

SISTEMA DE BOMBEO EN MINERÍA

Richard Mera





Richard Mera

*Jefe Corporativo Electromecánico
de Relaves en MINSUR*

- Ingeniero Mecánico (UNI)
- Ingeniero Mecánico Electricista (UNI)
- Dipl. Ingeniería de Tuberías (PUCP)
- Dipl. Ingeniería de Relaves (U.CHILE)
- MSc (C) Ingeniería Mecánica Turbomáquinas (UNSA)
- MEng (C) Hidráulica Computacional (UNMSM)



<https://www.linkedin.com/in/richardmera/>



rmerahuerta@gmail.com



<https://wa.me/51973988554>

Experiencia Laboral:



Formación Académica:



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
INGENIERÍA**



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**



UNIVERSIDAD
DE CHILE



UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

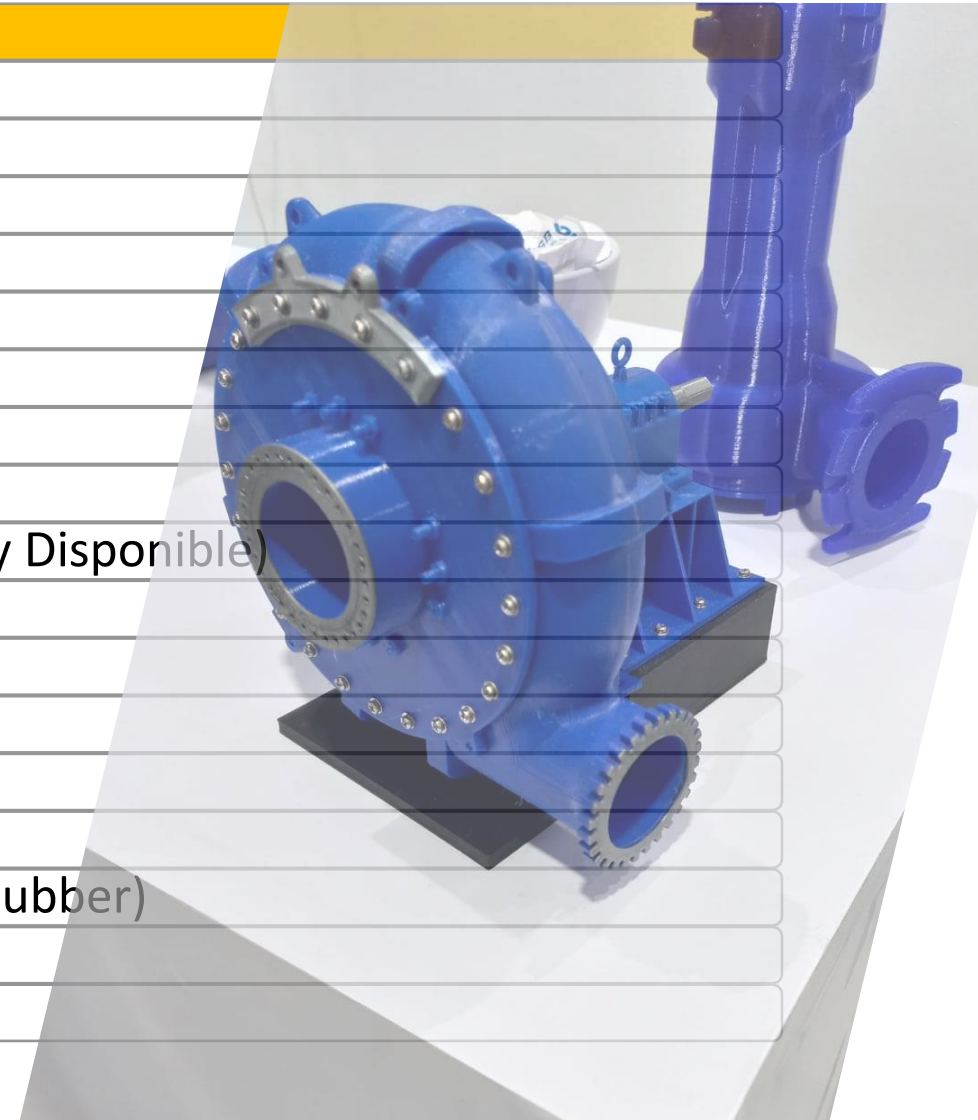
Conferencista:



Sistemas de Bombeo en Minería

Clasificación de los Fluidos Mineros

- Tipos de flujo en tubería
- Fundamentos del bombeo de pulpas mineras
- Efecto de sólidos en bombas Centrífugas
- Derrateo en Pulpa (Hr y Er)
- Cálculo de la Altura de Dinámica Total (ADT)
- Curva del Sistema vs Curva Característica
- Bombas en serie y paralelo
- Leyes de Afinidad
- Cálculo de la Altura Neta Positiva de Aspiración (NPSH Requerido y Disponible)
- Cavitación en Bombas Centrífugas (Aspiración e Impulsión)
- Transientes Hidráulicos/ Golpe de Ariete
- Tipos de tuberías y principales características técnicas
- Desgaste de tuberías por la presencia de Sólidos
- Cajones de Bombeo
- Selección y Dimensionamiento de Bombas Centrífugas (Metal vs Rubber)
- ¿Como se lee la curva característica?
- ¿Como se lee la placa de un motor Electrico?



