

# ASPECTOS CLAVES EN EL TRANSPORTE DE PULPAS ESPESADAS



*Ray Martinson*

[RayM@Patersoncooke.com](mailto:RayM@Patersoncooke.com)

 **PATERSON & COOKE**

24 Mayo, 2012 

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

# Aspectos Claves en el Transporte de Pulpas Espesadas

1. **Propiedades Básicas de las Pulpas**
2. **Reología**
3. **Ensayos a los Relaves**
4. **Transporte de Pulpas**
  - 4.1 **Pulpas Sedimentables**
  - 4.2 **Pulpas Homogéneas (No-Newtonianas)**
5. **Diseño Hidráulico de Tuberías**
6. **Consideraciones Especiales**

# Aspectos Claves en el Transporte de Pulpas Espesadas

## 1. Propiedades Básicas de las Pulpas

# Propiedades Básicas de las Pulpas

## 💧 Propiedades Físicas

- ✓ Peso específico de los sólidos y granulometría
- ✓ Contenido de sólidos
- ✓ Forma de las partículas

## 💧 Propiedades Químicas

- ✓ Conductividad del agua de proceso
- ✓ pH de la mezcla

## 💧 Propiedades Mineralógicas

- ✓ Presencia de arcillas y tipo de arcillas

## 💧 Propiedades del Proceso

- ✓ Adición de Floculante
- ✓ Agitación

# Propiedades Básicas de las Pulpas

## Relaciones Gravimétricas y Volumétricas Básicas

	$C_v$	$C_w$	$\rho_m$
$C_v =$	1	$\frac{\rho_w}{\frac{\rho_s}{C_w} - (\rho_s - \rho_w)}$	$\frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w}$
$C_w =$	$\frac{\rho_s}{\frac{\rho_w}{C_v} + (\rho_s - \rho_w)}$	1	$\frac{\rho_s (\rho_m - \rho_w)}{\rho_m (\rho_s - \rho_w)}$
$\rho_m =$	$\rho_w + C_v (\rho_s - \rho_w)$	$\rho_w + \frac{\rho_w C_w (\rho_s - \rho_w)}{\rho_s - C_w (\rho_s - \rho_w)}$	1

$C_v$ : Concentración en volumen

$\rho_s$ : Densidad del sólido

$\rho_m$ : Densidad de la pulpa

$C_w$ : Concentración en peso

$\rho_w$ : Densidad del agua

# Aspectos Claves en el Transporte de Pulpas Espesadas

## 2. Reología

# Relaves Convencionales y Relaves Espesados



Relave Convencional  
Condición Turbulenta



Relave Espesado  
Condición Laminar

# Flujo Turbulento o Flujo Laminar?

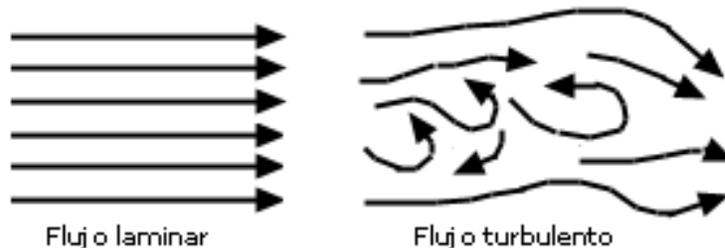
## Régimen Laminar:

Es la condición en que las líneas de flujo se mantienen paralelas e imperturbadas, sin entremezclarse. Sucede cuando hay alta viscosidad y/o baja velocidad.



## Régimen Turbulento:

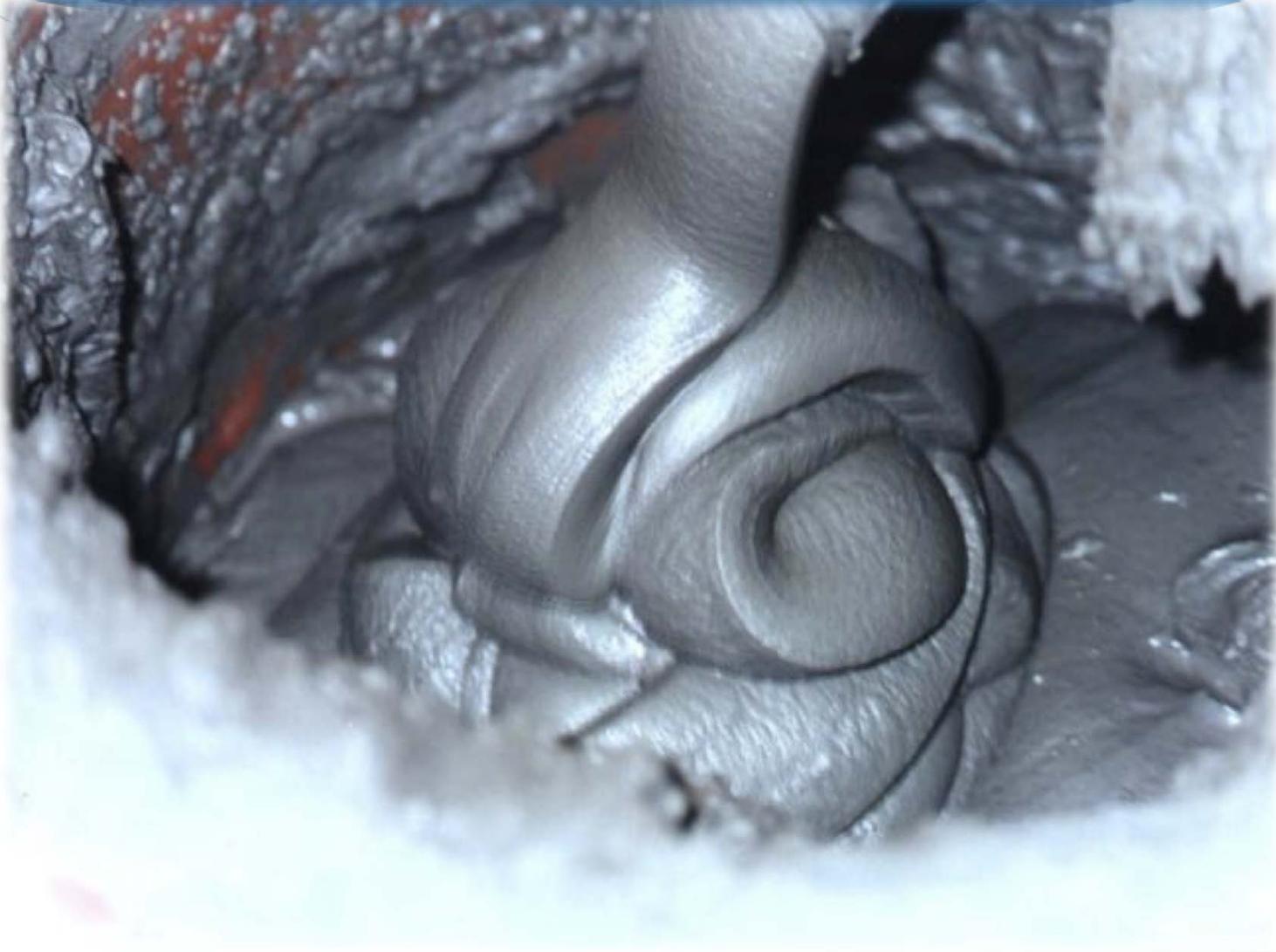
Condición en la que el flujo es caótico y desordenado. El flujo cambia de rumbo en forma errática. Sucede cuando hay baja viscosidad y/o alta velocidad.



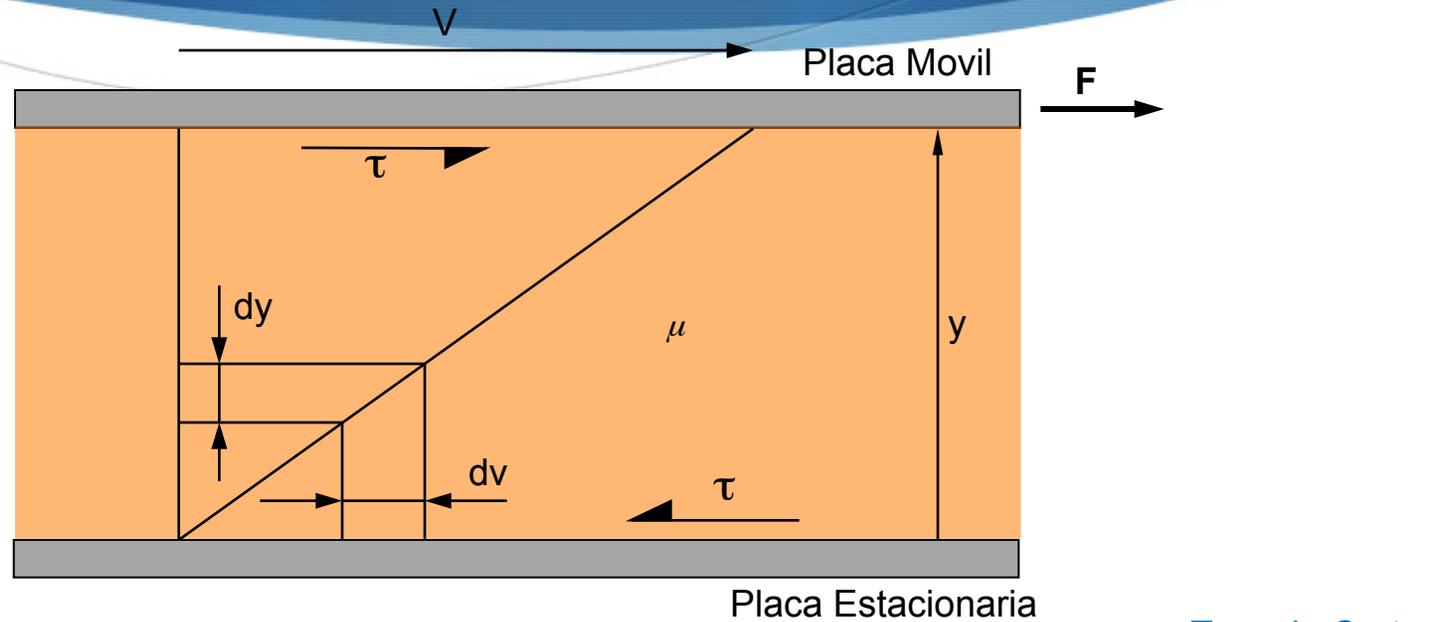
# Que es la Reología?

