

UNIDAD 3 — MANEJO Y DISPOSICIÓN DE RELAVES

Christian Ihle

Departamento de Ingeniería de Minas
UNIVERSIDAD DE CHILE

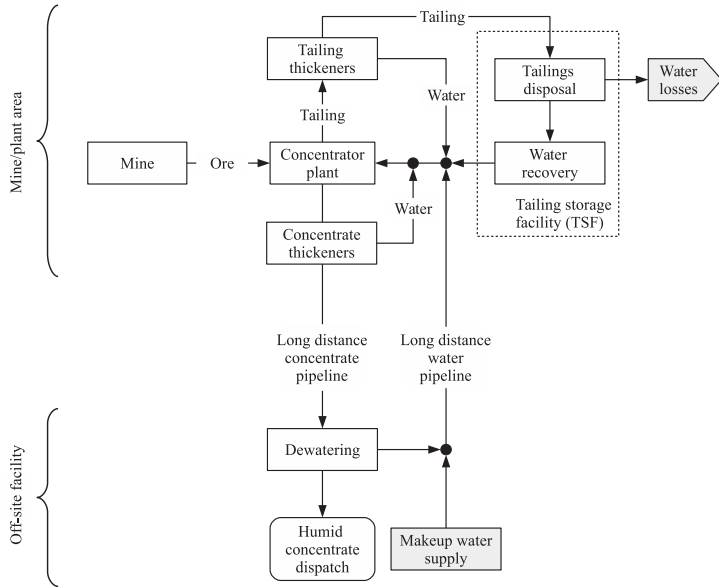
MI5170 — Agua y Relaves

Abril de 2023

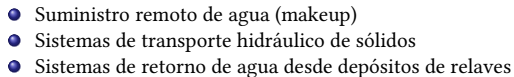


- 1 El problema hidro-energético
- 2 Relaciones generales de balance de masa
- 3 Sistemas gravitacionales
- 4 Sistemas presurizados
 - Características generales
 - Balance de energía
 - Impulsión
 - Bombas centrífugas
 - Bombas de desplazamiento positivo
 - Flujos transientes
- 5 Flujos de pulpas
 - Características generales
 - Balance de energía
 - Impulsión
 - Tipos de flujo según lecho
 - Rango de operación
- 6 Correas transportadoras
- 7 Descarga de relave en depósito
- 8 Referencias

Ciclo de agua en plantas concentradoras



(Ihle and Kracht, 2018)



Definiciones

Concentración en peso (C_p):

$$C_p = \frac{\text{masa de sólido}}{\text{masa total}} \quad (1)$$

Concentración en volumen (C_V):

$$C_V = \frac{\text{volumen de sólido}}{\text{volumen total}} \quad (2)$$

Tonelaje o *throughput* (G):

$$G = \frac{\text{masa de sólido}}{\text{tiempo}} \quad (3)$$

Caudal (Q):

$$Q = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \quad (4)$$

Gravedad específica de sólidos (S):

$$S = \frac{\text{densidad de sólidos}}{\text{densidad el agua (referencia)}} \quad (5)$$

Índice de vacíos en relaves descargados en depósito (e):

$$e = \frac{\text{volumen de huecos}}{\text{volumen de sólidos}} \quad (6)$$

$$= \frac{1}{C_V^*} - 1$$

 $(C_V^*$ es la concentración en volumen sólo en la zona de sedimento)**Relación entre C_V y C_p :**

$$C_V = \frac{C_p}{C_p + S(1 - C_p)} \quad (7)$$

Relaciones derivadas

Relación entre flujo y tonelaje:

$$G = \rho_s Q C_V \quad (8)$$

$$= \rho Q C_p \quad (9)$$

(ρ_s = densidad de sólidos)

Capacidad de un sistema de transporte de sólidos:

$$G_c = G\lambda, \quad (10)$$

donde λ es el factor de utilización.

Densidad de la mezcla:

$$\rho = \rho_s \left(C_V + \frac{1 - C_V}{S} \right) \quad (11)$$

$$= \frac{\rho_s}{C_p + S(1 - C_p)} \quad (12)$$

Porción de agua en el flujo de relave (Q_w):

$$Q_w = (1 - C_V)Q \quad (13)$$

$$= \left(\frac{1}{C_V} - 1 \right) \frac{G}{\rho_s} \quad (14)$$

Elementos distintivos de sistemas gravitacionales

- En general bajas pendientes
- No son aptos para transporte de mezclas a altas concentraciones
- No requieren sistemas de impulsión
- Compatibles con largas distancias (al igual que en el caso de sistemas presurizados)



Elementos distintivos de sistemas presurizados

- Agua o partículas
- Compatibles con pendientes positivas o negativas
- En general requieren sistemas de impulsión
- Compatibles con largas distancias



Energía

$$B = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}, \quad (15)$$

$$\Lambda_k = k \frac{v^2}{2g} \quad (\text{pérdidas singulares}) \quad (16)$$

$$\Lambda_f = \frac{fL}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{pérdidas regulares}), \quad (17)$$

Bombas y turbinas

$$P_b = \frac{\gamma Q \Delta h}{\eta_b}, \quad (18)$$

$$P_t = \eta_t \gamma Q \Delta h, \quad (19)$$

$$B_2 = B_1 + \frac{\eta_b P_b}{\gamma Q} - \frac{P_t}{\eta_t \gamma Q} - \sum_j \Lambda_j. \quad (20)$$

Gradiente hidráulico (HG)