Clasificación de Fluidos Mineros

Agua de mina

Generado en minería subterránea con porcentaje de sólidos mínimos.

Relave Convencional

Los lodos mas comunes en la industria minera (5 a 20 Pa)

Relave Espesado

Obtenido de espesadores de alta velocidad (high rate) o alta compresión. (20 a 100 Pa)

Relleno Hidráulico

Tipo de relave espesado clasificado, usualmente de material grueso (20 a 100 Pa)

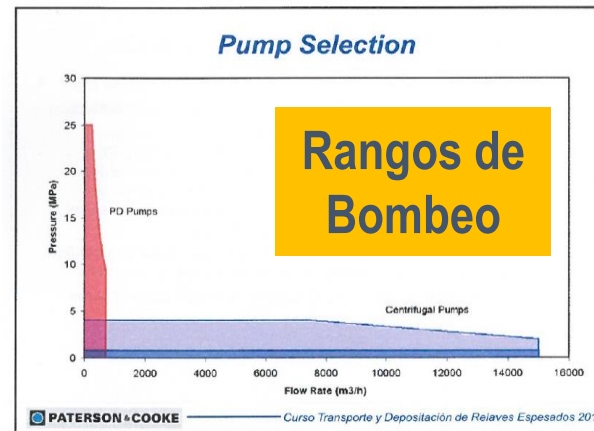
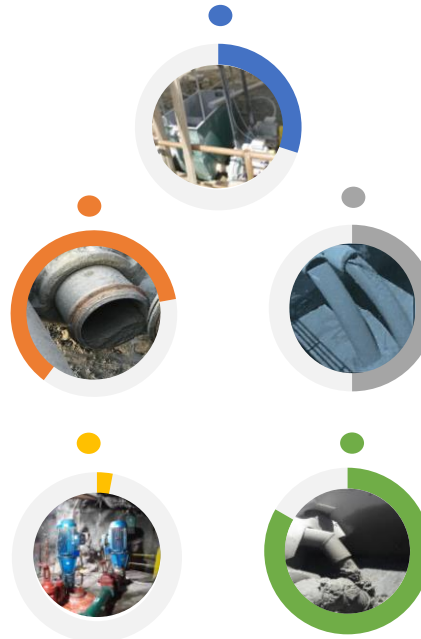
Relave en Pasta

Generado en minería subterránea para relleno con alto porcentaje de sólidos.