- ◆ Reología es la ciencia que estudia el fenómeno de los flujos viscosos.
- ◆ Generalmente definida como las características viscosas de un fluido o de una mezcla homogénea de sólido y líquido.
- ◆ Viscosidad: *Es la resistencia que opone un fluido al ejercer un esfuerzo cortante en el. Esta resistencia es proporcional a la velocidad del esfuerzo cortante. Es una propiedad que se manifiesta en un fluido en movimiento.*

# Relaves Espesados y en Pasta



# Que es la Viscosidad?



$$\tau = \frac{F}{A} \propto \frac{dV}{dy}$$

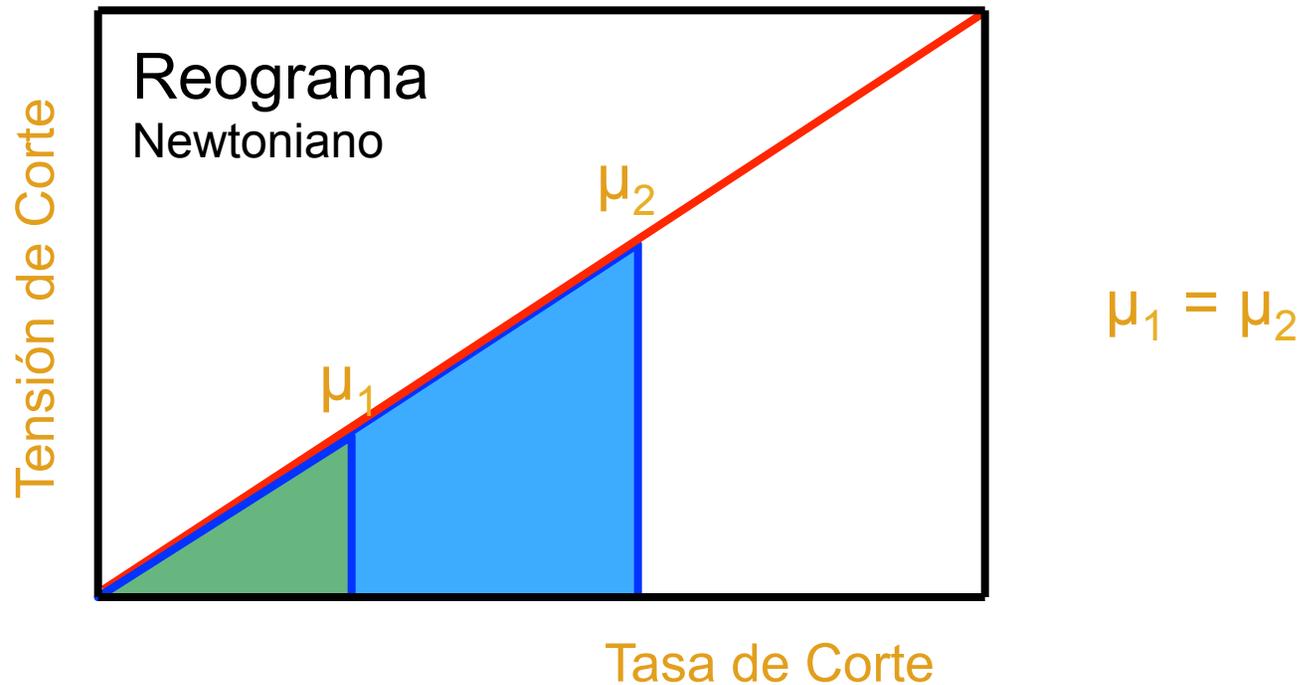
Tensión de Corte  $\rightarrow$   $\tau = \mu \frac{dV}{dy}$   $\leftarrow$  Tasa de Corte

Viscosidad  $\rightarrow$   $\mu$

- La viscosidad de un fluido  $\mu$  es la propiedad que relaciona la fuerza friccional (tensión de corte) con la deformación (tasa de corte).

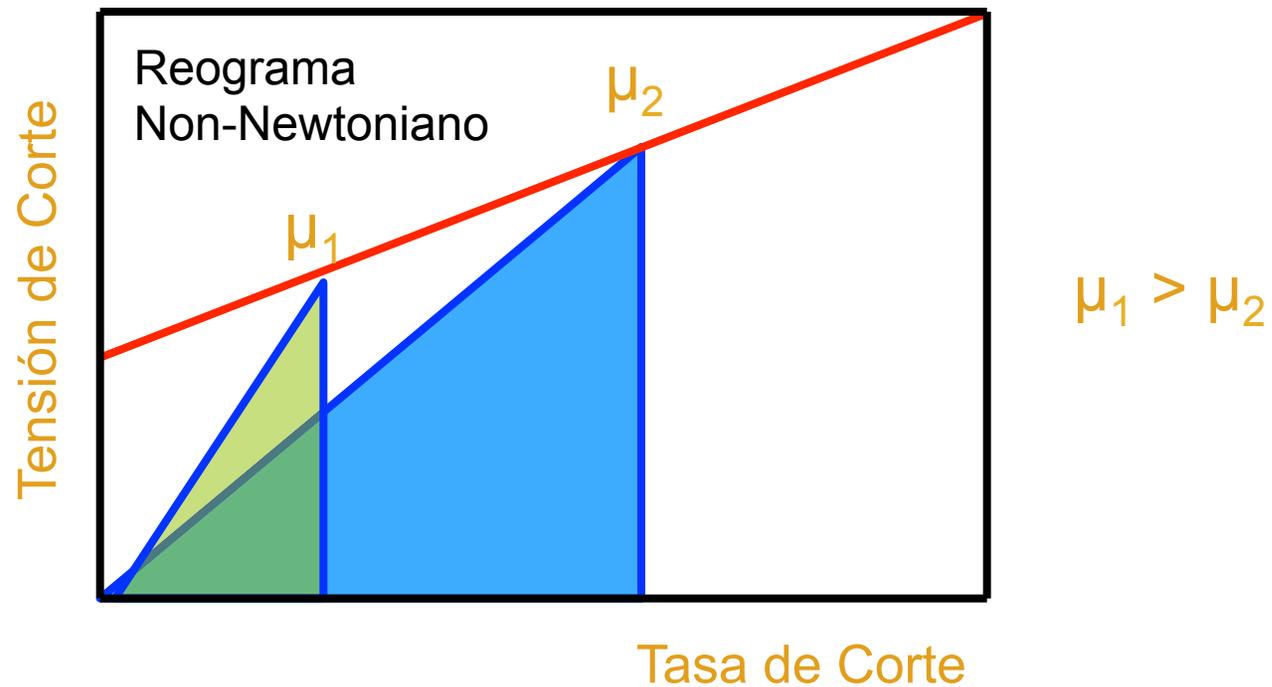
# Que es un Fluido Newtoniano?

$$\tau = \mu \frac{dV}{dY} = \mu \gamma$$



# Que es un Fluido No-Newtoniano?

$$\tau \neq \mu \gamma$$



# Que es Tensión de Fluencia (Yield Stress)?

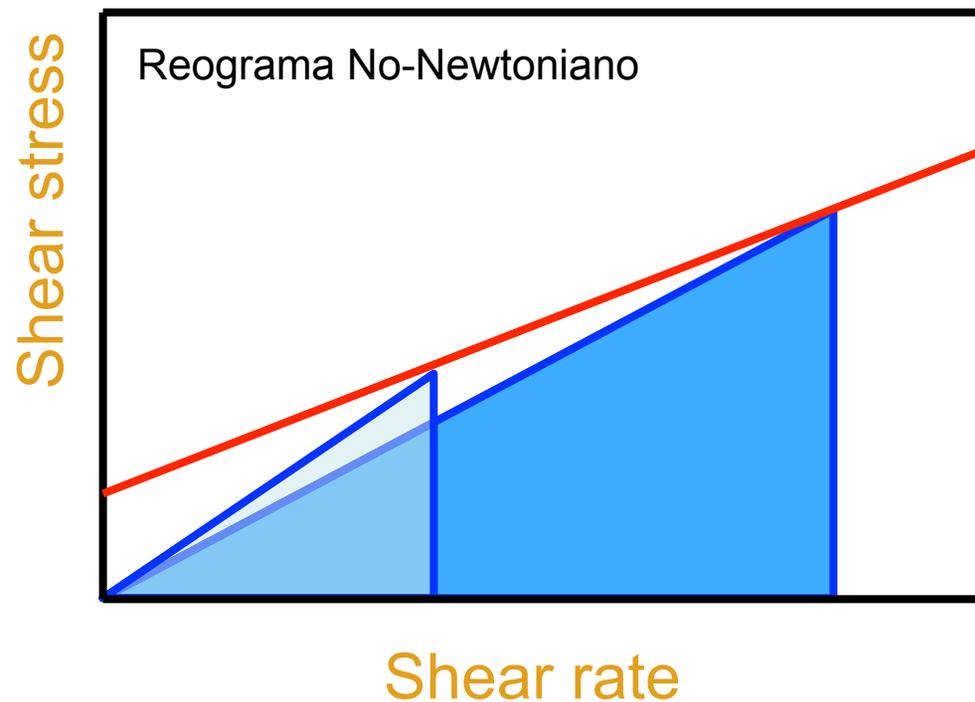
- Tensión de Fluencia - Corresponde a la tensión de corte mínima necesaria para iniciar un flujo sostenible.



# Fluido Visco-plástico

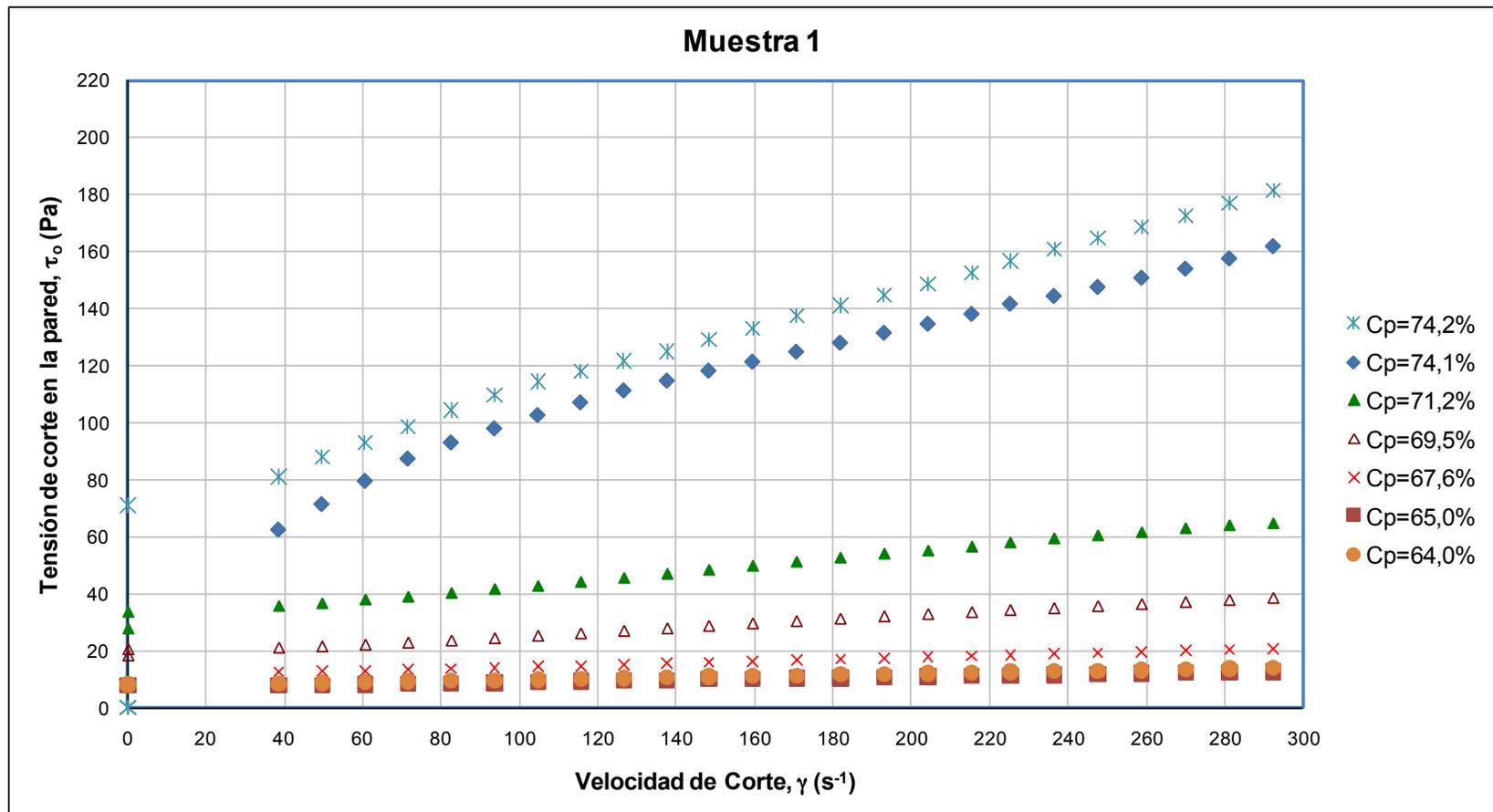
- Tensión de Fluencia  $> 0$
- Fluido plástico Bingham

