición y de transición viscosa de una pulpa mineral a través de una tubería.

Además, de las curvas granulométricas, presentadas en el **ANEXO A**, se puede observar las proporciones de gruesos y finos que contienen las muestras ensayadas, lo cual indica si habrá más dificultad en asuntos de velocidad de deposición (más relacionado a las partículas gruesas y generalmente más presentes en los relaves mineros) o en asuntos de la viscosidad resultante de la pulpa (más relacionado a las partículas finas y generalmente presente más en los concentrados minerales).

2. Del análisis de gravedad específica de sólidos (SG_s), se ha podido determinar que los valores de SG_s obtenidos, están dentro de los valores típicos presentados. Similar con el ensayo de *PSD*, la SG_s es necesario para varias fórmulas que modelan flujos de pulpas y además es un valor muy importante

para determinar varios parámetros de los procesos mineros e industriales, como por ejemplo: la concentración de sólidos en peso y volumen (C_w y C_v), la densidad de la muestra (ρ_m) y la tasa de volumen (V_r), etc.

- Finalmente, del ensayo reológico, se ha podido determinar unas ecuaciones para poder estimar el esfuerzo de fluencia (τ_y) que indica el mínimo esfuerzo requerido para un fluido no-Newtoniano, antes de que un fluido empiece a moverse y la viscosidad plástica (η), como un indicador de la facilidad o dificultad para mover un fluido.

Todas estas ecuaciones obtenidas, presentan la relación a diferentes C_w y para las cuatro muestras ensayadas.

Este ensayo reológico presentado en los ANEXOS C, D, E y F para las 4 muestras analizadas, muestra los 3 o 4 reogramas resultantes de la medición con el viscosímetro Contraves Rheomat 15T (dependiendo de la muestra analizada), con los cuales se determina los coeficientes de las regresiones lineales, a fin de obtener las relaciones de τ_y y η/μ para diferentes C_w .

Con estas relaciones obtenidas, se estimaron los valores de τ_y y η para diferentes C_w y se validó el ensayo comparando los valores estimados con los valores medidos, presentando valores de diferencia mayoritariamente en el rango de $\pm 10\%$ para ambos parámetros, lo cual indica una buena modelación.

La **Tabla 6.1** presenta el resumen de los resultados de las cuatro muestras minerales ensayadas, donde se puede observar los valores principales obtenidos, así como las relaciones para estimar el τ_y y η/μ a diferentes C_w .

Tabla 6.1: Resumen de los resultados de las cuatro muestras minerales ensayadas

Parámetro	Símbolo	Relaves de Cobre - Tipo A	Relaves de Cobre - Tipo B	Concentrado de Cobre - Tipo A	Concentrado de Cobre - Tipo B
Diámetros característicos por análisis granulométrico (μm)	d_{95}	472	291	84	144
	d_{80}	283	179	52	73
	d_{50}	138	56	-	-
Gravedad específica de sólidos	SG_s	3.40	2.76	4.34	4.40
Esfuerzo de fluencia (Pa)	τ_y	$278.9 C_w^{6.4662}$	$68.4 C_w^{6.1804}$	$250.2 C_w^{11.1890}$	$112.5 C_w^{8.8031}$
Viscosidad reducida (cP)	η/μ	$56.898 C_w^{3.2651}$	$110.51 C_w^{4.6818}$	$34.348 C_w^{3.4164}$	$115.11 C_w^{6.1214}$

La **Tabla 6.1** es de mucha utilidad, ya que determina directamente o por medio de una relaciones, los principales parámetros físicos y reológicos para poder caracterizar una pulpa mineral de forma general para los dos tipos de muestras que son relaves y concentrados de cobre.

Con esta caracterización, se puede predecir el comportamiento del flujo de una pulpa mineral a través de una tubería, ya que se tiene los principales datos básicos para poder determinar las velocidades críticas de transporte y las pérdidas friccionales de transporte característicos, según cada pulpa mineral.

Como una conclusión final de los resultados del ensayo de reología, se observa que según las **Figura 5.2** y **Figura 5.3**, las curvas de τ_y y η muestran una tendencia de aumentar significativamente sus valores a partir de una C_w mayores de 30 a 35%.

Esto explica de porque es prácticamente “fácil” transportar pulpas minerales a bajas C_w , como si se tratase de fluidos Newtonianos (agua), pero a partir de C_w mayores a 30 o 35%, se requiere de “mayores esfuerzos” para transportar una pulpa, el cual puede ser aportado mediante una pendiente o desnivel (en el caso de hacer un transporte por gravedad) o mediante una bomba (en el caso de hacer un transporte por impulsión).

