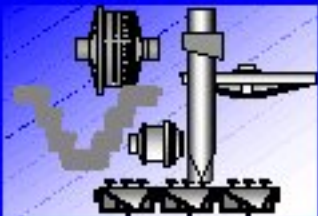




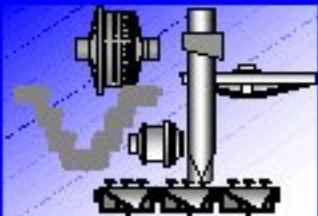
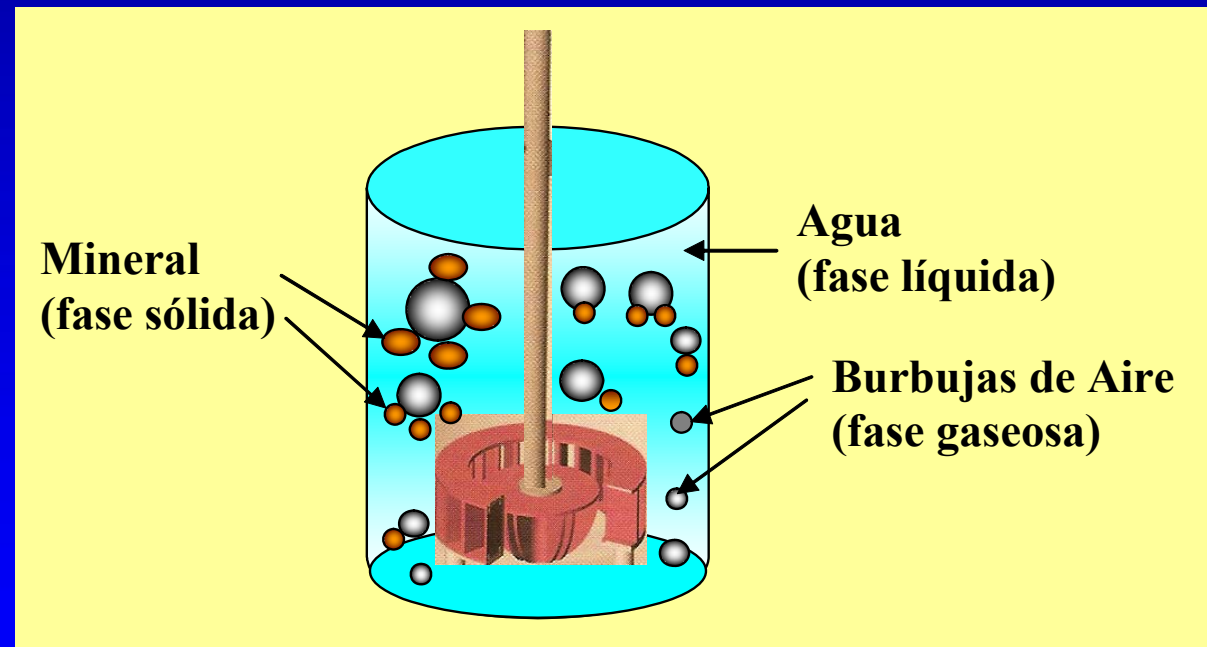
Fundamentos de flotación de minerales



Flotación

La flotación es un proceso heterogéneo, es decir, involucra más de una fase: sólido (mineral), líquido (agua) y gaseosa (burbujas). Para entender el proceso, es necesario estudiar las **propiedades fisicoquímicas** de las **superficies** de los minerales, la relación entre las fases sólida, líquida y gaseosa, y sus interfases.

❖ Fases:



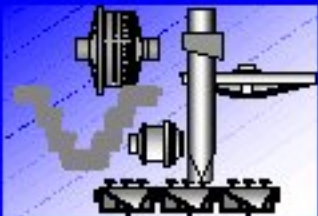
Flotación

➤ *Fase Gaseosa:*

Constituida **generalmente** por **aire** (en algunos casos por otro gas), que se introduce y dispersa en la forma de pequeñas **burbujas**.

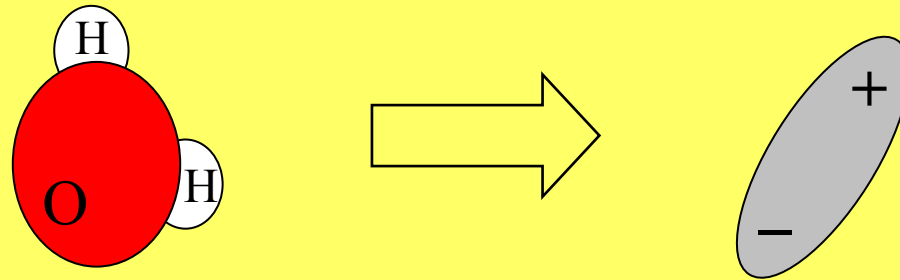
➤ *Fase Líquida:*

Está constituida por **agua** con **reactivos**. El agua es **polar**, siendo ésta la causa de la hidratación superficial de algunos minerales en soluciones acuosas. Contiene generalmente iones (Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , $\text{SO}_4^{=}$, etc.), impurezas y contaminantes naturales. La dureza del agua, i.e. la contaminación natural causada por sales de calcio, magnesio y sodio, puede cambiar completamente la respuesta de la flotación en algunos casos, ya sea por consumo excesivo de reactivos o formación de sales insolubles.

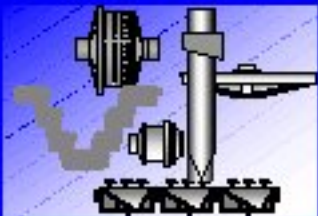


Flotación

Naturaleza polar del agua: formación de dipolos.