$$\tau = \tau_y + K \gamma$$



# Ensayo Reológico en una Pulpa

## Reograma de relave de cobre

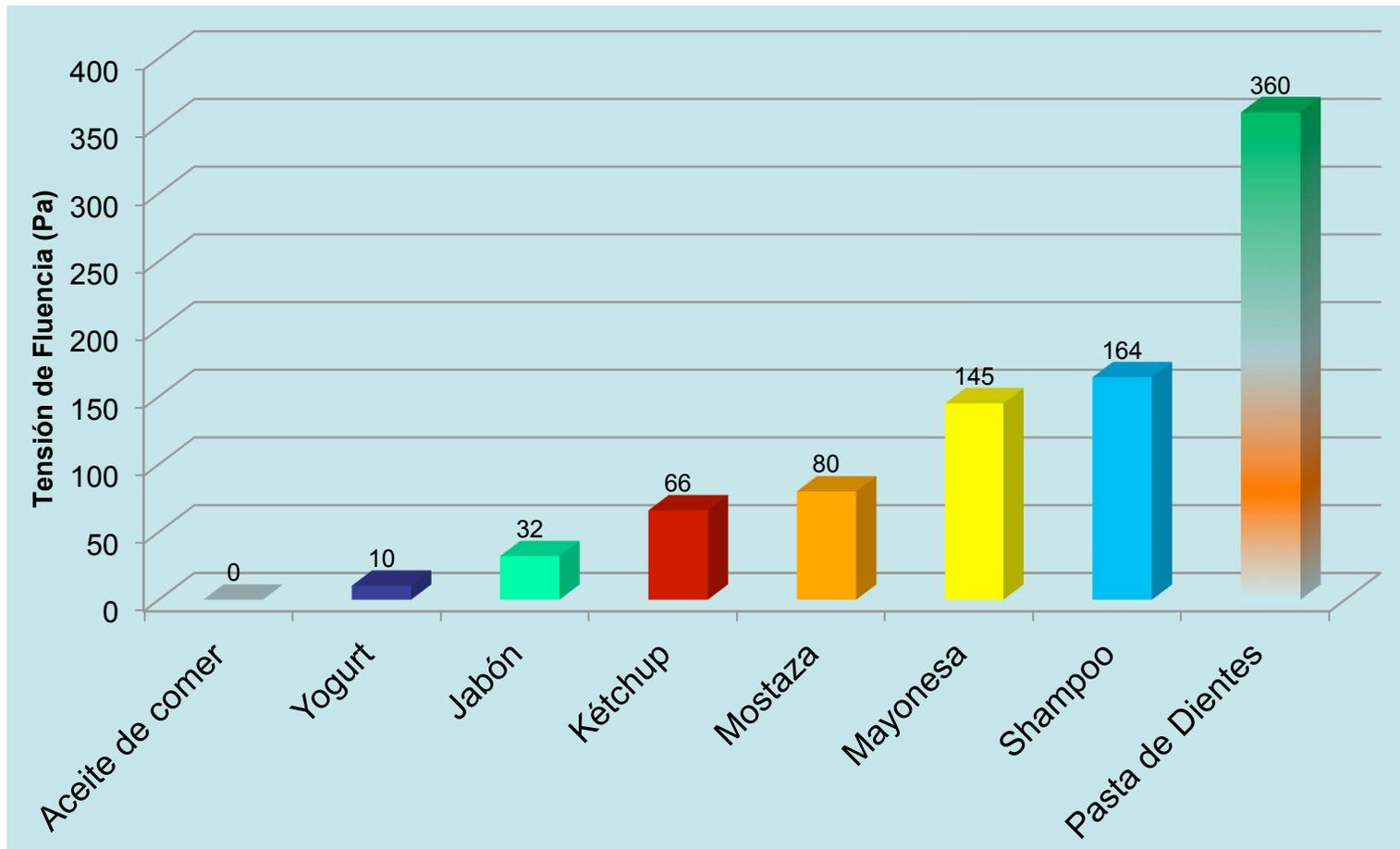


# Típicas Pulpas Viscosas

- Arcillas - cuando hay presentes arcillas minerales la pulpa tiende a ser muy viscosa.
- Pastas y relaves espesados
- **Generalmente las pulpas finas y de baja sedimentabilidad tienen viscosidad alta, la que domina el comportamiento dinámico de la pulpa.**

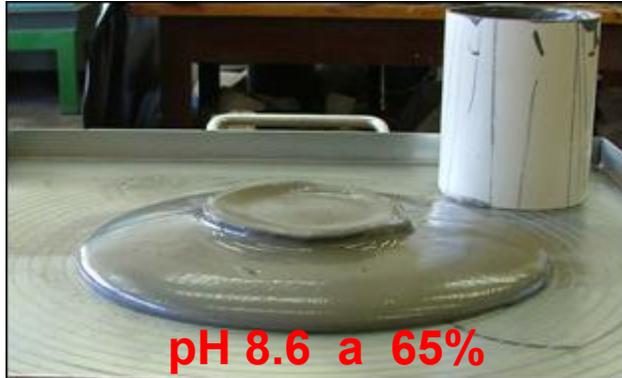


# Reología de Productos Comunes (referenciales)



# Otros Factores que Influencian la Reología

## ◆ Efectos Fisicoquímicos



- ◆ Ciertos aditivos pueden incrementar o disminuir las pérdidas de carga en una conducción, al afectar la Tensión de Fluencia o la Viscosidad de la mezcla.
- ◆ La interdependencia de las variables implica que su efecto es difícil de cuantificar sin realizar ensayos.
- ◆ No hay modelos que permitan predecir la reología de una pulpa sin hacer ensayos.

# Aspectos Claves en el Transporte de Pulpas Espesadas

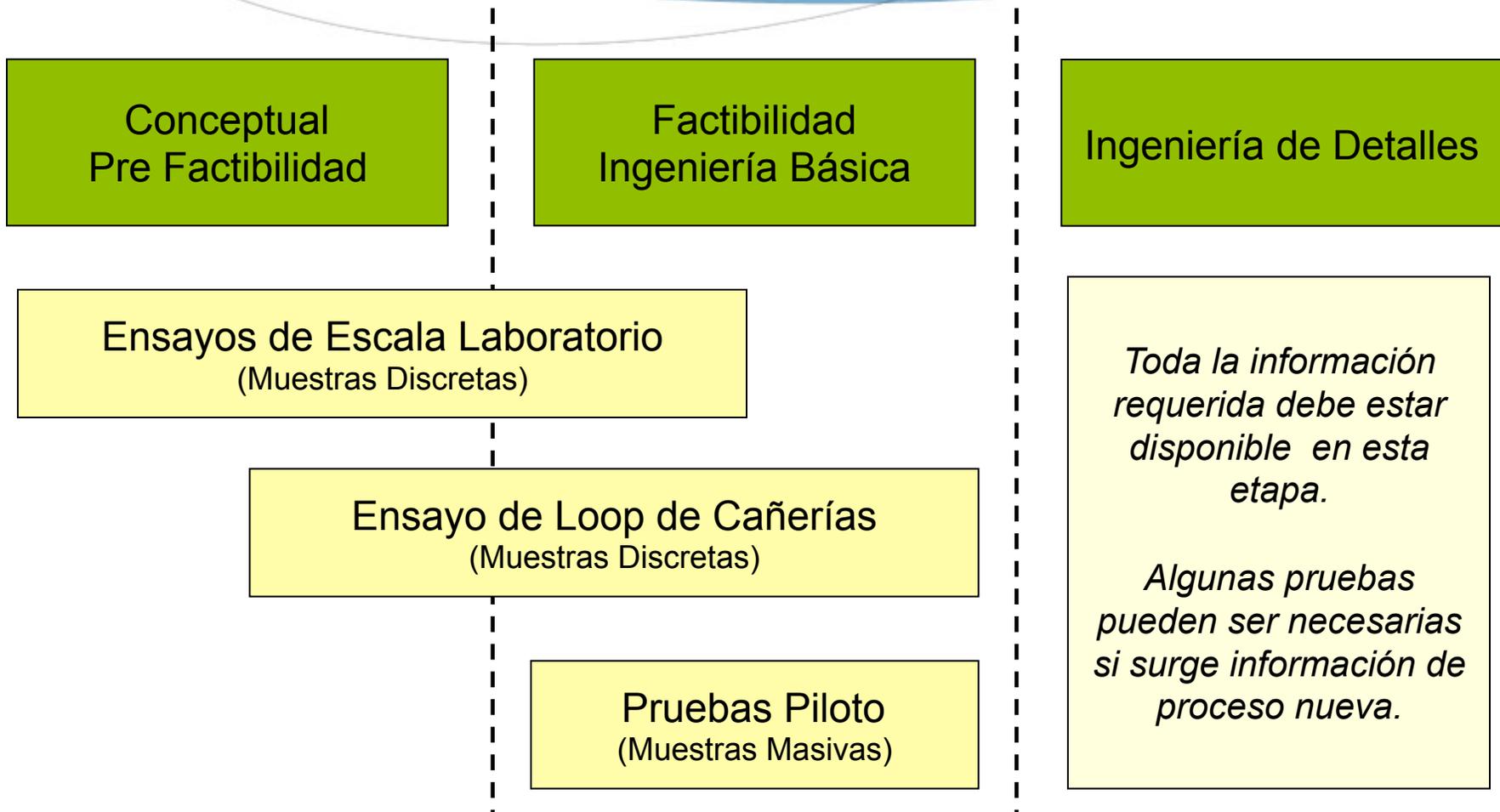
## 3. Ensayos a las Pulpas

# Quando se Requieren Ensayos?

- La información requerida para el diseño de cualquier sistema de transporte de pulpa esta basado en el conocimiento del comportamiento de ella.
- Los ensayos son costosos.
- Los ensayos reducen riesgo.
- Es responsabilidad del diseñador balancear entre

Información Requerida versus Riesgo

# Fases de un Proyecto y Ensayos



# Ensayos Escala de Laboratorio

## ◆ Caracterización del Material

- ◆ Granulometría
- ◆ Peso específico de las partículas
- ◆ Concentración de sedimentación libre y máxima
- ◆ Micrografía de las partículas
- ◆ Propiedades del líquido (si el medio de transporte no es agua)
- ◆ Química del agua

## ◆ Caracterización de la Pulpa

- ◆ pH
- ◆ Reología
- ◆ Comportamiento coloidal de la pulpa y arcillas
- ◆ Ensayos de descenso (Slump )
- ◆ Abrasividad (Número de Miller)
- ◆ Desgaste de tubería (Corrosión y Erosión)

# Ensayos Escala de Laboratorio

## 🔹 Ensayos Reológicos

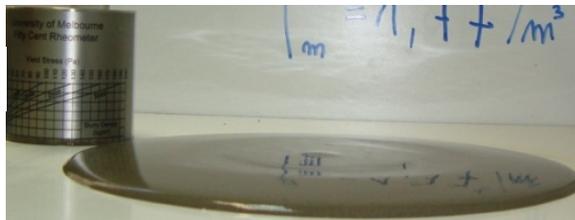
- 🔹 Elaborados usando un viscosímetro rotatorio, un viscosímetro tubular o un loop de cañería. Para un trabajo más preciso, es preferible realizar los ensayos con varias configuraciones/tamaños de modo de validar las mediciones (las curvas de comportamiento resultante deben ser coincidentes en la zona laminar).
- 🔹 Para ensayos en viscosímetro rotacional se deben eliminar los datos que corresponden a las siguientes condiciones:
  - *Flujo no del todo desarrollado (bajas tasas de corte)*
  - *Presencia de vórtices de Taylor (altas tasas de corte)*
- 🔹 En el caso de viscosímetro tubular y loop de cañerías, se deben descartar los puntos de operación en régimen turbulento.