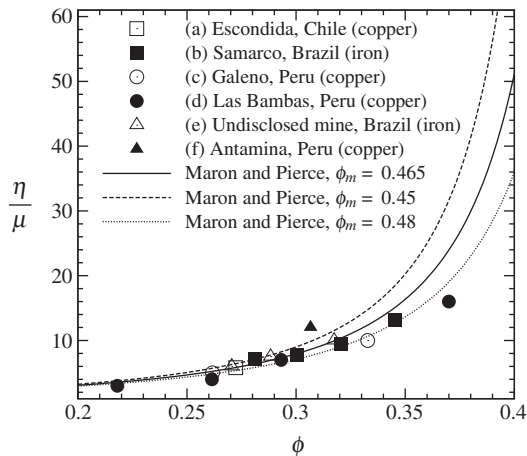
1 Pérdidas singulares despreciables

2 Altura de velocidad despreciable

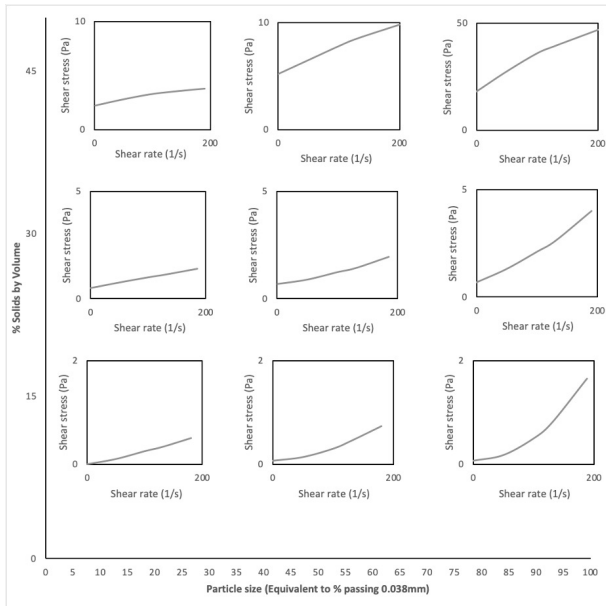
$$HG = \frac{B_1 - B_2}{L} \approx \frac{fL}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (21)$$

En este caso se tiene que $f = F(Re, He)$.

Viscosidad plástica

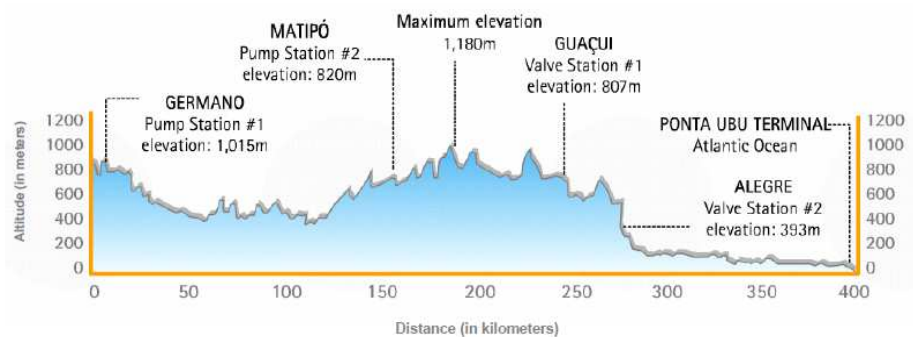


Tendencia general (reología)



(Shi and Napier-Munn, 1996)

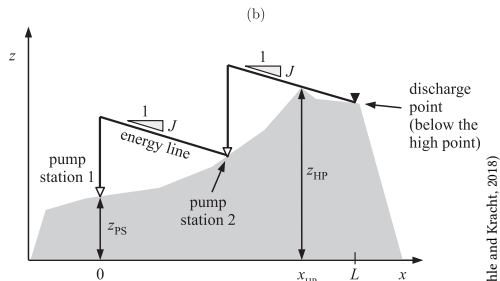
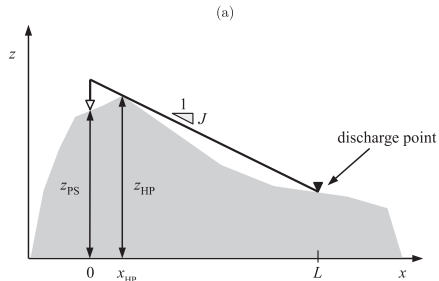
Topografía



Restricciones en sistemas de larga distancia

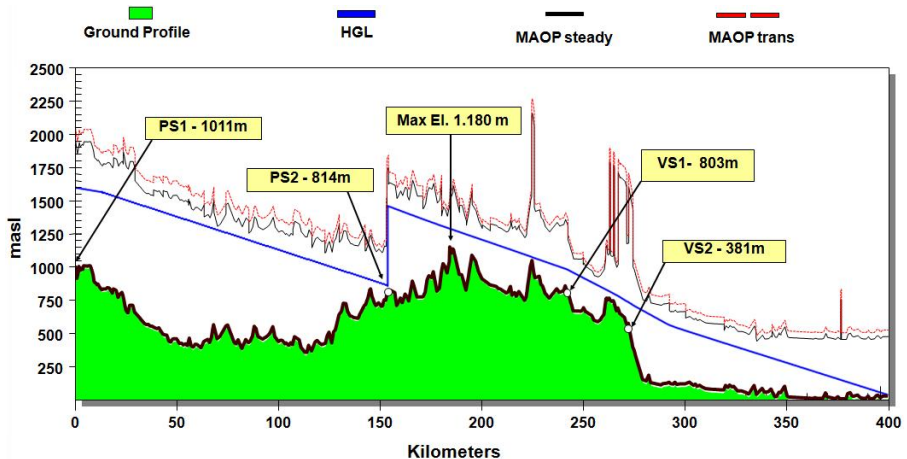
Puntos altos Evitar que presión de línea llegue a la de vapor ($\approx 2,9 \text{ kPa}$)