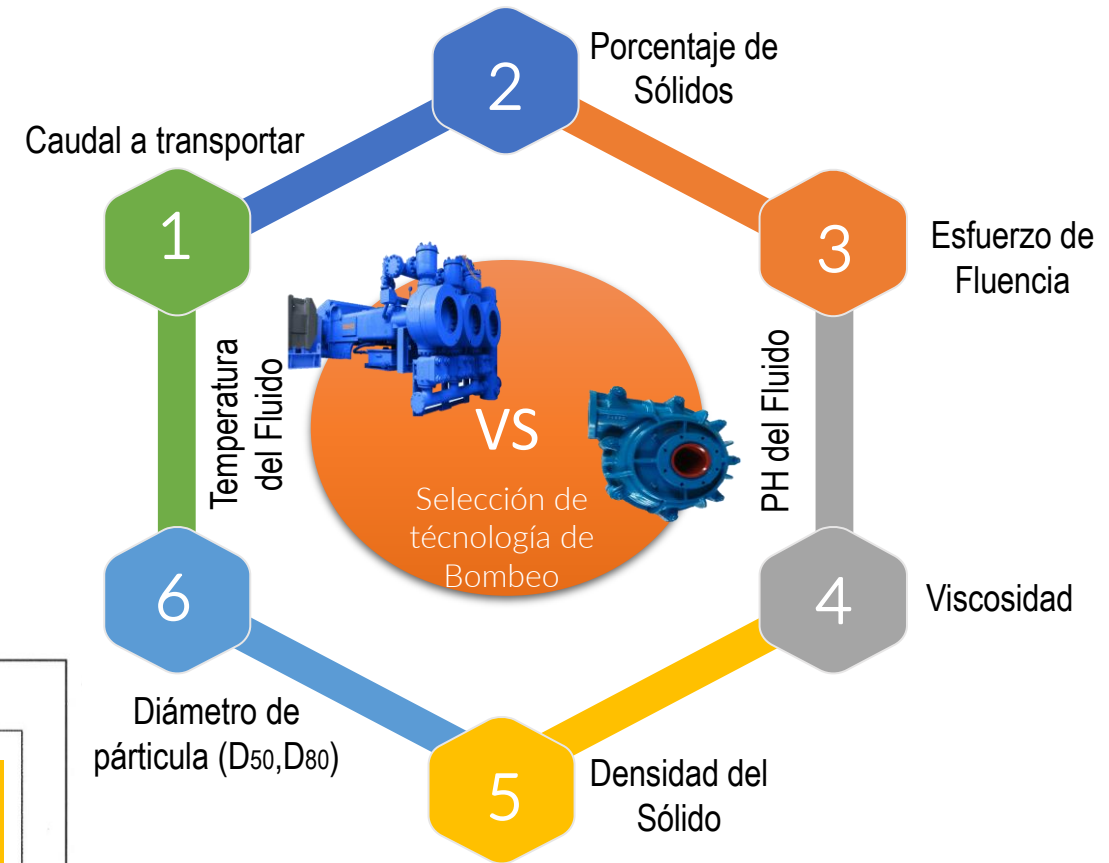
Reología

- 1.-Slump vs. Weight Concentration of Tailings
- 2.-Dynamic Yield Stress vs. weight concentration of Tailings
- 3.-Dynamic Viscosity vs. weight concentration of Tailings
- 4.-Shear Stress (Pa) vs Share Rate (s-1)

Se incrementan el porcentaje de sólidos



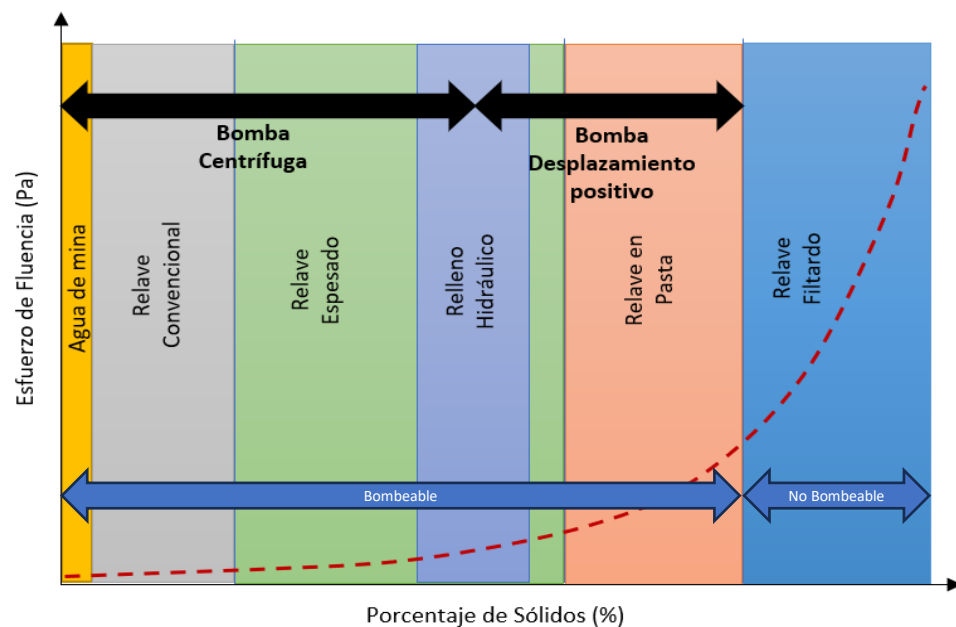
Fuente: Curso Transporte y Deposición de Relaves (P&C)



“Un fluido minero es más complejo de impulsar conforme se incrementa el porcentaje de sólidos, ya que aumentan la Viscosidad, la Densidad del fluido y su esfuerzo de fluencia.