# Ensayos Escala de Laboratorio

## 🔹 Ensayo de Descenso (Slump)

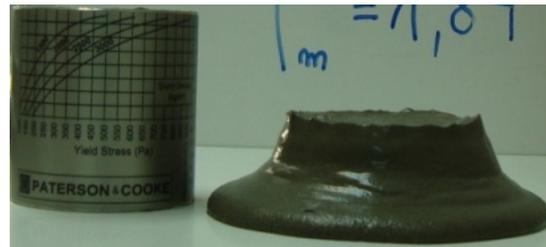
- 🔹 Provee una indicación de la Tensión de Fluencia de la pulpa, pero no provee suficiente información para caracterizar el comportamiento de flujo de la pulpa.
- 🔹 Es buena para efectuar control de calidad de la pulpa.
- 🔹 **No** es adecuado para el diseño de conducciones.

69,7% - 10 Pa



72,6% - 30 Pa

74,4% - 100 Pa



76,3% - 300 Pa

# Ensayos de Loop de Cañerías

## ◆ Propósito

- ◆ Observe el comportamiento de la pulpa
- ◆ Determinar la velocidad de depósito
- ◆ Verificar la transición entre flujo laminar y turbulento
- ◆ Verificar las pérdidas por fricción en flujo laminar
- ◆ Establecer las pérdidas por fricción en régimen turbulento
- ◆ Establecer los parámetros de derrateo de bombas
- ◆ Investigar las condiciones de reinicio de la tubería

# Ensayos de Loop Escala de Laboratorio

## Loop de Cañerías Pequeño



# Pruebas de Loop Piloto



# Ensayos Piloto

- ◆ Generalmente efectuados para etapas de ingeniería de Factibilidad. Permite recopilar información adecuada para el diseño de detalles.
- ◆ Generalmente los propósitos de estos ensayos son:
  - ◆ Evaluar el comportamiento del flujo de la pulpa para un período de tiempo extenso para investigar variaciones del proceso y del mineral.
  - ◆ Evaluar el rendimiento de nuevos equipos de proceso y/o instrumentación considerada en el diseño.
- ◆ Los ensayos piloto incluirán aspectos de los ensayos de laboratorio y loop de cañerías mencionados previamente, pero podrían incluir:
  - ◆ Ensayos de comportamiento de espesamiento y floculantes
  - ◆ Ensayos de depositación en canaletas
  - ◆ Pruebas de transporte en canaletas.

# Ensayos Piloto

- ◆ Ensayos de gran escala:
  - ◆ Ofrece la oportunidad de hacer ensayos en línea con la producción de pulpa.
  - ◆ Esto permite investigar mas fácilmente la sensibilidad a la agitación en la pulpa.
  - ◆ Los ensayos a gran escala ofrecen la oportunidad de investigar la problemática relacionada de la segregación en régimen laminar.
  - ◆ Usualmente efectuados en conjunto con ensayos de depositación de larga duración.

# Ensayos - Resumen

- ◆ Los ensayos a las pulpas entregan información importante que resultará en un diseño exitoso y confiable de los sistemas de transporte de pulpas espesadas.
- ◆ Se debe observar especial cuidado en el diseño de las pruebas a ejecutar, su propósito, el equipamiento e instrumentación necesaria.
- ◆ Toda la instrumentación debe ser calibrada antes, durante y después de los ensayos.

# Aspectos Claves en el Transporte de Pulpas Espesadas

## 4. Transporte de Pulpas

### 4.1 Pulpas Sedimentables

### 4.2 Pulpas Homogéneas

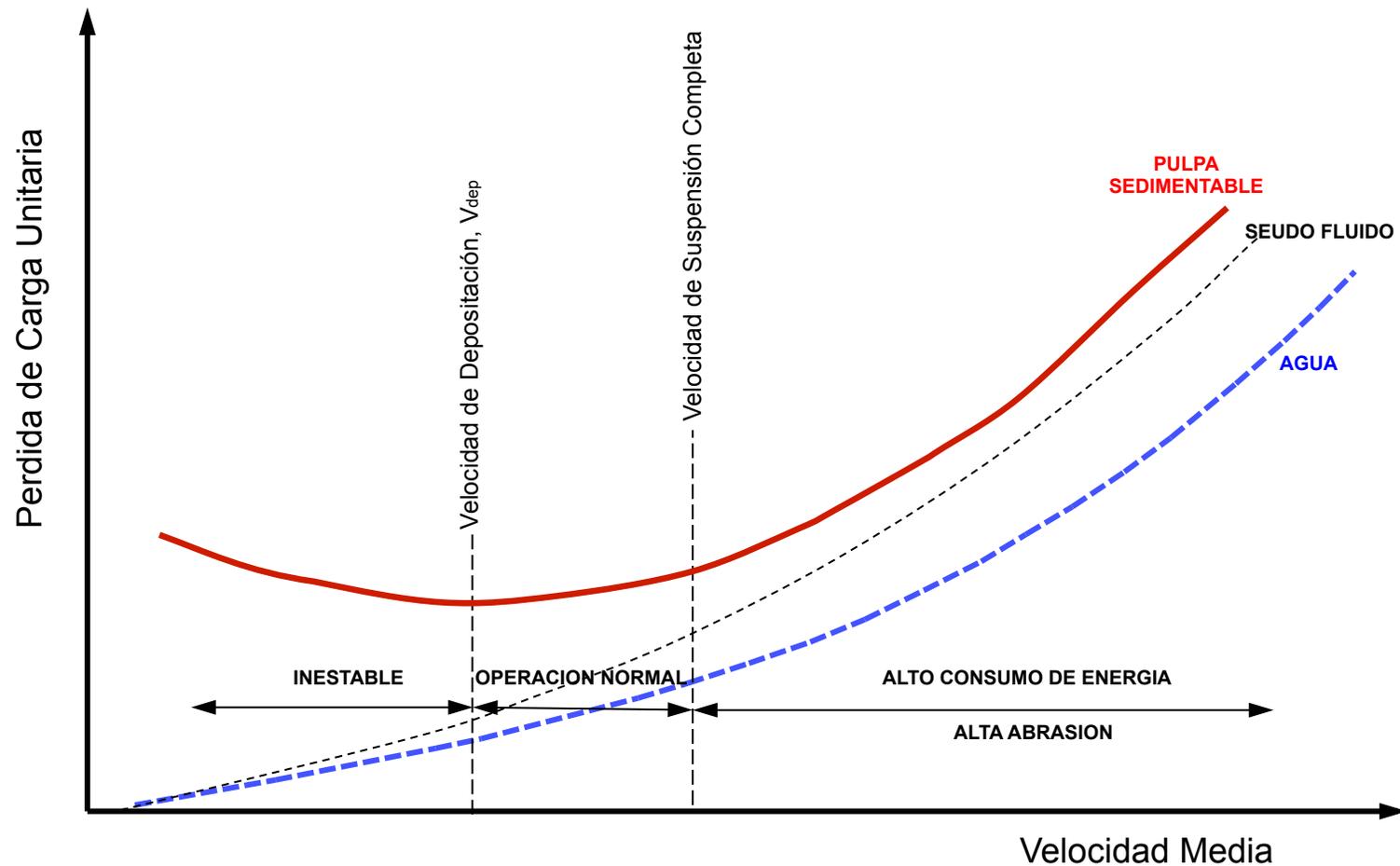
# Aspectos Claves en el Transporte de Pulpas Espesadas

## 4.1 Pulpas Sedimentables

# Pulpas Sedimentables - Conceptos

- ◆ Características de las pulpas sedimentables:
  - ◆ El flujo depende de la turbulencia para mantener en suspensión a los sólidos y así poder transportarlos dentro del flujo.
  - ◆ Los sólidos están asimétricamente distribuidos en la sección transversal. Hay un incremento en la concentración de sólidos hacia el fondo de la conducción.
  - ◆ A bajas velocidades las partículas sedimentan en el fondo de la conducción y llegan a formar un depósito estacionario.
- ◆ Como regla general: Una pulpa con partículas predominantemente mayores a **75  $\mu\text{m}$**  se comportará como pulpa sedimentable.

# Pulpa Sedimentable – Regímenes de Flujo



# Derrateo de Bombas

Las mezclas sólido-liquido afectan adversamente el comportamiento de las bombas centrífugas:

- ◆ Contenido de sólidos
- ◆ Reología o viscosidad de la pulpa

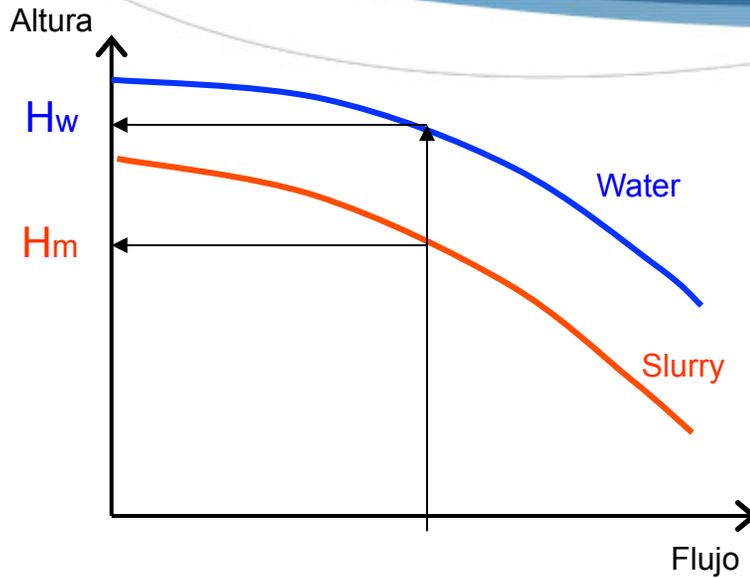
Es decir cuando se bombea una pulpa:

- ◆ La bomba genera menos altura (TDH) y
- ◆ Es menos eficiente energéticamente que cuando bombea agua.