Máximas presiones en bombas Requiere instalar sistemas de impulsión en serie



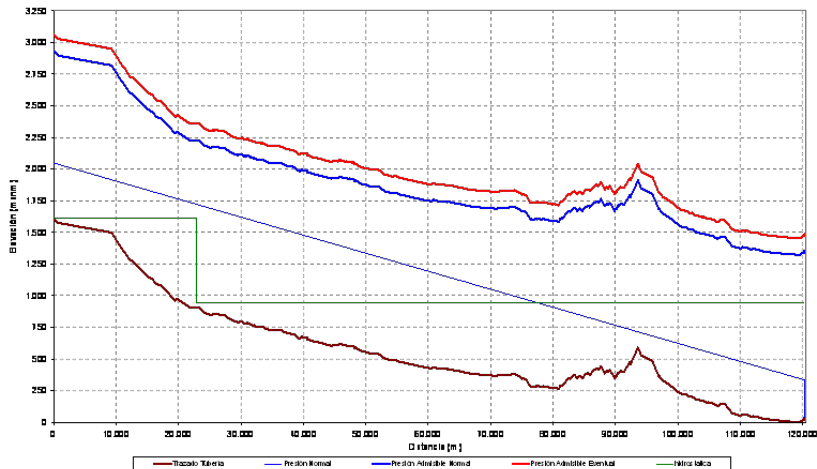
(Ihle and Kracht, 2018)

Consumo de energía



¿Cuáles son las presiones que debe resistir el sistema detenido?

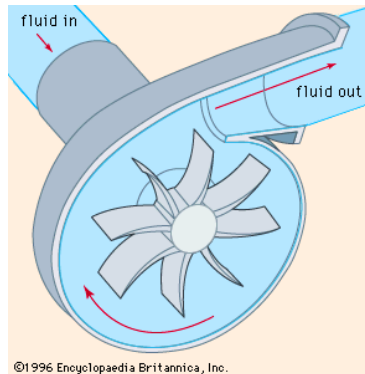
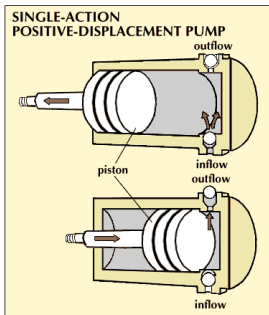
Gradiente Hidráulico Sistema de Transporte de Concentrado



Bombas

Cuando las condiciones topográficas no son adecuadas (pendientes en contra del flujo, distancias muy grandes, etc.), se requiere mover la pulpa con un sistema de bombeo.

- 1 Bombas centrífugas
- 2 Bombas de desplazamiento positivo



Potencia y eficiencia

$$P = \frac{\rho g Q \Delta h}{\eta}, \quad (22)$$

con

$$\eta = \eta_m \eta_{HY} \eta_v. \quad (23)$$

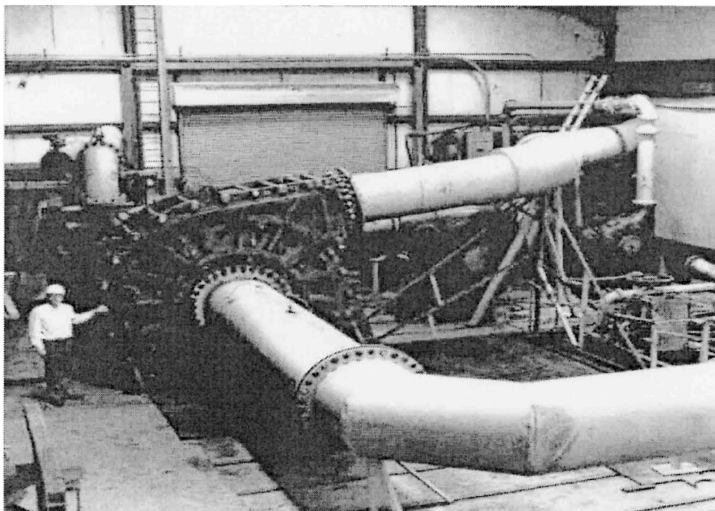
η_m (eficiencia mecánica): Razón entre potencia al eje y potencia mecánica teórica (diferencias por rozamiento entre componentes mecánicos).

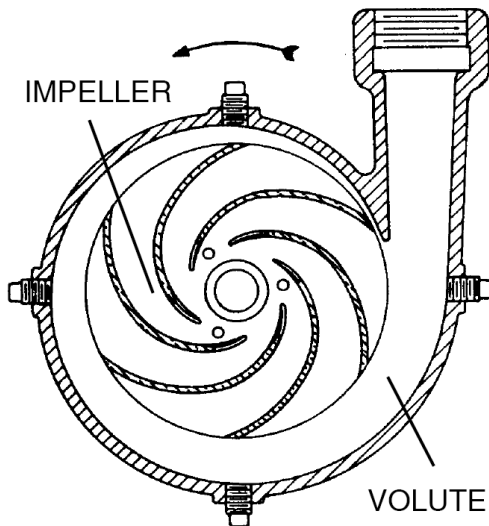
η_{HY} (eficiencia hidráulica): Razón entre altura de descarga real y altura que debe elevar (diferencias por pérdidas de presión en componentes).

η_v (eficiencia volumétrica): Razón entre volumen real desplazado y volumen máximo posible (diferencias por fugas).

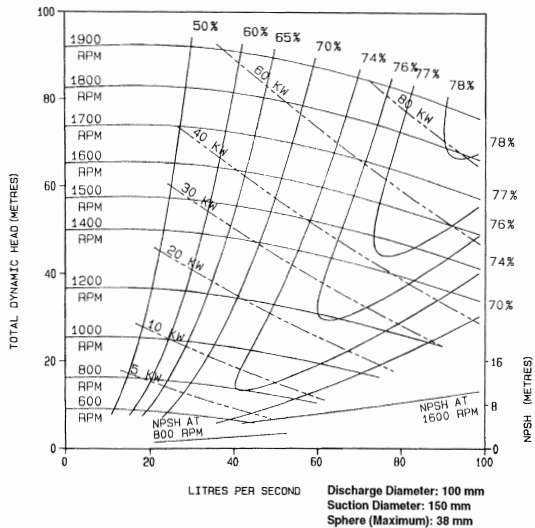
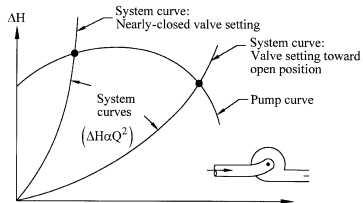
Tipos de impulsión