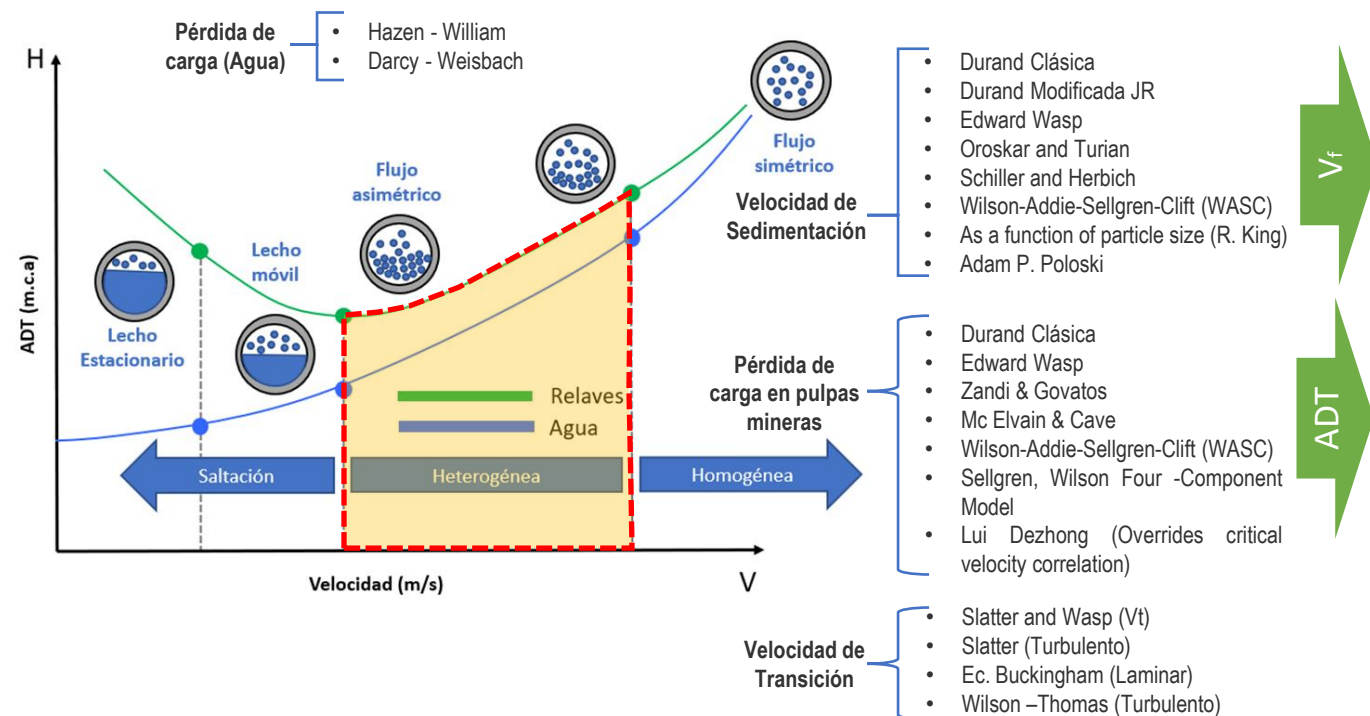
Clasificación de los Fluidos mineros

Clasificación de fluidos mineros



Esta clasificación ha sido elaborada en base **al porcentaje de sólidos y el esfuerzo de fluencia** de los fluidos mineros

Variación de ADT con velocidad del fluido



Se observa conforme **aumenta la velocidad** el fluido se vuelve **homogéneo** por ende **la altura dinámica total aumenta (ADT)**

Sistemas de Bombeo en Minería

Clasificación de los Fluidos Mineros

Tipos de flujo en tubería

Fundamentos del bombeo de pulpas mineras

Efecto de sólidos en bombas Centrífugas

Derrateo en Pulpa (Hr y Er)

Cálculo de la Altura de Dinámica Total (ADT)

Curva del Sistema vs Curva Característica

Bombas en serie y paralelo

Leyes de Afinidad

Cálculo de la Altura Neta Positiva de Aspiración (NPSH Requerido y Disponible)

Cavitación en Bombas Centrífugas (Aspiración e Impulsión)

Transientes Hidráulicos/ Golpe de Ariete

Tipos de tuberías y principales características técnicas

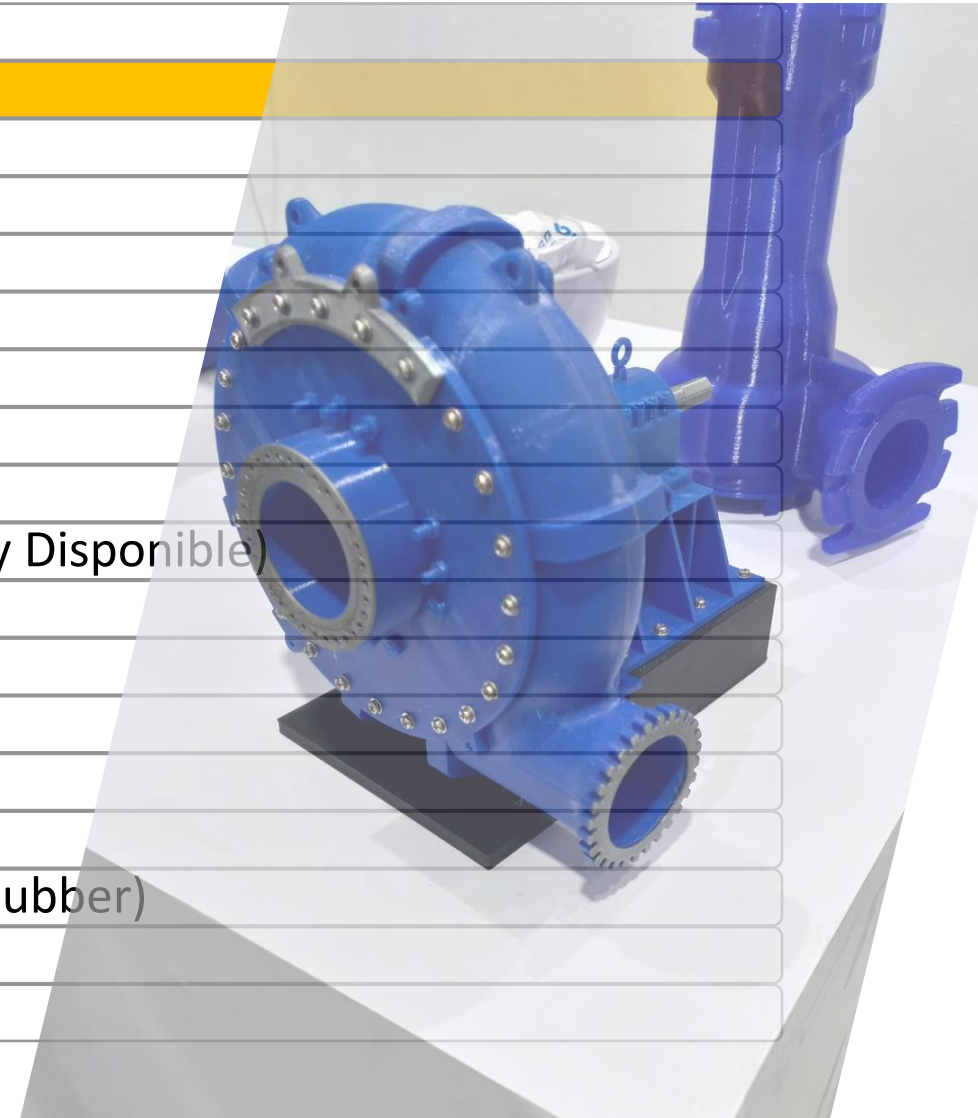
Desgaste de tuberías por la presencia de Sólidos