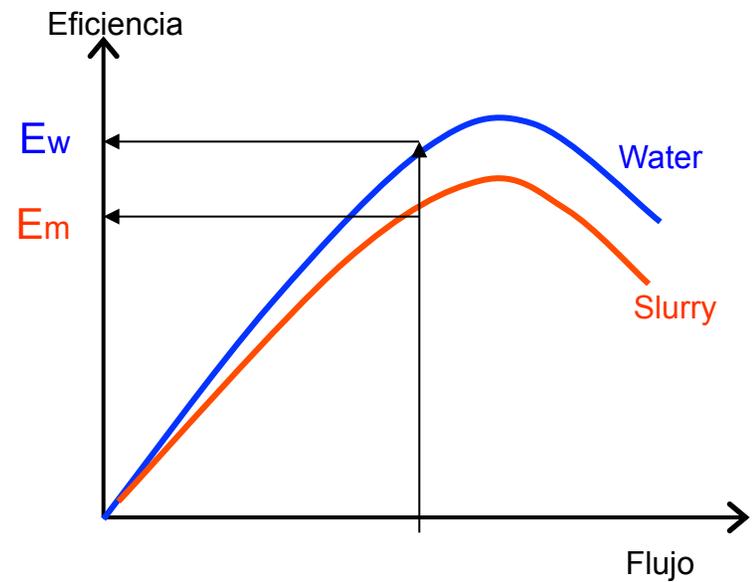
$$\text{Factor de altura} = H_R = \frac{H_m}{H_w}$$

$$\text{Factor de eficiencia} = E_R = \frac{\eta_m}{\eta_w}$$

# Derrateo de Bombas Centrifugas



$$H_r = \frac{H_m}{H_w}$$

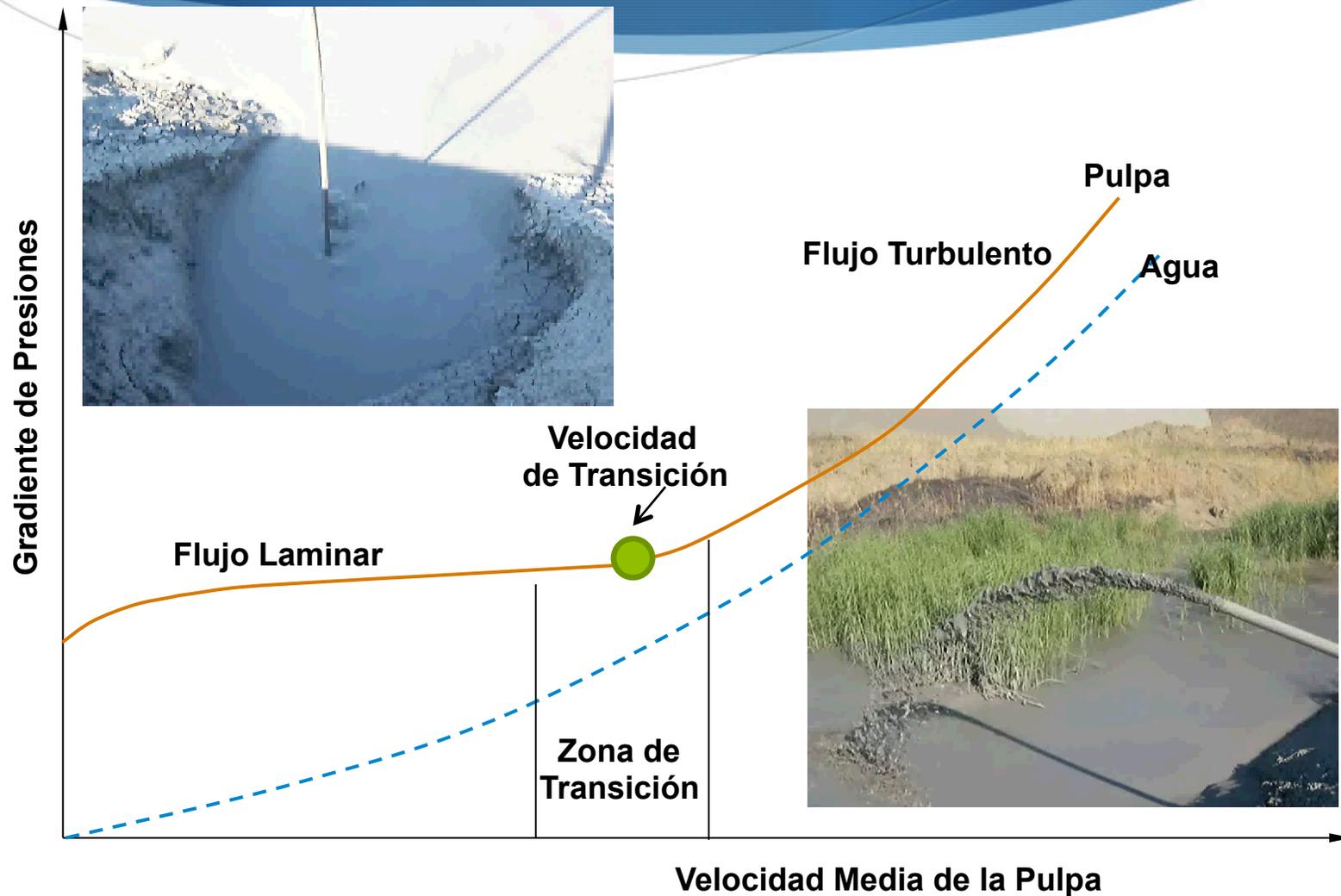


$$E_r = \frac{E_m}{E_w}$$

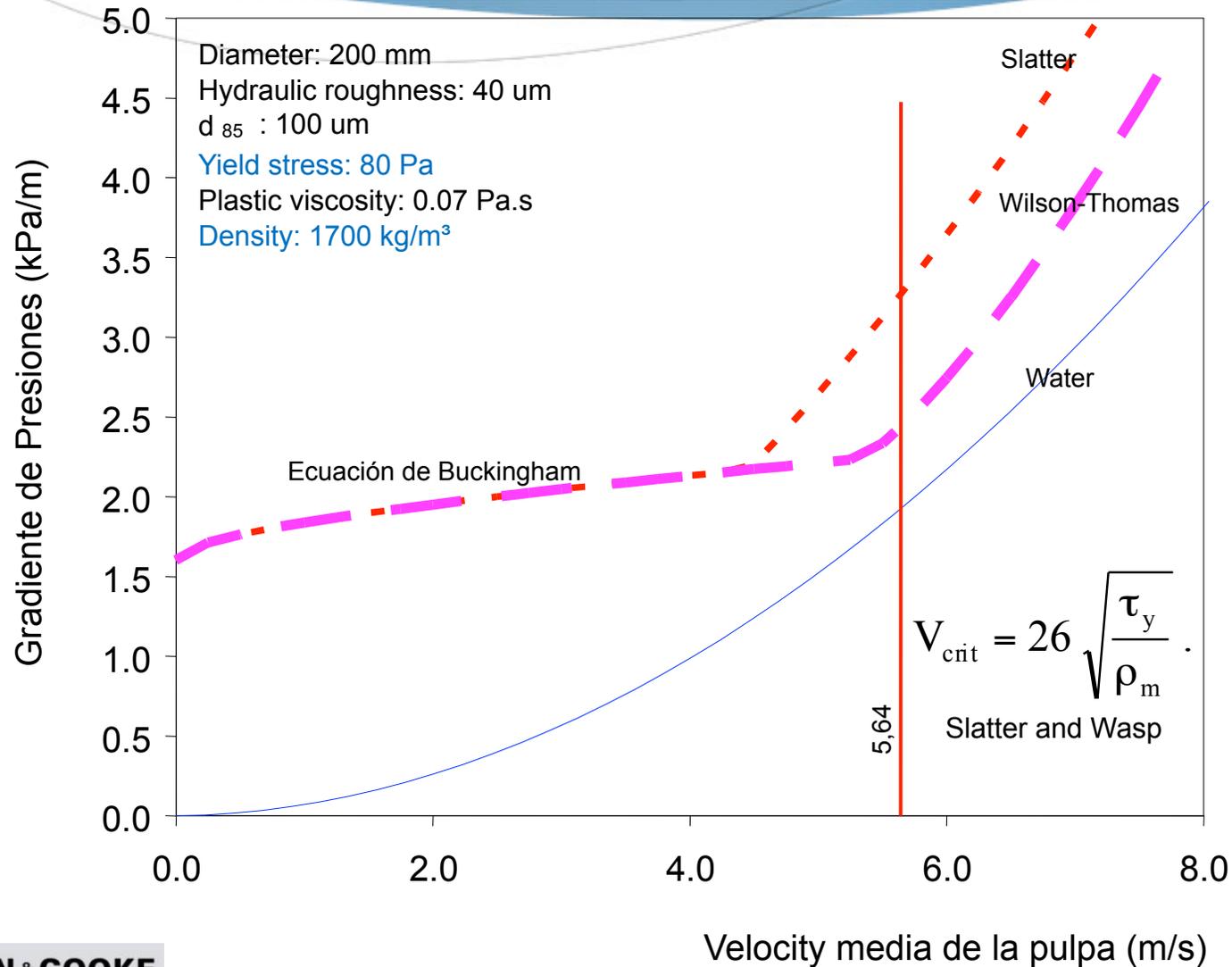
# Aspectos Claves en el Transporte de Pulpas Espesadas