Tipo	Presión	Caudal	Costo
Centrífuga	baja	alto	bajo
Desp. positivo	alta	bajo	alto

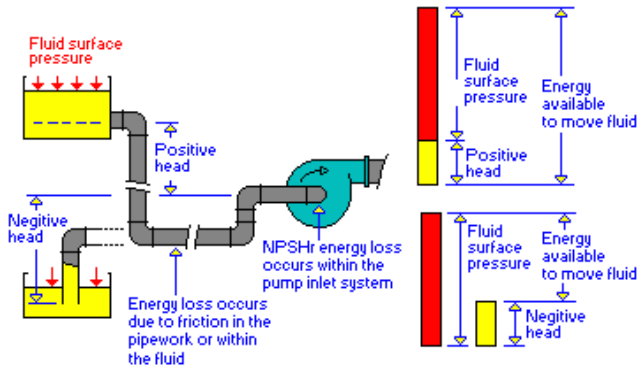




Curvas características de bombas



NPSH: Net Positive Suction Head



NPSH

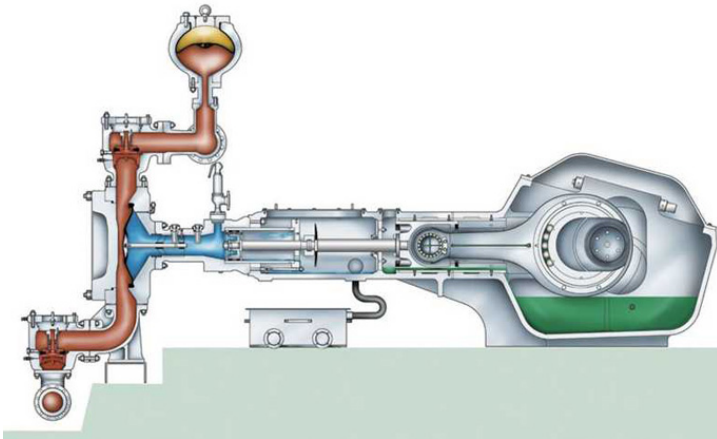
- $NPSH_r$ Corresponde a la presión requerida por la bomba justo antes de su entrada. Este valor es propio de cada bomba a condiciones de operación dadas.
- $NPSH_a$ Corresponde a la presión disponible justo antes de la entrada a la bomba. Esto es, la presión que se le puede quitar al líquido transportado sin que se produzca cavitación. Este valor se calcula y depende de la posición de la bomba en el sistema de transporte.

Se requiere:

$$NPSH_r < NPSH_a \quad (24)$$

Bombas de desplazamiento positivo





- 1 Permiten imponer el caudal
- 2 Funcionan como *válvulas* (desconectan succión de descarga)
- 3 Pueden levantar más presión (pero mucho menos caudal) que las bombas centrífugas
- 4 Pueden impulsar fluidos con altos esfuerzos de fluencia
- 5 Su operación suele ser pulsátil

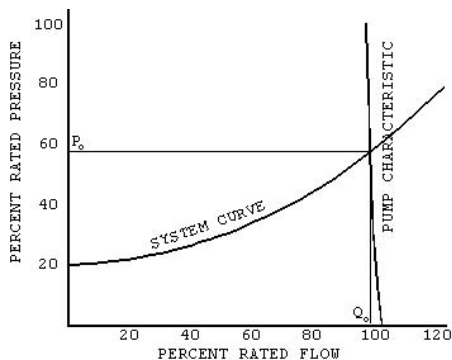


Fig. 2-2. Pump Characteristic and System Curve

Flujos transientes

Los flujos transientes se producen cuando hay variaciones de caudal debido al accionamiento de algún mecanismo de regulación (válvulas, bombas, turbinas).

Los flujos transientes ocasionan:

- 1 Cambios de presión a lo largo del sistema de transporte que podrían hacer colapsar la tubería
- 2 Problemas de ruidos excesivo, fatiga de los materiales, etc.
- 3 En el caso de canales pueden producir cambios en la velocidad y altura de escurrimiento (ej. olas y ondas rodantes)

Golpe de ariete:

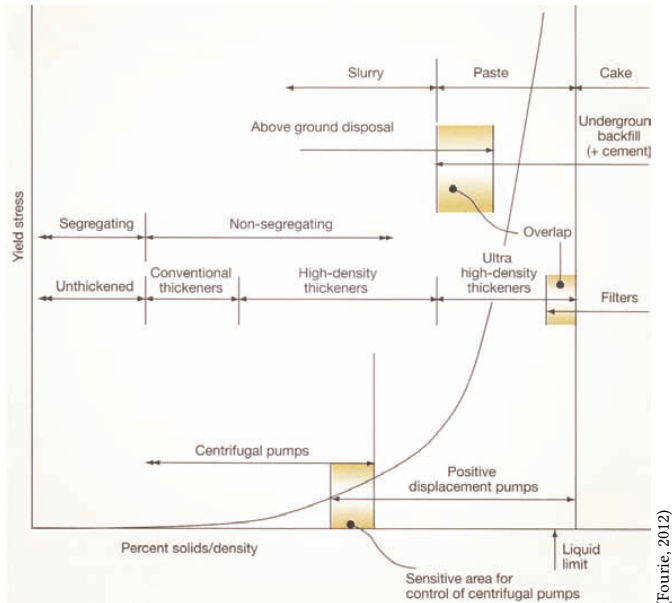
En el caso de tuberías, los flujos transientes tienen el nombre genérico de *golpe de ariete*, estos pueden provocar cambios de presiones muy altos. Según la operación pueden ocurrir sobrepresiones o subpresiones.