Cajones de Bombeo

Selección y Dimensionamiento de Bombas Centrífugas (Metal vs Rubber)

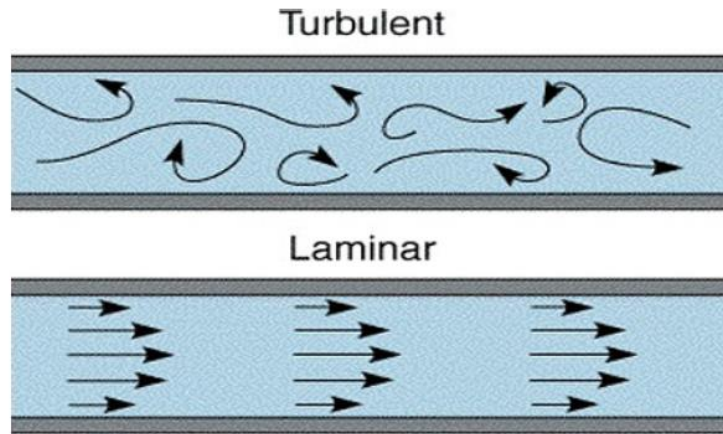
¿Como se lee la curva característica?

¿Como se lee la placa de un motor Electrico?



Tipos de Flujos en Tuberías

El transporte de pulpa se efectúa principalmente en flujo turbulento, de manera que la turbulencia del flujo permita mantener en suspensión los sólidos.



Se cumple para **líquidos puros**:

- ☐ $Re < 2100$: flujo laminar
- ☐ $2100 < Re < 4000$: flujo en transición
- ☐ $Re > 4000$: flujo turbulento

Velocidad de Transición

La Velocidad de Transición, depende directamente de las características reológicas de la pulpa y existen diferentes métodos para determinarla.

A continuación, se presenta la expresión de Slatter y Wasp, utilizada normalmente debido a su simplicidad de aplicación.

$$V_T = Re_c \frac{\mu}{D_i \rho}$$

Donde:

V_t = Velocidad de transición (m/s)

μ = Viscosidad de pulpa (Pa.s)

ρ = Densidad de la pulpa (Pa.s)

D_i = Diámetro Interno de Tubería (m)

Tipos de Flujos en Tuberías

Para calcular el número de Reynolds es necesario conocer el diámetro interno de la tubería, la velocidad del fluido, la densidad de la mezcla y el coeficiente de rigidez.

$$Re_B = \frac{D_i v \rho_m}{\mu}$$

El parámetro Re_c se obtiene de un número adimensional, llamado Número de Hedstrom (He):

- $Re_c = 2100$ para $He < 1,7 \times 10^3$
- $Re_c = 155 He^{0.3}$ para $1.7 \times 10^3 < He < 1.5 \times 10^5$
- $Re_c = 26 \cdot He^{0.3}$ para $He > 1,5 \times 10^5$