## 4.2 Pulpas Homogéneas – No Newtonianas

# Pulpas No-Newtonianas – Regiones de Interés



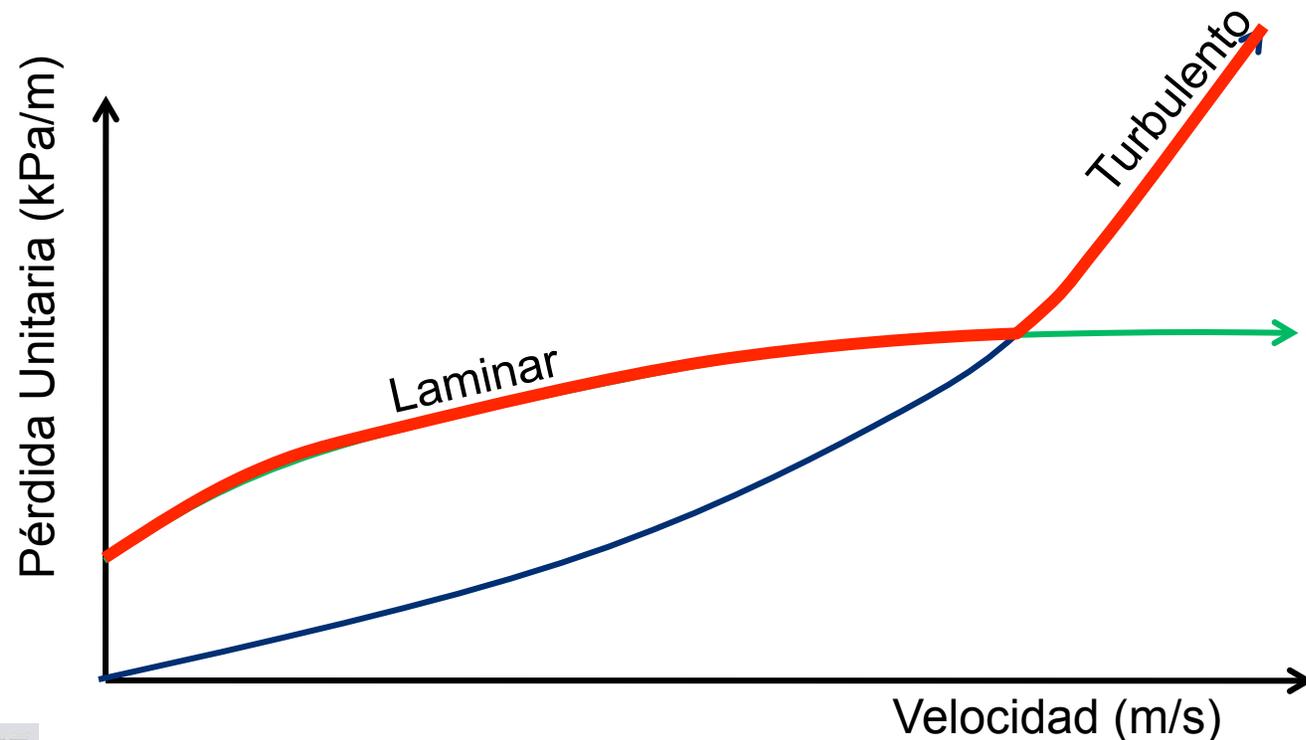
# Velocidad de Transición



# Transición Laminar/Turbulento

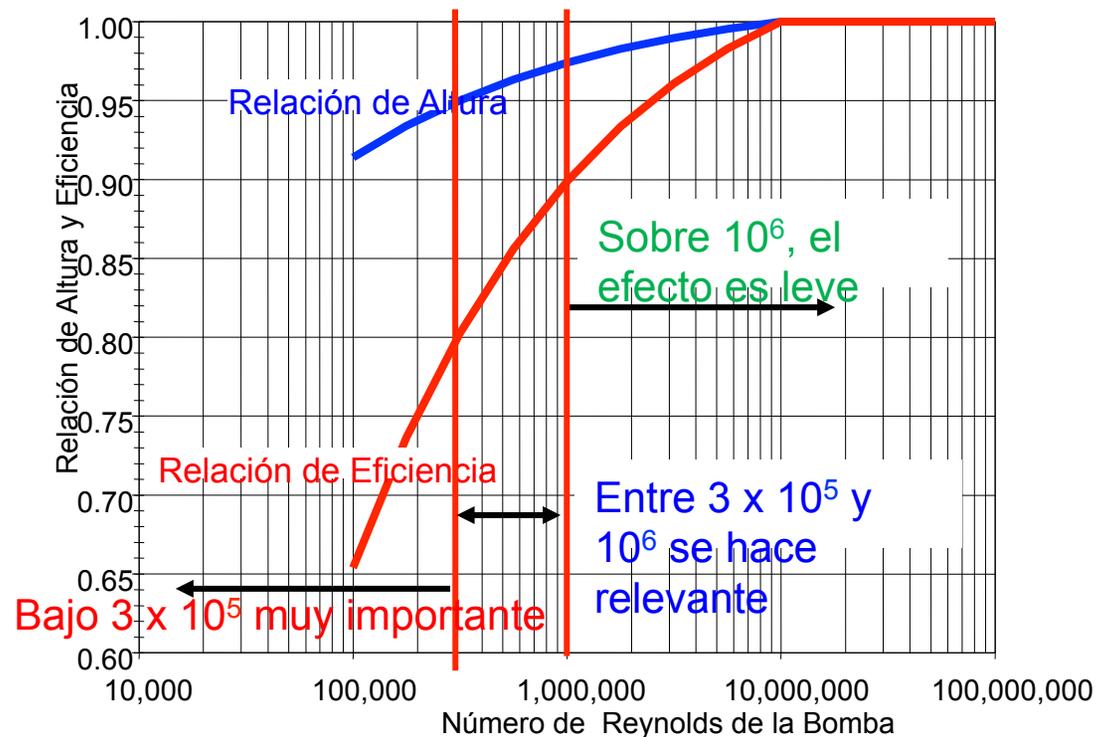
## ◆ Método de la Intersección

- ◆ Calcular la curva de flujo laminar (ec. de Buckingham)
- ◆ Calcular la curva de flujo turbulento (usar diferentes modelos)
- ◆ Intersección de las dos curvas



# Derrateo de Bombas

- 🟢 Walker and Goulas (1984)
  - 🟢 Basado en datos experimentales
  - 🟢 Mediciones en un rango amplio
  - 🟢 Utiliza el Número de Reynolds como base.



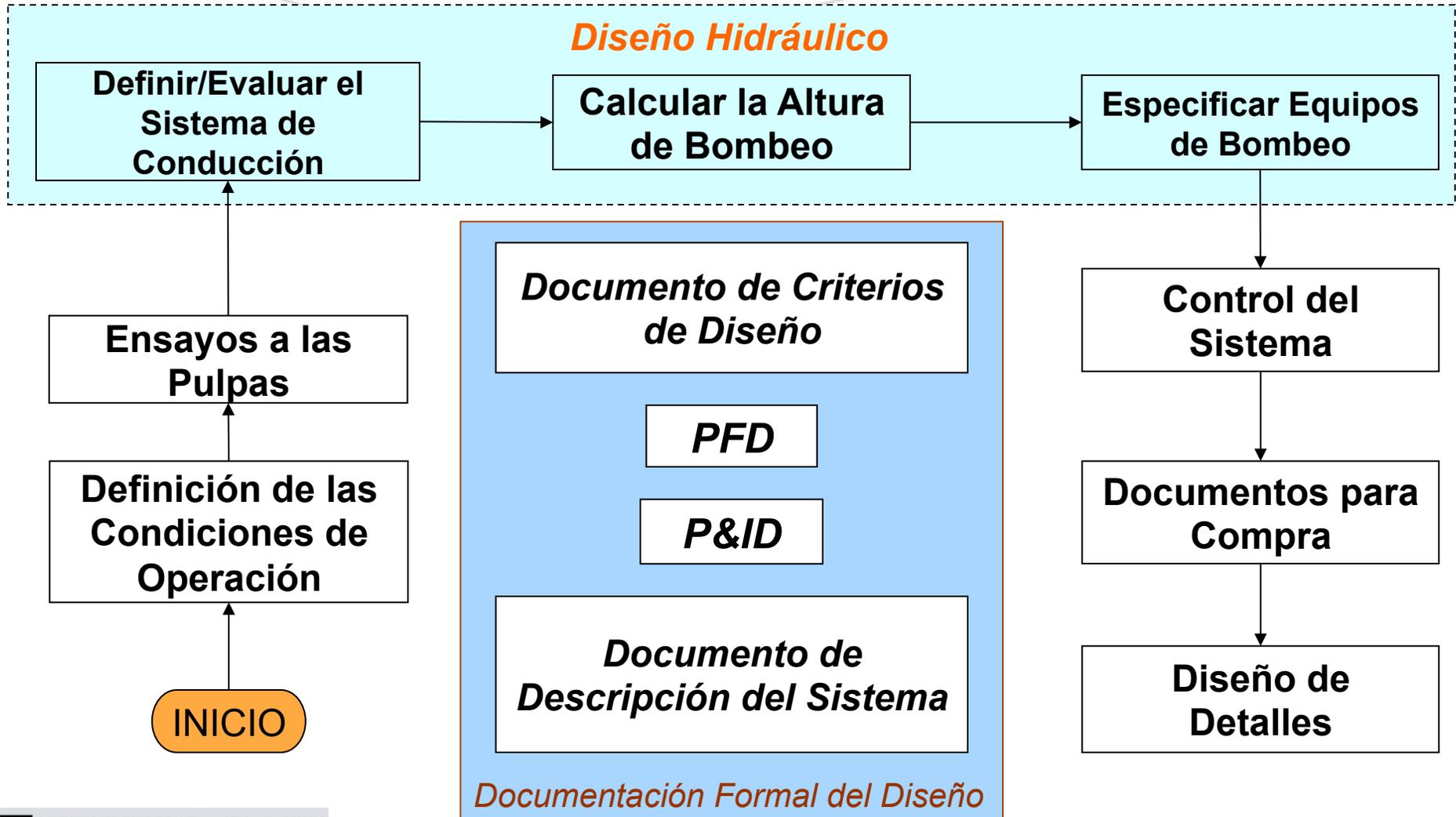
# Pulpas No Newtonianas - Diseño

- ◆ Para un determinado tamaño de tubería
  - ◆ Determinar la velocidad de transición
  - ◆ Es el flujo laminar o turbulento?
  - ◆ Calcular las pérdidas por fricción
  - ◆ Determinar las condiciones de trabajo de la bomba
- ◆ Evaluar el derrateo de la bomba
  - ◆ Método de Walker and Goulas
- ◆ Seleccionar la mejor combinación de tuberías, bombas y potencia y contenido de sólidos, para satisfacer los requerimientos del proyecto.