Características generales

- En general, segregan
- Mayor viscosidad aparente que el agua
- Imponen restricciones a sistemas de impulsión (bombas y tuberías)



Relación lodo-condición de transporte



Práctica común

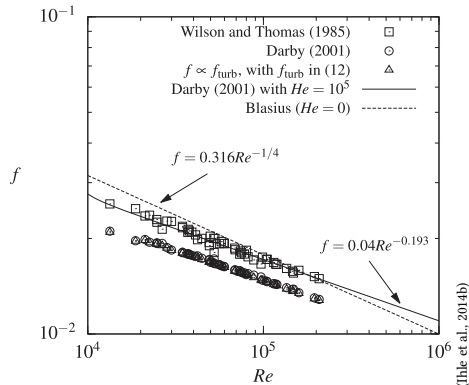
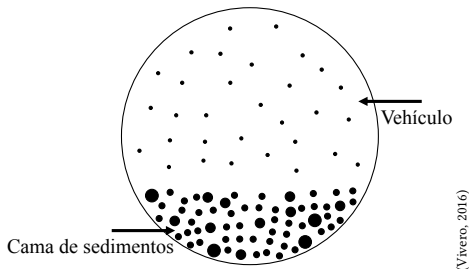
- Similar al caso homogéneo
- En sistemas de larga distancia sólo se considera la cota piezométrica

Pérdidas de energía (factor de fricción f , régimen turbulento)

Dos aproximaciones

Fluido homogéneo (no newtoniano) Cálculo iterativo. Ejemplos: Wilson and Thomas (1985), Thomas and Wilson (1987), Chilton and Stainsby (1998), Darby (2001), etc.

Sistema heterogéneo Cama + vehículo (Wasp et al., 1977; Kaushal and Tomita, 2002; Vivero, 2016)



Corrección de altura de impulsión (derrateo)

Los catálogos de bombas de pulpa presentan las curvas de funcionamiento para agua pura por lo cual la altura de pulpa debe ser expresada en su equivalente de agua. Para las bombas centrífugas se considera lo siguiente:

$$H_w = \frac{H_p}{HR} \quad (29)$$

$$= \frac{H_T}{HR \times C_s} \quad (30)$$

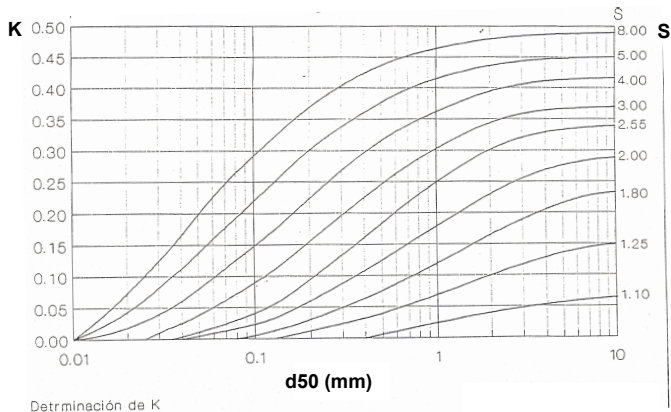
Para determinar HR se pueden utilizar diversos métodos empíricos. Además:

H_T = altura de impulsión en m.c.p (metros columna de pulpa)

HR = factor de corrección por efecto de sólidos en la pulpa

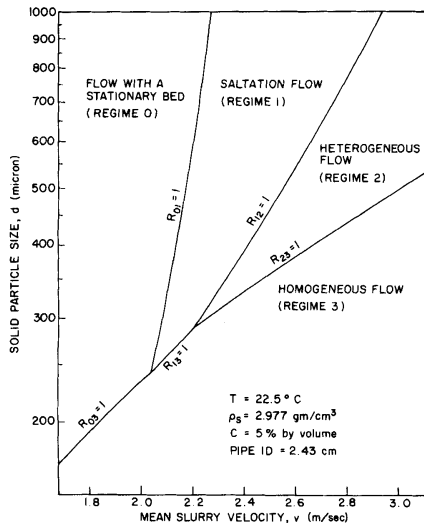
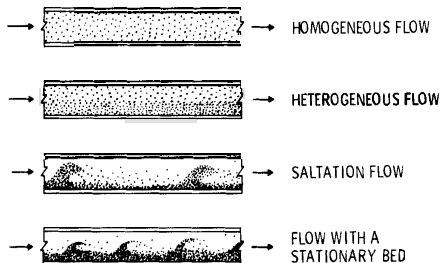
C_s = coeficiente de seguridad (0.9 y 0.7, sin/con espuma)

Ejemplo: Mac Elvain & Cave (Wilson et al., 2006)

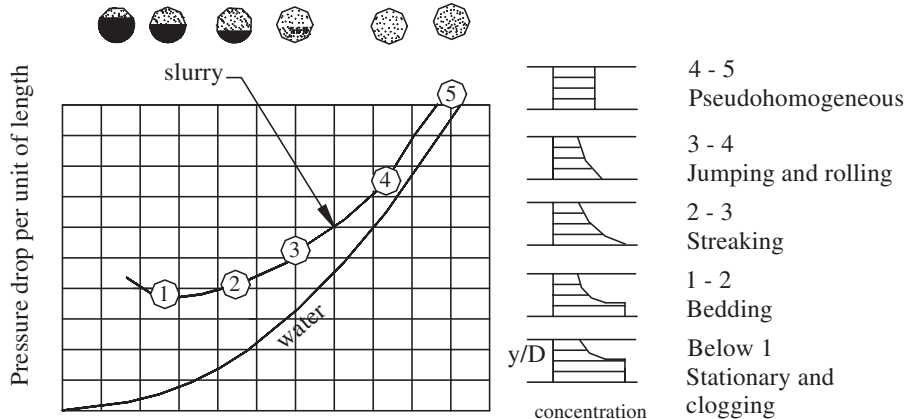


$$HR = 1 - \frac{KC_V}{20}. \quad (31)$$

Formación de lecho (Turian and Yuan, 1977)