Otra fórmula que permite determinar si el flujo es turbulento es la siguiente:

$$Re_2 = \frac{8\rho v^2}{\tau_f + \mu_B \left(8 \frac{V}{D_i}\right)}$$

Número de Hedstrom: Para calcular el número de Hedstrom es necesario conocer el diámetro interno de la tubería, la densidad de la mezcla, el esfuerzo de fluencia y el coeficiente de rigidez. El Número de Hedstrom se calcula:

$$He = \tau_f \frac{\rho D_i^2}{\mu^2}$$

En donde,

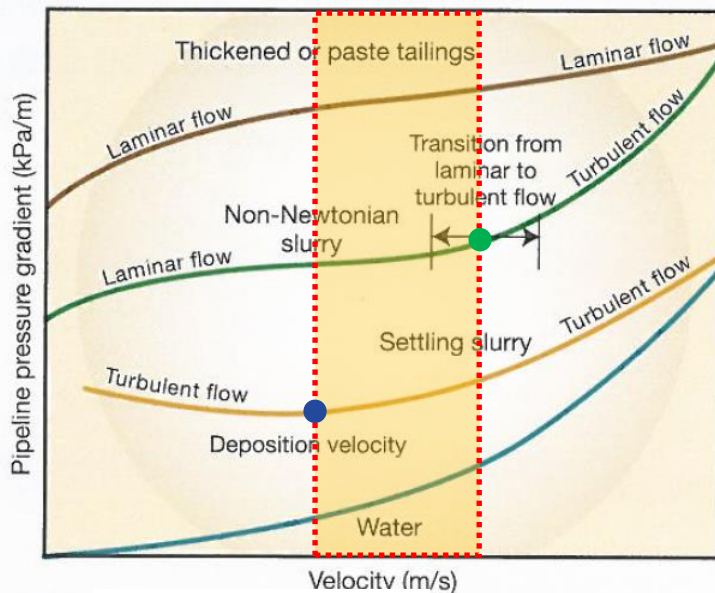
τ_f : Es la tensión de fluencia

Luego, si Re_2 es mayor a 8000 el flujo es turbulento, mientras que si Re_2 es menor a 8000, el flujo puede ser de transición o laminar.

Tipos de Flujos en Tuberías

Una fórmula que permite determinar la velocidad crítica o velocidad de transición (Slatter and Wasp:

$$V_t = 26 \sqrt{\frac{\tau_f}{\rho_m}}$$

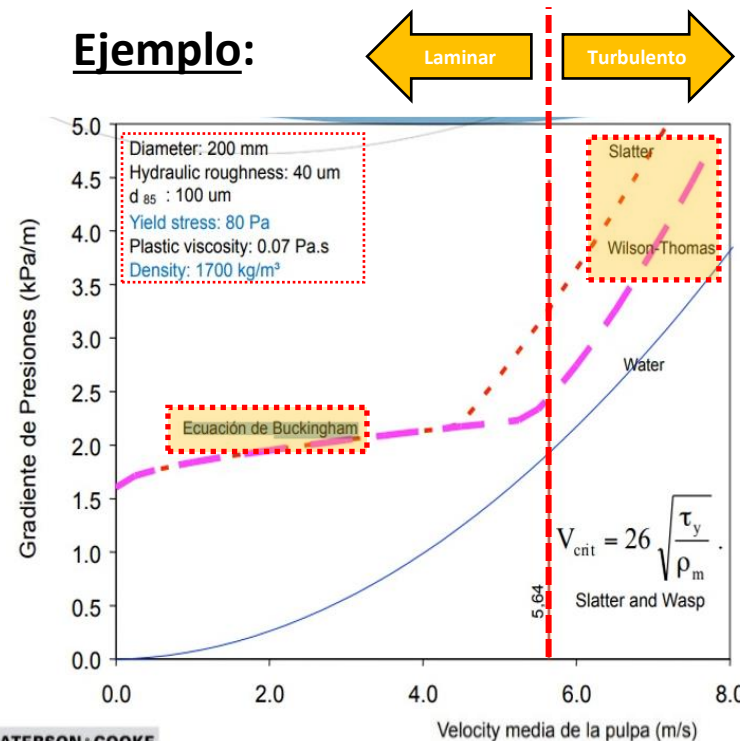


- Velocidad de Deposición
- Velocidad de Transición

- Pulpa no Newtoniana
- Pulpa Sedimentable

Fuente: *Paste and Thickened Tailings-A Guide*

Ejemplo:



PATERSON & COOKE

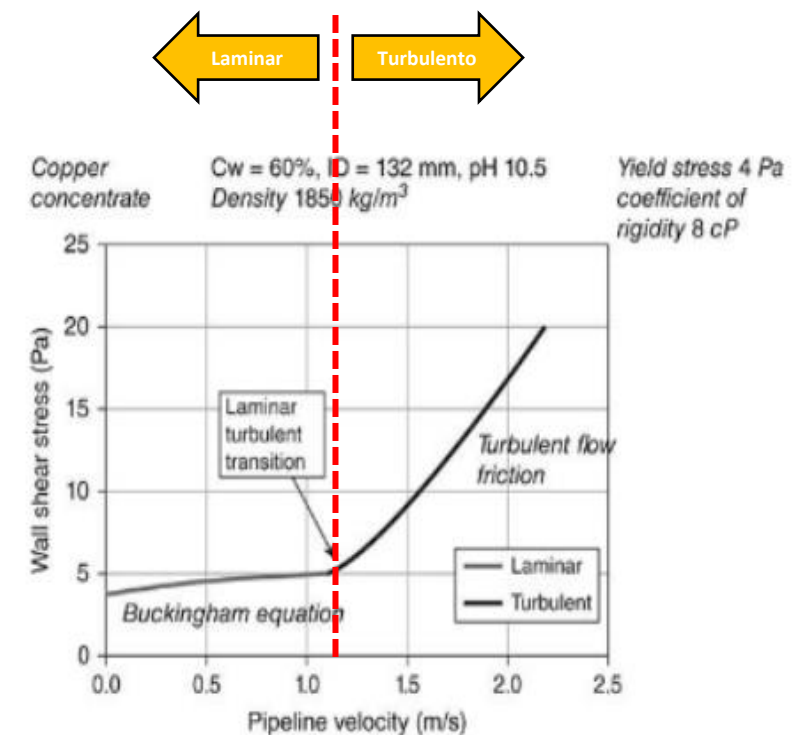
Encuentro Técnico en Manejo de Relaves Espesados y Optimización de Recuperación de Agua

Fuente: *Paterson & Cooke*

Ecuación de GOLDSACK (1998)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{16}{3D} \tau_o + \frac{128}{\pi D^2} \mu Q - \left(\frac{4\tau_o}{D} \right)^4 \frac{1}{3 \left(\frac{\Delta P}{L} \right)^3}$$

Eliminando el término no lineal y asumiendo condiciones sin deslizamiento



Fuente: *Slurry Systems Handbook Second Edition, 2022*

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{16}{3D} \tau_o + \frac{32}{D^2} \mu v$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \text{Pressure loss per unit length of pipe} \left(\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right)$$

μ = Viscosidad Bingham (Pa.s)

v = Velocidad de flujo (m/s)

Fuente: *Paste and Thickened Tailings-A Guide*

Tipos de Flujos en Tuberías

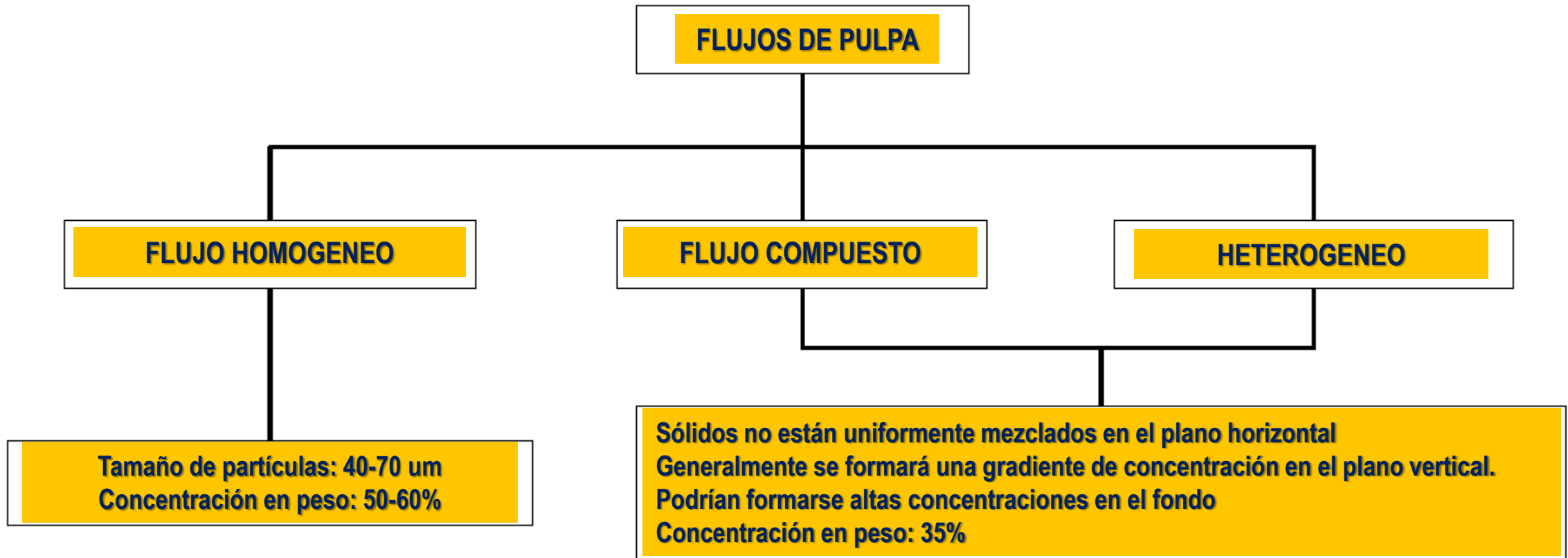
Para pulpas mineras

- Velocidad Máxima:
 - Para evitar desgaste acelerado por abrasión, se recomienda velocidades menores a 4 m/s.
- Velocidad Mínima:
 - Para el transporte de pulpas sedimentables, la velocidad mínima del flujo estará dada por la más restrictiva entre la velocidad límite de depósito (VL) y velocidad de transición de régimen laminar-turbulento (VT).
- Para transporte de agua, en impulsiones se utiliza el diámetro económico, correspondiente a aquel que posee menor costo entre tubería y energía. Normalmente el diámetro económico se da para velocidades de escurrimiento entre 1 y 2 m/s.