# Aspectos Claves en el Transporte de Pulpas Espesadas

## 5. Diseño Hidráulico en Tuberías

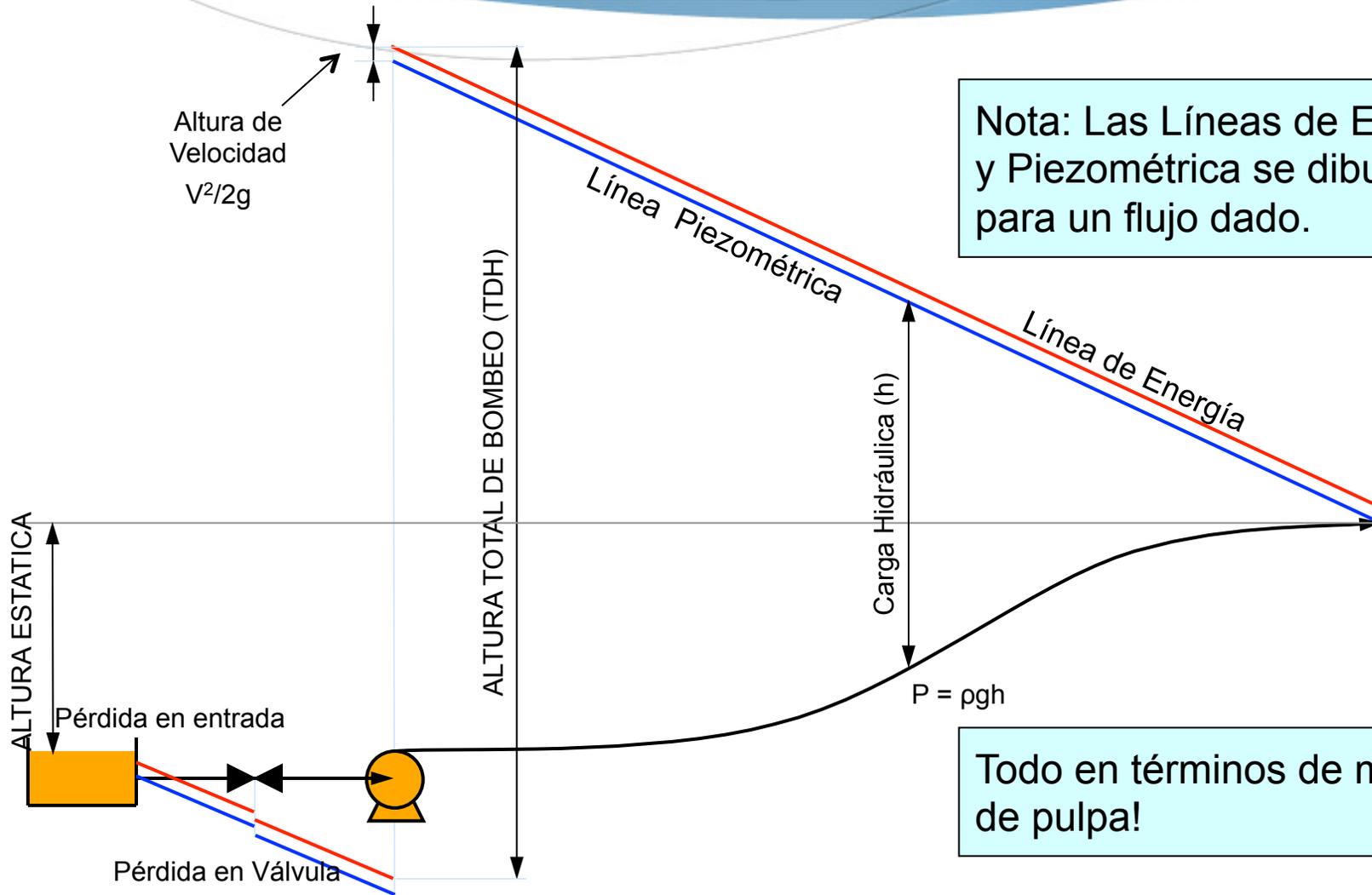
# Proceso de Diseño de un Sistema

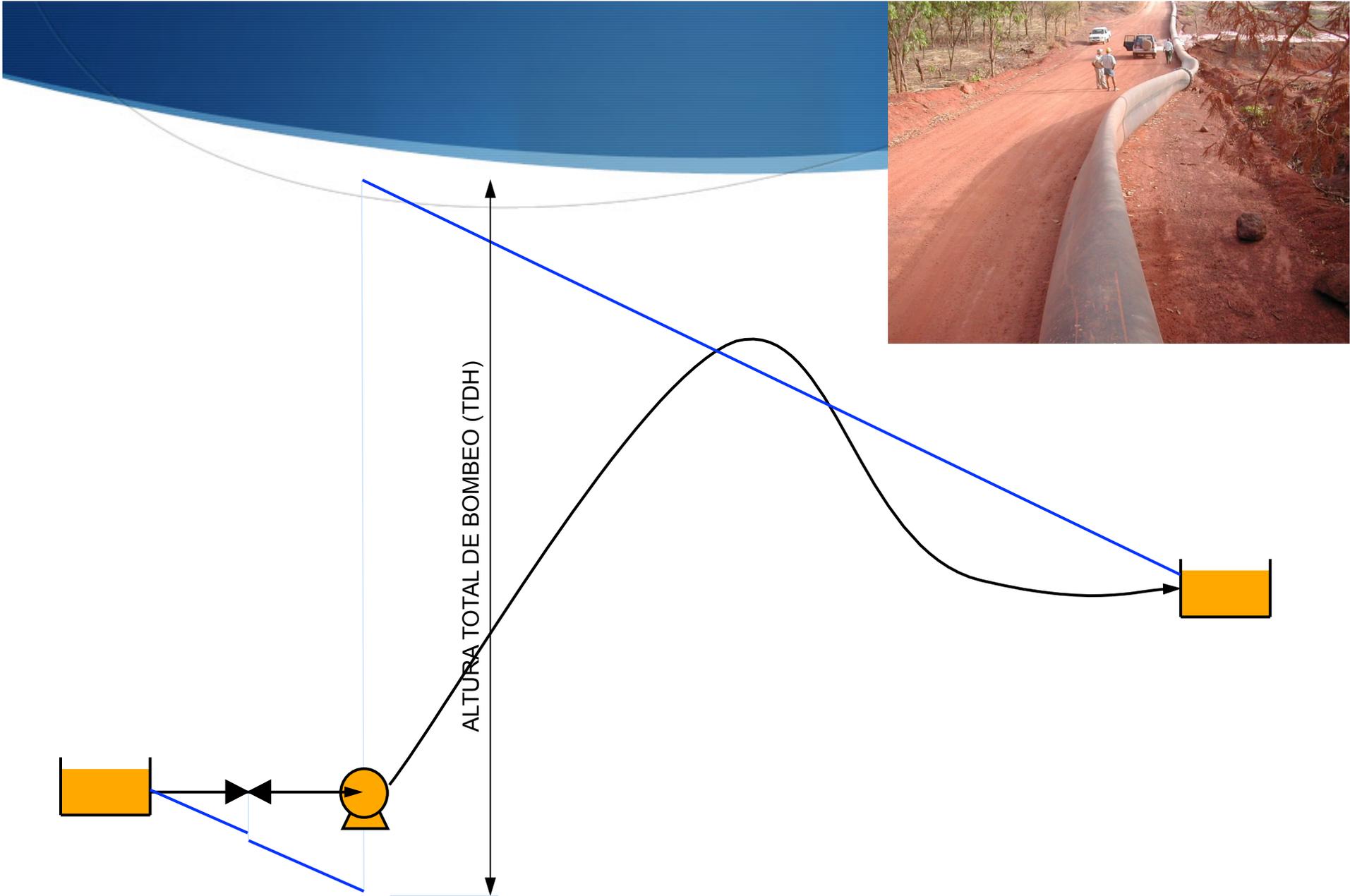


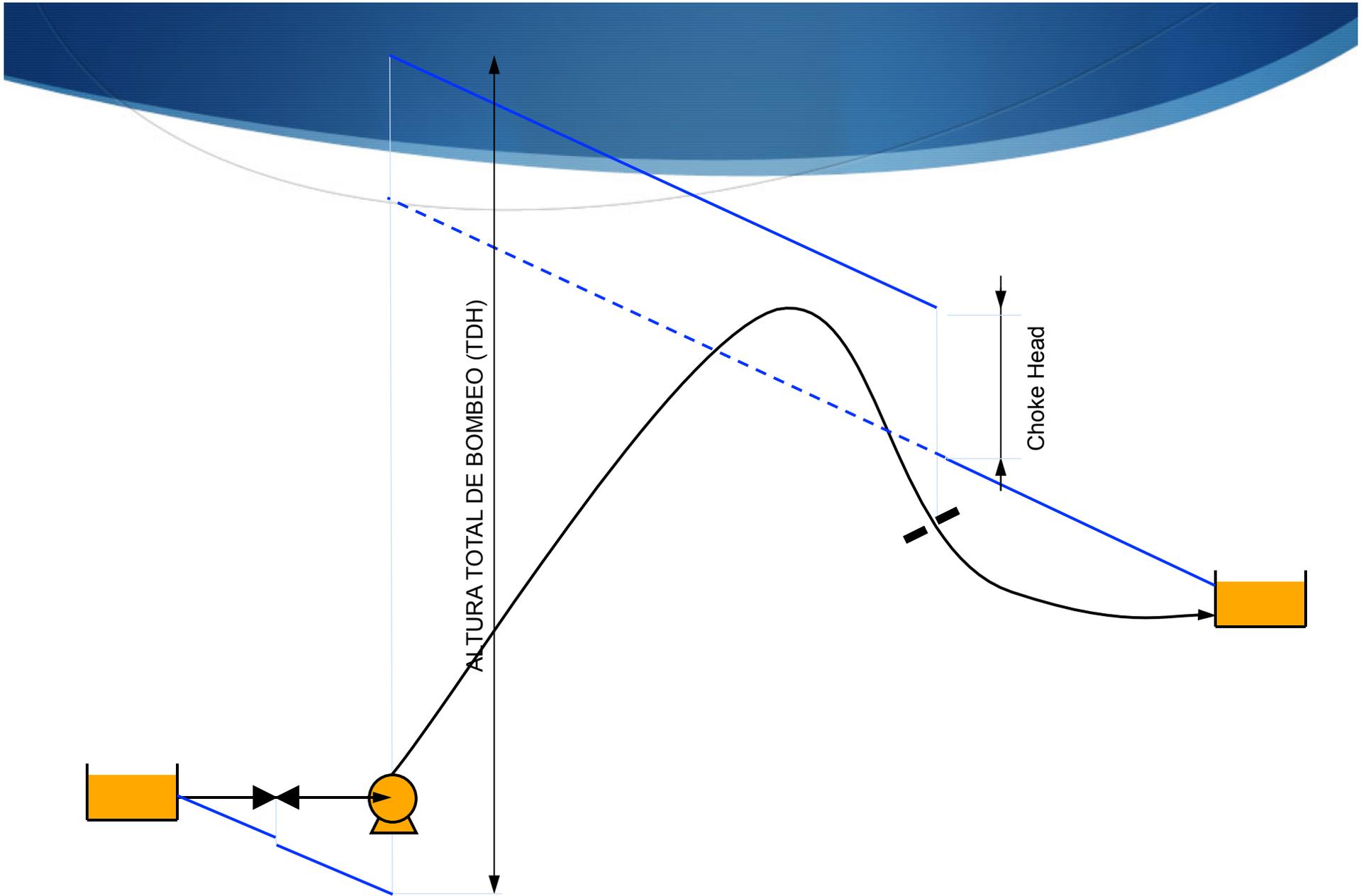
# Selección del Diámetro de la Tubería

- ◆ El diámetro de la tubería se elige de modo que la velocidad de flujo sea mayor que:
  - ◆ La velocidad de deposición (régimen turbulento)
  - ◆ La velocidad de transición laminar/turbulento.
  
- ◆ Las conducciones por tuberías se diseñan generalmente evitando la operación en régimen laminar, debido al riesgo de la segregación de partículas.