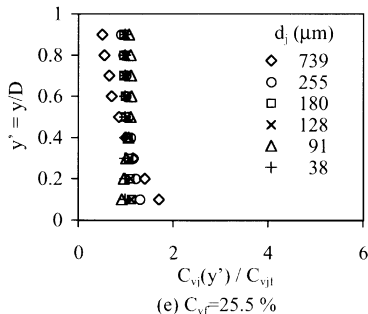
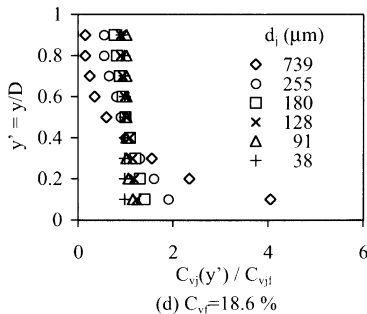


Implicancias en las pérdidas de carga



(Abulnaga, 2021)

Ejemplo (relaves de zinc, 2 m/s)



(Kaushal and Tomita, 2002)

El concepto de velocidad de depósito

(Durand, 1953)

$$v_c \sim \sqrt{2gD \left(\frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right)}$$

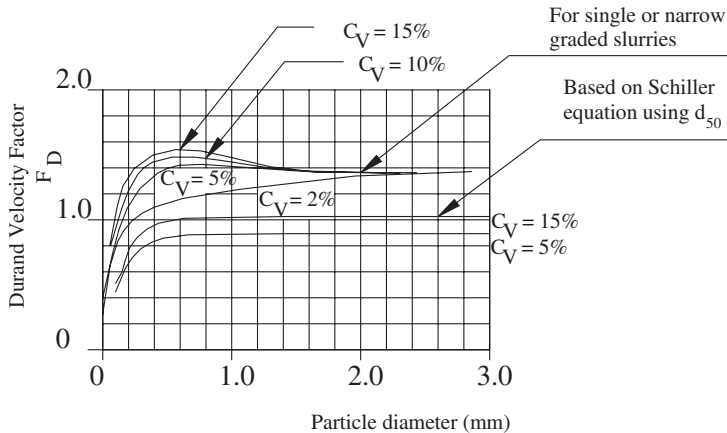
$$\approx F_L \sqrt{2gD \left(\frac{\rho_s}{\rho_l} - 1 \right)}$$

Más una serie de variaciones empíricas. No tiene en cuenta el efecto de la concentración. Por ejemplo (Poloski et al. 2010):

$$v_c = 0.59 \sqrt{gD(S-1)} Ar^{0.15}; \quad Ar = \frac{4}{3} \frac{gd_{50}^3 (S-1) \rho_m^2}{\mu_f^2}, \quad (32)$$

con ρ_m , densidad media de la pulpa y μ_f la viscosidad de la misma.

F_L (principalmente partículas gruesas)



(Abulnaga, 2021)

F_L (partículas finas) (1/2)

Poloski et al. (2010)

Table 1. Slurry physical properties from the deposition tests

Test configuration	A	B	C	D	E
Mass per unit volume (g/L)					
Particles	245	741	327	185	236
Water	901	906	912	925	969
Volume fraction (vol%)					
Particles	9.8%	9.3%	8.7%	7.4%	3.0%
Water	90.2%	90.7%	91.3%	92.6%	97.0%
Mass fraction (mass%)					
Particles	21.4%	45.0%	26.4%	16.6%	19.6%
Water	78.6%	55.0%	73.6%	83.4%	80.4%
Component density (kg/L)					
Particles	2.50	7.95	3.77	2.50	7.95
Water	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Bulk	1.15	1.65	1.24	1.11	1.21
Particle size distribution (μm)					
d_5	1.6	7.2	30.9	91.0	55.2
d_{10}	2.8	8.4	38.2	97.4	68.1
d_{20}	3.8	9.8	49.7	106.4	90.8
d_{30}	4.6	11.2	56.7	113.1	112.0
d_{40}	5.4	13.1	62.4	119.4	127.9
d_{50}	6.2	15.1	67.6	125.9	140.3
d_{60}	7.2	17.3	73.2	132.8	151.3
d_{70}	8.9	20.4	79.9	140.6	161.9
d_{80}	10.7	24.7	89.0	150.7	173.8
d_{90}	12.5	31.4	107.3	167.0	190.6
d_{95}	14.4	37.7	129.5	182.3	203.9
Measured carrier-fluid viscosity (cP)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

F_L (partículas finas) (2/2)

Poloski et al. (2010). Ver también Thomas (1979) y Parzonka et al. (1981).

Table 2. Compilation of pipeline deposition velocity literature data with Archimedes numbers generally less than 80

System	D_p (μm)	Percentage smaller than 75 μm	ρ_s (g/cm ³)	D (mm)	ρ (g/cm ³)	Deposition velocity, V_c (ft/s)	Fr	Ar
A	6	100	2.5	77.9	1.0	1.2	0.4	0.005
B	15	100	8.0	77.9	1.0	2.5	0.4	0.5
C	68	65	3.8	77.9	1.0	3.0	0.7	12
D	126	<5	2.5	77.9	1.0	4.0	1.2	41
E	140	15	8.0	77.9	1.0	8.0	1.2	287
F ^a	140	16	2.7	207	1.0	7.6	1.2	61
G ^a	140	16	2.7	100	1.0	4.7	1.1	61
H ^a	75	50	4.0	207	1.0	8.9	1.1	17
I ^a	70	55	4.0	149	1.0	7.9	1.1	13
J ^a	90	45	3.0	207	1.0	9.1	1.4	19
K ^a	60	80	3.1	149	1.0	6.3	1.1	6
L ^a	50	72	5.3	52	1.0	4.4	0.9	6
M ^a	50	77	5.3	209	1.0	6.6	0.7	6
N ^a	50	77	5.3	263	1.0	6.9	0.6	6
O ^b	55	90	7.5	25.4	0.8	4.2	0.9	11
P ^b	17	100	2.7	18.9	1.0	1.4	0.8	0.1
Q ^b	26	100	2.7	18.9	1.0	1.5	0.8	0.4
R ^b	15	100	2.8	50	1.0	1.3	0.4	0.1
S ^b	3.7	100	4.5	50	1.0	1.6	0.4	0.002
T ^b	2.3	100	11.3	50	1.0	2.3	0.3	0.002
U ^b	4.8	100	19.4	50	1.0	3.0	0.3	0.03

^a Parzonka et al. (1981).