Un relave es esencialmente una mezcla de un flujo transportante y partículas sólidas mantenidas en suspensión. El flujo más común usado para transportar partículas sólidas es el agua.

La mezcla solido-liquido puede presentarse en dos formas básicas: flujo de pulpa de relave Homogénea o Heterogénea.

Tipos de Flujos en Tuberías



Referencias Bibliográficas (01 de 04)

- PATERSON, A.J.C. High density slurry and paste tailings, transport systems. International Platinum Conference 'Platinum Adding Value'. The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.
- Proceedings Tailings and Mine Waste 2011. A Two-Layer Approach for Tailings in Open Channels, Baha E. Abulnaga, Fluor, San Francisco, USA.
- Slurry pipeline for Egypt and Sudan, Baha E. Abulnaga
- GIW Industries Inc., Slurry pipeline design Manual.
- Hidráulica de pulpas de Relaves en contornos cerrados, Alfredo Edwards Velasco.
- Paste 2011, R. J, Jewell and A, B Fourie, PATERSON, A.J.C. The pipeline transport of high-density slurries.
- Thickened and Paste Tailings Pipeline Systems: Design, Procedure – Part 1, R. Cooke Paterson & Cooke, South Africa.
- Design of Slurry Transport Systems, B.E.A Jacobs.

Referencias Bibliográficas (02 de 04)

- Kimberly Finke Morrison - Tailings Management Handbook (2022, Society for Mining Metallurgy & Exploration)
- Slurry Transport Using Centrifugal Pumps, K.C Wilson, G.R Addie.
- Robert Visintainer, Václav Matoušek, Lionel Pullum, Anders Sellg - Slurry Transport Using Centrifugal Pumps (2023, Springer)
- Government of Indian Bureau of Mines, Ministry of Mines, Slurry Transportation in Indias Mines.
- Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation, Series on Bulk Materials Handling Vol 1 (1975/77) N°04.
- Paste and Thickened Tailings -A guide, R.J. Jewell and A.B Fourie.
- Handbook on Mine Fill, Yves Potvin, Ed Thomas and Andy Fourie Handbook on Mine Fill, Australian Centre for Geomechanics.
- Estimation of the Critical Velocity in Pipeline flow os slurries, R.M Turian, F.L HSU and T.W. MA, 1987) Department of Chemical Engineering, University of Illinois at Chicago
- Introduction to Practical Fluid Flow, R.P King, University of Utah

Referencias Bibliográficas (03 de 04)

- Transporte Hidráulico de Sólidos a grandes distancias, Juan Rayo Prieto, 1993
- Curso de Hidráulica Aplicada al Transporte de Pulpas. Juan Rayo ,2002
- Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control, SME.
- Poloski AP, H.E. Adkins, J. Abrefah, A, M Casella, R.E. Hoimer, F. Nigi, M.J. Minette, J.J. Toth, J.M Tingey and S.T. Yokuda. 2009. Deposition Velocity of Newtonian and Non-Newtonian Slurries in Pipelines –US Dept of Energy - PNNL-17639)
- Advances in Solid-Liquid Flow in Pipes and its Application, Iraj Zandi,1971
- KLEIN, B.(2002): "Rheology of mineral suspensions", Mining Engineering, University of British Columbia, Canada.
- Baha E. Abulnaga, Mazdak International Inc., 2002, Slurry Systems Handbook, McGraw – Hil,New York
- III Curso Transporte y Deposición de Relaves espesados,2011, Paterson & Cooke
- Diplomatura de Especialización en Ingeniería de Piping, PUCP – 2015-1
- Diploma de Postítulo en Ingeniería de Relaves, FCFM -2021

Referencias Bibliográficas (04 de 04)

- Hidráulica aplicada a procesos mineros JRCap Capacitación de Excelencia, mine Class
- Operación y Mantenimiento de Bombas centrífugas, TECSUP
- Fluidodinámica Aplicado a la minería Tomo I JRCap Capacitación de Excelencia
- Hidráulica de tuberías, Ing. Félix Linares Humpiri, Universidad Nacional de Piura
- ASME B31.3 Process Piping Guide
- ASTM A53/A53M-01, Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc –Coated, Welded and Seamless.
- Manual De Entrenamiento Selección Y Aplicación De Bombas Centrífugas, KSB
- Método de Durand Aplicado al Transporte de Relaves Cicloneados, Pablo Vivero



GRACIAS...
Consultas...

RICHARD MERA

[LinkedIn: Richard Mera](#)