6.2 Recomendaciones

Dadas las características únicas de cada pulpa mineral, se requiere ensayar una muestra que sea representativa del universo de variantes, que puede tener una masa mineral que se desea transportar de forma hidráulica. Es necesario por lo tanto, una buena calidad de la muestra a ensayar, ya que las propiedades físicas y reológicas estimadas, servirán para el diseño de un sistema de transporte hidráulico de pulpas, que deberá de ser lo más flexible posible, para poder transportar pulpas de propiedades “aproximadas o similares” que las obtenidas en el ensayo de laboratorio.

Se requiere que se realicen más investigaciones de este tipo en nuestro país, a fin de conocer a más detalle las propiedades de una pulpa mineral a diferentes C_w , ya que el Perú es un país minero por las grandes reservas minerales que posee y que están actualmente en explotación o exploración.

La industria minera prefiere el transporte hidráulico de pulpas por su “relativamente” bajo costo, pero este transporte puede requerir de puntos de descarga a distancias de unos cuantos metros como de cientos de kilómetros.

Este tipo de investigaciones con pulpas minerales, se desarrollan constantemente alrededor del mundo; por lo tanto, debemos de estar técnicamente preparados para realizar este tipo de proyectos y no depender de tecnología extranjera como lo es en la actualidad.

6.3 Aporte de la tesis al estado del arte

Como aporte principal de esta tesis de investigación, es que se logró estimar los parámetros reológicos (τ_y y $\eta/\mu - \eta$) a diferentes C_w , obteniéndose fórmulas de la forma: $\tau_y = A C_w^B$ y $\eta/\mu = C C_w^D$ para poder caracterizar 4 pulpas minerales típicas, como son 2 relaves de cobre y 2 concentrados de cobre.

Además, esta caracterización de las pulpas minerales, significo poder definir rangos para los parámetros físicos (PSD y SG_s).

Todos estos resultados, definen los datos iniciales requeridos para el diseño de un sistema de transporte hidráulico de pulpas minerales, como son las velocidades críticas de deposición y de transición viscosa y principalmente las pérdidas friccionales por el paso de la pulpa a través de una tubería.

Otro aporte de esta tesis de investigación al estado del arte, es que presenta de forma secuencial y detallada, los procedimientos y/o metodologías para ensayar pulpas minerales, como son: la toma y registro de datos con los requisitos de la muestra, equipos, procedimientos de ensayos, metodología de los ensayos, etc. y el análisis de los resultados de los ensayos con son el reporte de resultados y el análisis e interpretación de los mismos.

Con esta información, se pueden replicar ensayos para pulpas minerales a fin de estimar sus parámetros físicos y reológicos más importantes y así poder caracterizar una pulpa mineral, como datos fundamentales para el diseño óptimo de un sistema de transporte hidráulico.

Además, se presentan dos ejemplos de diseño de sistemas de transportes de pulpas minerales (ver **ANEXO G**), el primero es un diseño basado en reología y el segundo es un diseño basado en el coeficiente de arrastre, ambos ejemplos dan resultados similares, pudiéndose aplicar cualquiera de ellos, según la información que se tenga disponible.

Con el *TDH* requerido para el transporte hidráulico, se podrá o seleccionar un sistema de impulsión para tener un flujo a presión o tener la suficiente carga estática para poder efectuar un transporte por gravedad.

6.4 Futuras investigaciones

Dado el hecho que existen muchas variables en el diseño de un sistema de transporte de pulpas minerales, se requiere de muchas investigaciones para conocer a más detalles estas variables y así poder diseñar un sistema más óptimo.

Entre las futuras investigaciones que se recomienda realizar, cada una independiente por sus resultados, metodología, variables, etc. pero que agrupadas dan un concepto válido acerca del diseño de cualquier tipo de sistemas de transporte de pulpas minerales, los cuales son requeridos en el Perú y en otras partes, donde la actividad minera es una principal fuente de divisas.