^b Thomas (1979).

Efecto del ángulo de inclinación

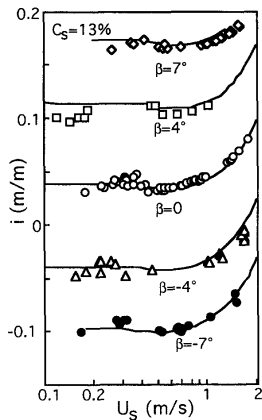


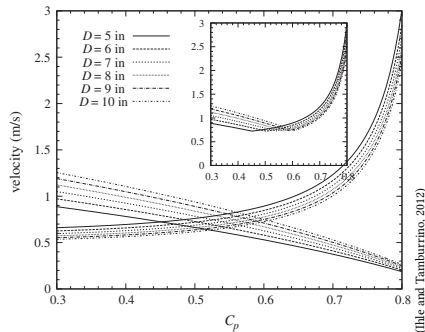
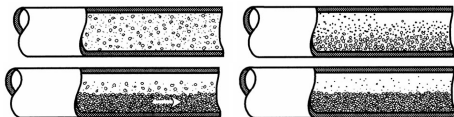
Figure 4. Effect of angle of inclination on pressure drop; $\rho_s = 1240 \text{ kg/m}^3$, $d_p = 3 \text{ mm}$, $D = 50 \text{ mm}$. Symbols—data, lines—model.

(Doron et al., 1997)

Consideraciones de diseño

Tubería de diámetro dado

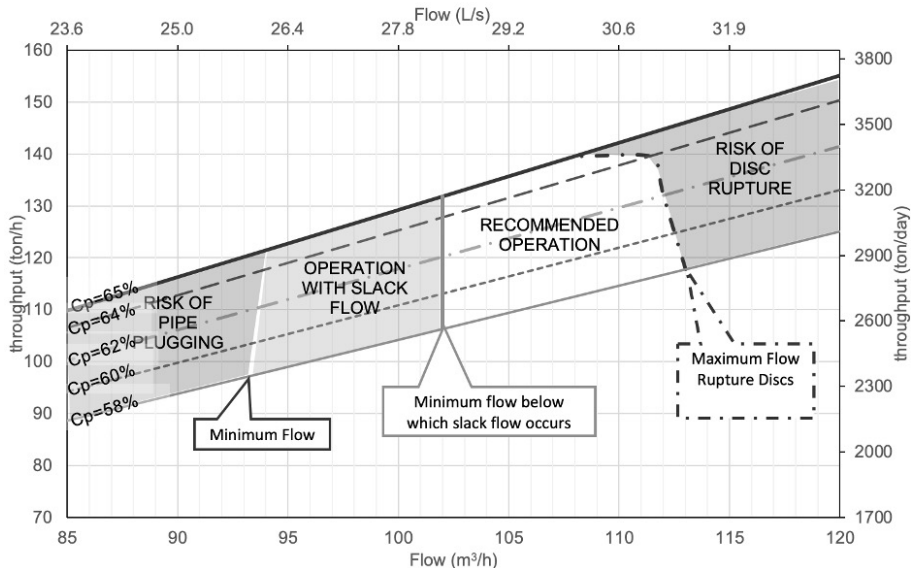
- 1 Ángulo de inclinación del tubo
- 2 Número de Reynolds mayor que el crítico (depende del modelo reológico)
- 3 Velocidad mayor que la velocidad de depósito
- 4 Incluir sobrepresiones en re-partidas de sistema
- 5 Presiones mayor que la presión de vapor



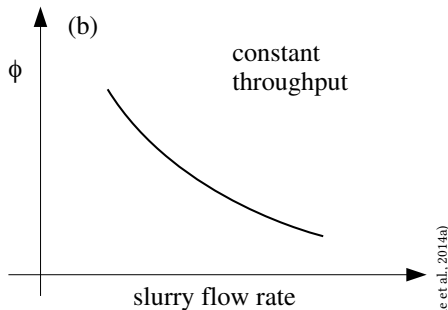
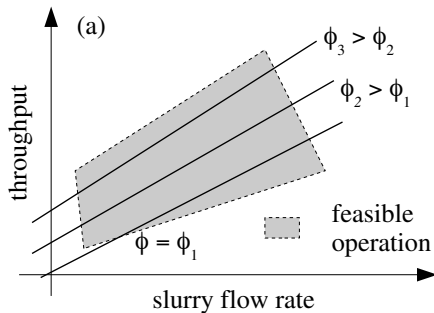
(curvas decrecientes: Reynolds crítico; curvas crecientes: vel. depósito)

Rango de operación

Resultado de la suma de las restricciones anteriores



Rango de operación



(Ihle et al., 2014a)

¿En qué punto es mejor operar?