# Línea Piezométrica







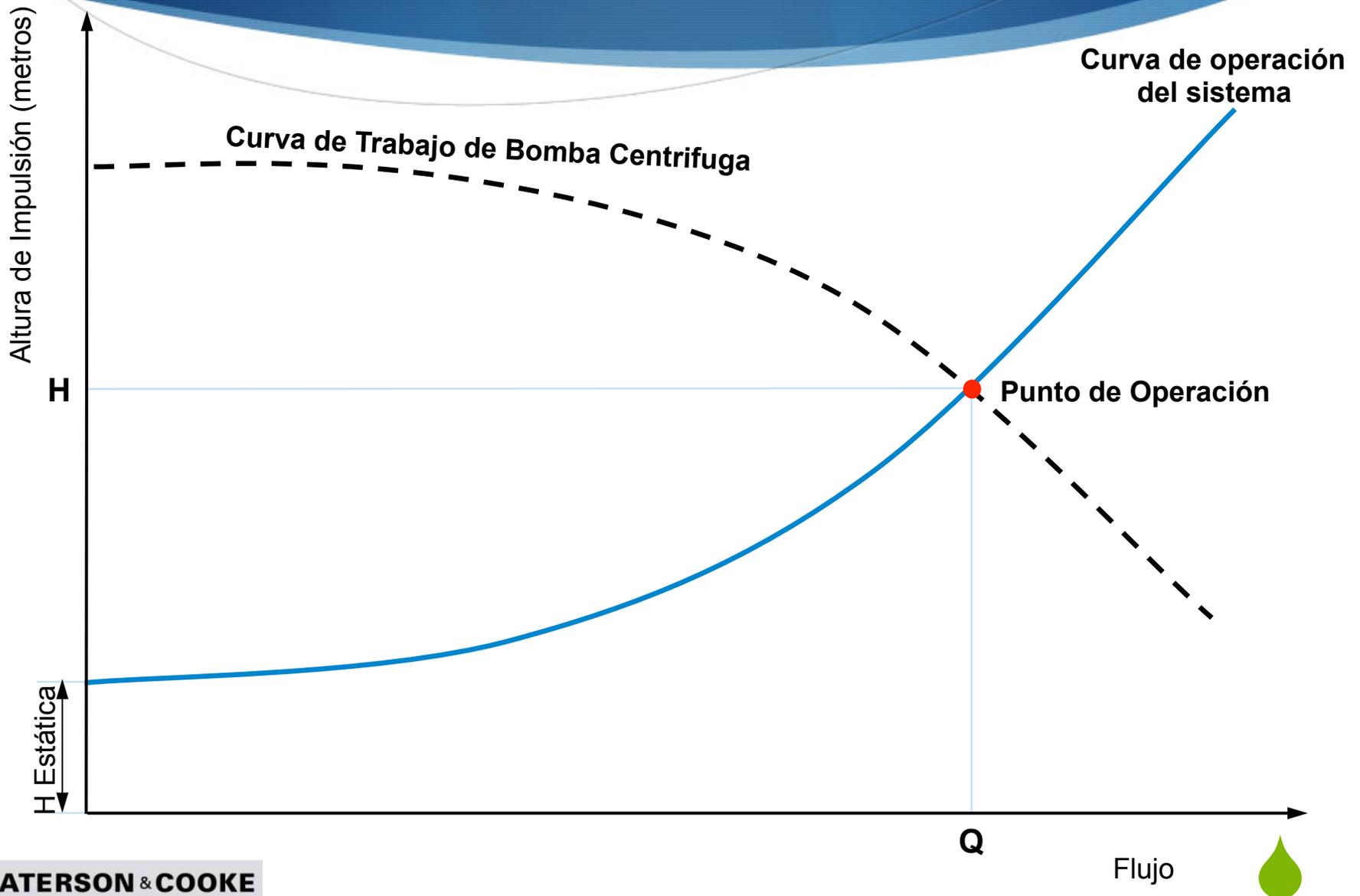
# Choke Station



# Línea Piezométrica

- La Línea Piezométrica resulta una importante herramienta para el entendimiento gráfico del funcionamiento de un sistema de transporte por tuberías.
- La gráfica de la Línea Piezométrica permite una rápida identificación de:
  - Sobrepresiones en la tubería
  - Condiciones de vacío en la línea, que pueden llevar a problemas .
  - Operación del sistema cuando opera con agua empaquetada.
- Permite visualizar posibles problemas de cavitación y NPSH.

# Curva de Operación de Bombas



# Aspectos Claves en el Transporte de Pulpas Espesadas

## 6. Consideraciones Especiales

6.1 Reducción Reológica por Agitación

6.2 Segregación en Régimen Laminar

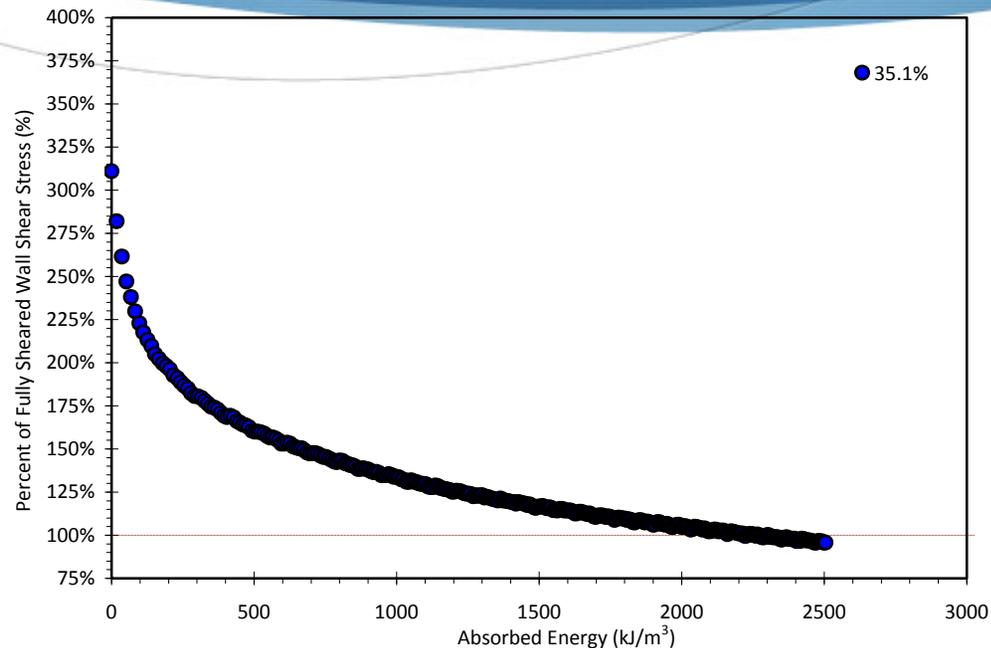
6.3 Reología de Diseño

# Reducción Reológica por Agitación

- La floculación crea estructuras de cadenas con los finos de la pulpa
- La acción de agitación rompe los enlaces, liberando agua atrapada.
- Esto resulta en una reducción de la reología de la pulpa.
- Este fenómeno se denomina Reomalaxis (generalmente irreversible).



# Reducción Reológica Inducida por Agitación

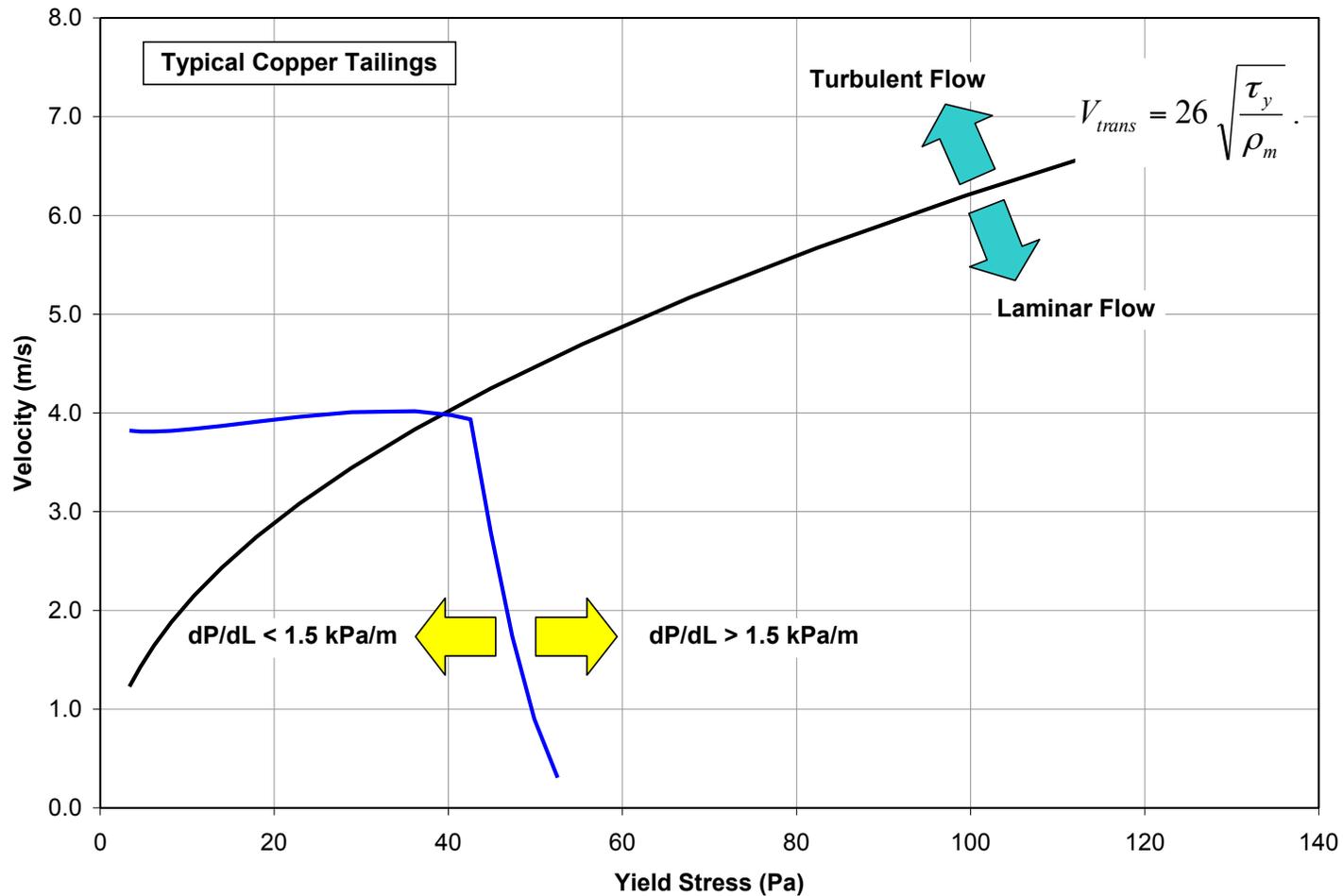


- Importantes implicancias en el diseño de:
  - Sistemas de descarga de espesadores (reología mas adversa)
  - Sistemas de conducción en presión, tuberías y bombas
  - Sistemas gravitacionales (muy sensible a los cambios reológicos)

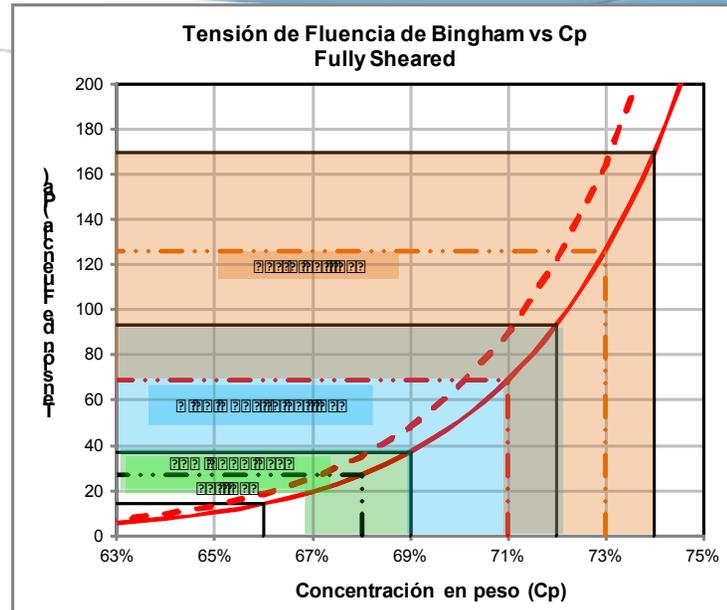
# Segregación en Régimen Laminar

- Operación en Régimen Laminar
  - La pulpa se segregará (los gruesos se ubicarán en el fondo)
- Para evitar los problemas de la segregación en régimen laminar:
  - Operar en régimen turbulento
  - O bien operar con un gradiente de presión mayor a 1,5 kPa/m.

# Segregación en Régimen Laminar



# Reología de Diseño



- Es muy importante establecer una envolvente de reología para el diseño de cada sistema:
  - La reología máxima define la transición de laminar a turbulento
  - La reología mínima define la máxima pérdida de carga en régimen turbulento

## Gran Conclusión

**“El convencimiento final es que el concepto clave para el diseño de sistemas de transporte de relaves espesados, que operen de modo confiable se basa, no en la selección de materiales exóticos o el diseño de equipos especiales, sino que en el entendimiento y control del entorno de la pulpa”**

*Edward Wasp*

# ASPECTOS CLAVES EN EL TRANSPORTE DE PULPAS ESPEPADAS

*Gracias*

*Ray Martinson* [RayM@Patersoncooke.com](mailto:RayM@Patersoncooke.com)