Podemos mencionar en grandes rasgos y áreas, las siguientes futuras investigaciones recomendadas como consecuencia de esta tesis:

- Investigaciones acerca de las velocidades críticas de transporte de pulpas minerales o industriales, como son la velocidad de deposición y la velocidad de transición viscosa, a fin de que la velocidad en la tubería las exceda y así, no tener problemas de atoros en la operación de un sistema de transporte.
- Investigaciones acerca de la abrasión y/o erosión de las partículas sólidas transportados a través de un sistema de transporte de pulpas, esto incluye determinar el desgaste producido por el paso de las partículas sólidas en tuberías, cajones, bombas, instrumentación, piezas especiales, etc.
- Investigaciones acerca de la corrosión de una pulpa mineral (especialmente del agua de procesos), hacia los elementos metálicos de un sistema de transporte, para tener una confiabilidad de que el sistema operara

adecuadamente a través de la vida útil o de diseño. Los elementos metálicos más expuestos a la corrosión son principalmente las tuberías y equipos; a fin de brindarles la protección catódica debida con sistemas como la corriente impresa, pintura epóxica, ánodos de sacrificio, etc.

- Investigaciones acerca de modelos matemáticos, que puedan predecir el comportamiento de una pulpa mineral con todas sus variables y principalmente para poder estimar las pérdidas friccionales generadas por el paso de una pulpa; con estos modelos, se pueden definir con más precisión los equipos y componentes necesarios que integrarán un sistema de transporte de pulpas minerales.

BIBLIOGRAFÍA

La siguiente bibliografía ha sido usada como referencias para el desarrollo de esta Tesis:

1. **A. Grzina – A. Roudnev & K.E. Burgess**, Weir slurry division, 2002
Slurry pumping manual
Warman International Ltd.
2. **ASME code for pressure piping**, 1994 edition
Slurry transportation piping systems – ASME B31.11
The American Society of Mechanical Engineers, New York
3. **AWWA – Manual of water supply practices**, 1998
Steel pipe – A guide for design and installation – AWWA Manual M11
American Water Works Association, Denver – USA
4. **Baha E. Abulnaga**, Mazdak International Inc., 2002
Slurry systems handbook
McGraw - Hill, New York
5. **B.E.A. Jacobs**, BHR Group, 2005
Design of slurry transport systems
Elsevier Applied Science, London & New York
6. **D.J. Hallbom & B. Klein**, PSI & UBC, 2005
Design curve diagram for yield plastic fluids
Proceeding of the 17th Hydrotransport, South Africa
7. **Donald John Hallbom**, Doctor of Philosophy Thesis, 2008
Pipe flow of homogeneous slurry
University of British Columbia, Vancouver

8. **Edward J. Wasp – John P. Kenny & Ramesh L. Gandhi**, 1977
Solid – Liquid flow slurry pipeline transportation
Trans Tech Publications, San Francisco
9. **E.J. Wasp – T.C. Aude – J.P. Kenny & R.H. Seiter**, Bechtel Inc., 1970
Deposition - transition velocities and spatial distribution of solids in slurry pipelines
Proceeding of the 1st International conference on the Hydraulic transport of solids in pipes, Coventry – England
10. **G. Addie & L. Whitlock**, GIW Industries Inc., 2000
Slurry pipeline design, testing and practice
Bob Hagler - Hagler Systems, Grovetown – USA
11. **Gebhard Schramm**, Thermo Haake Rheology, 2000
A practical approach to rheology and rheometry
Gebrueder Haake GmbH, Karlsruhe – Alemania
12. **J. Paul Tullis**, Doctoral Thesis, 2007
Slurry rheology of industrial minerals and its effects on wet ultra-fine gridding
Lulea University of Technology, Sweden
13. **J. Paul Tullis**, Utah State University, 1989
Hydraulic of pipelines
John Wiley & Sons Inc., New York
14. **Pipeline Division**, Pipeline Systems Incorporated, 2006
Technical Standards 2006: Slurry laboratory test procedures
Pipeline Systems Incorporated, Concord – USA
15. **Ranald V. Giles – Jack B. Evett & Cheng Liu**, 1994
Mecánica de los fluidos e hidráulica
McGraw – Hill / Interamericana de España S.A.U., España

16. **T.C. Aude – N.T. Cowper – T.L. Thompson & E.J. Wasp**, Bechtel Inc., 1971
Slurry piping systems: Trends
Chemical Engineering – A McGraw-Hill publication, New York
17. **Victor L. Streeter & E. Benjamin Wylie**, University of Michigan, 1988
Mecánica de los fluidos
McGraw – Hill / Interamericana de México S.A., México
18. **Warman International Inc.**, 1994
Warman slurry pumping handbook
Warman International Inc., Wisconsin - USA
19. **Warman International Ltd.**, 2000
Warman slurry pumping handbook
Warman International Ltd., Australasian version