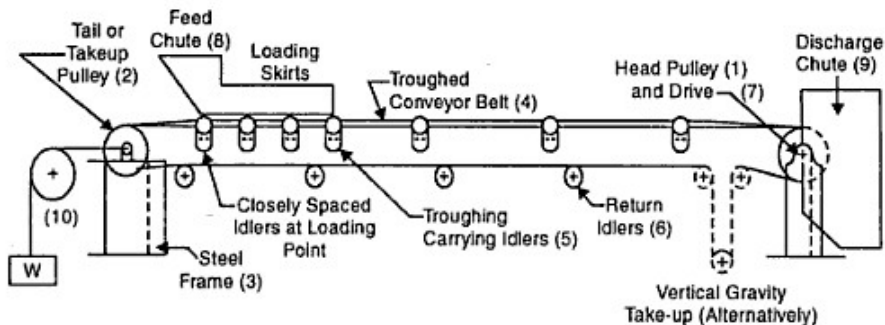
Correas transportadoras

Características generales

- Aptas para material seco
- Velocidades
 $\sim 1,5 \text{ m/s} - 3 \text{ m/s}$
- Altas capacidades
($> 100 \text{ ktpd}$ si es necesario)
- CAPEX alto
- Problemas con humedades altas



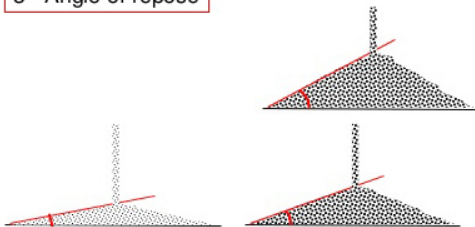
Componentes



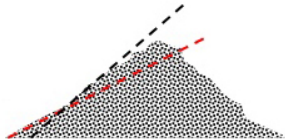
Ángulo de reposo (θ_r) y sobrecarga (θ_s)

Típicamente $\theta_s \approx \theta_r - 10\pi/180$

3- Angle of repose



4- Angle of surcharge



Contexto normativo

Chile: DS248

Internacional: GISTM

Elementos principales

- 1 Separación (cyclonaje)
- 2 Descarga en muro (caso tranque)
 - Transporte de arena
 - Descarga en muro
 - Infiltración y captación de agua
- 3 Descarga en cubeta (lamas)
 - Flujo gravitacional
 - Proceso de separación
 - Formación de laguna



Descarga en muro

- Arenas desde underflow de ciclones
- Transporte hidráulico muro abajo
- Infiltración hacia drenes



Descarga en cubeta (convencionales)

- Descarga desde muro hacia cubeta
- Formación de laguna en extremo opuesto
- Necesidad de re-localización de puntos de descarga





Laguna de aguas claras



- Abulnaga, B.E., 2021. Slurry systems handbook. 2 ed., McGraw-Hill, New York.
- Chilton, R.A., Stainsby, R., 1998. Pressure loss equations for laminar and turbulent non-newtonian pipe flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 124, 522–529.
- Darby, R., 2001. Chemical engineering fluid mechanics. CRC.
- Doron, P., Simkhis, M., Barnea, D., 1997. Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow* 23, 313–323. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301932297809469>.
- Fourie, A.B., 2012. Perceived and realized benefits of paste and thickened tailings for surface deposition. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 112, 919–926.
- Ihle, C., Tamburrino, A., 2012. Variables affecting energy efficiency in turbulent ore concentrate pipeline transport. *Minerals Engineering* 39. doi:10.1016/j.mineng.2012.07.017.
- Ihle, C., Tamburrino, A., Montserrat, S., 2014a. Computational modeling for efficient long distance ore transport using pipelines. *Minerals Engineering* 63. doi:10.1016/j.mineng.2014.01.002.
- Ihle, C., Tamburrino, A., Montserrat, S., 2014b. Identifying the relative importance of energy and water costs in hydraulic transport systems through a combined physics-and cost-based indicator. *Journal of Cleaner Production* 84. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.070.

- Ihle, C.F., Kracht, W., 2018. The relevance of water recirculation in large scale mineral processing plants with a remote water supply. *Journal of Cleaner Production* 177, 34–51.
- Kaushal, D., Tomita, Y., 2002. Solids concentration profiles and pressure drop in pipeline flow of multisized particulate slurries. *International Journal of Multiphase Flow* 28, 1697–1717. doi:10.1016/S0301-9322(02)00047-2.
- Parzonka, W., Kenchington, J.M., Charles, M.E., 1981. Hydrotransport of solids in horizontal pipes: effects of solids concentration and particle size on the deposit velocity. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 59, 291–296.
- Poloski, A.P., Etchells, A.W., Chun, J., Adkins, H.E., Casella, A.M., Minette, M.J., Yokuda, S.T., 2010. A pipeline transport correlation for slurries with small but dense particles. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 88, 182–189. doi:10.1002/cjce.20260.
- Shi, F.N., Napier-Munn, T.J., 1996. A model for slurry rheology. *International Journal of Mineral Processing* 47, 103–123. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0301751695001018>.
- Thomas, A.D., 1979. Predicting the deposit velocity for horizontal turbulent pipe flow of slurries. *International Journal of Multiphase Flow* 5, 113–129.
- Thomas, A.D., Wilson, K.C., 1987. New analysis of non-newtonian turbulent flow and yield-power-law fluids. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 65, 335–338. doi:10.1002/cjce.5450650221.
- Turian, R.M., Yuan, T.F., 1977. Flow of slurries in pipelines. *AIChE Journal* 23, 232–243. doi:10.1002/aic.690230305/abstract.

- Vivero, P.A., 2016. Recopilación bibliográfica de métodos de estimación de pérdida de carga de mezclas sólido-líquido sedimentables: evaluación método de wasp con mediciones en concentrado de bauxita .
- Wasp, E.J., Kenny, J.P., Gandhi, R.L., 1977. Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation. Trans Tech Publications, Clausthal.
- Wilson, K.C., Addie, G.R., Sellgren, A., Clift, R., 2006. Slurry transport using centrifugal pumps. Chapman and Hall, London.
- Wilson, K.C., Thomas, A.D., 1985. A new analysis of the turbulent flow of non-newtonian fluids. Canadian Journal of Chemical Engineering 63, 539–546.
doi:10.1002/cjce.5450630403.

UNIDAD 3 — MANEJO Y DISPOSICIÓN DE RELAVES

Christian Ihle

Departamento de Ingeniería de Minas
UNIVERSIDAD DE CHILE

MI5170 — Agua y Relaves

Abril de 2023