El oxígeno es un muy buen captador de electrones en la molécula (electronegatividad alta), por lo tanto atrae los electrones del hidrógeno exponiendo así sus protones (+). Esto genera un **dipolo**: una molécula con un extremo negativo y el otro positivo.

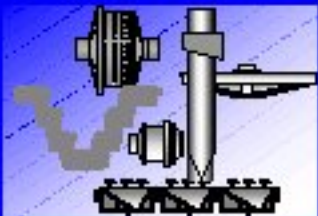


Flotación

➤ *Fase Sólida:*

Está constituida por **partículas de mineral** finamente molidas. Las propiedades superficiales de los minerales dependen de su composición y estructura. En esta fase juegan un rol importante los siguientes factores:

- Carácter de la superficie creada en la ruptura del sólido (tipo de superficie, fuerzas residuales de enlaces).
- Imperfecciones en la red cristalina natural (vacancias, reemplazos de iones, etc.).
- Contaminaciones provenientes de los sólidos, líquidos y gases (oxidación de la superficie, etc.).
- La presencia de elementos traza, que pueden concentrarse en la superficie de los granos y tener una influencia mucho mayor que su concentración en el mineral.



Flotación

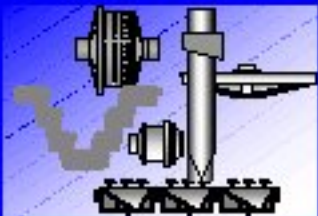
En relación con su afinidad con el agua, los minerales pueden presentar propiedades **hidrofóbicas** (sin afinidad) e **hidrofílicas** (con afinidad), que determinan su flotabilidad natural. Esto está directamente relacionado con su polaridad. Se tiene así:

- **Minerales Apolares:**

Son **hidrofóbicos** (no reaccionan con los dipolos del agua), ejemplo: azufre nativo, grafito, molibdenita y otros sulfuros. En estos minerales su estructura es simétrica, no intercambian electrones dentro de sus moléculas, no se disocian en iones, son en general químicamente inactivos y con enlaces covalentes.

- **Minerales Polares:**

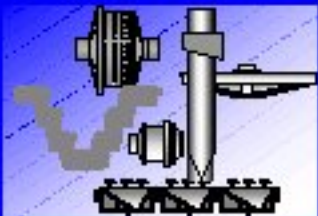
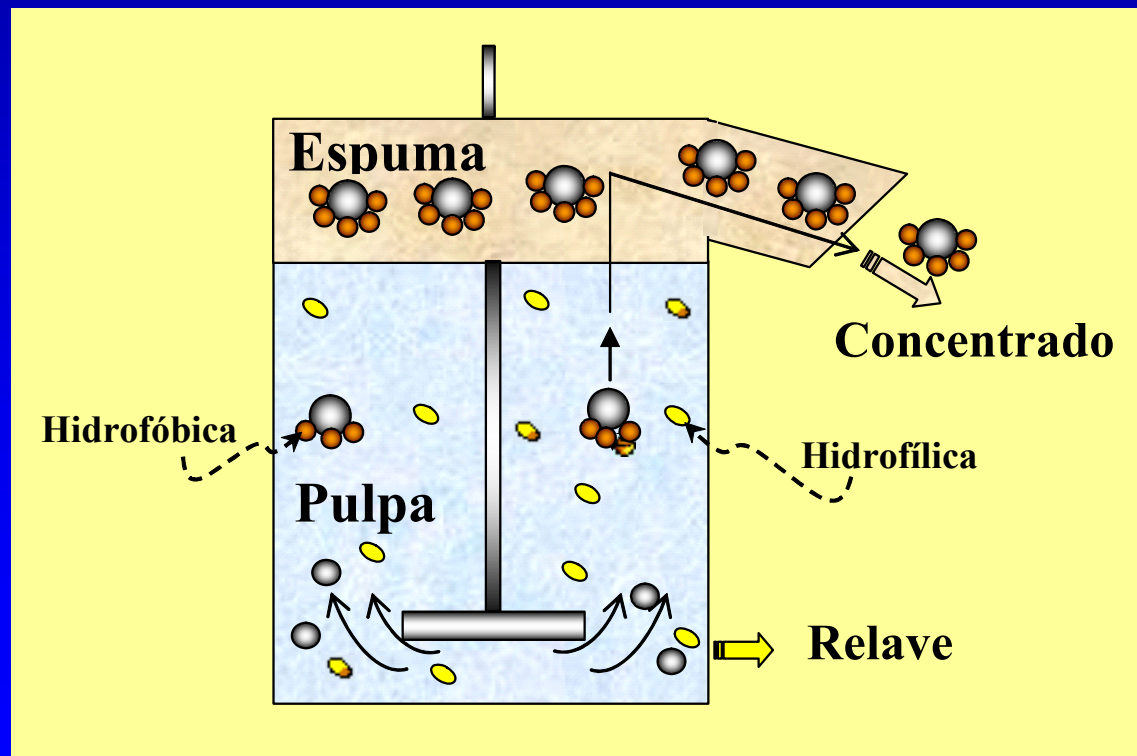
Son **hidrofílicos** (los sólidos tienen la capacidad de hidratarse), ejemplo: óxidos. En estos minerales su estructura es asimétrica, intercambian electrones en la formación de enlaces (enlace iónico) y tienen extraordinaria actividad química en general.



Flotación

❖ Separación selectiva de minerales (flotación)

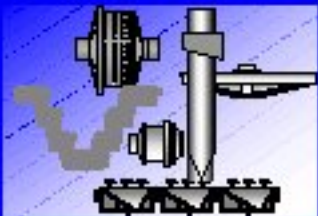
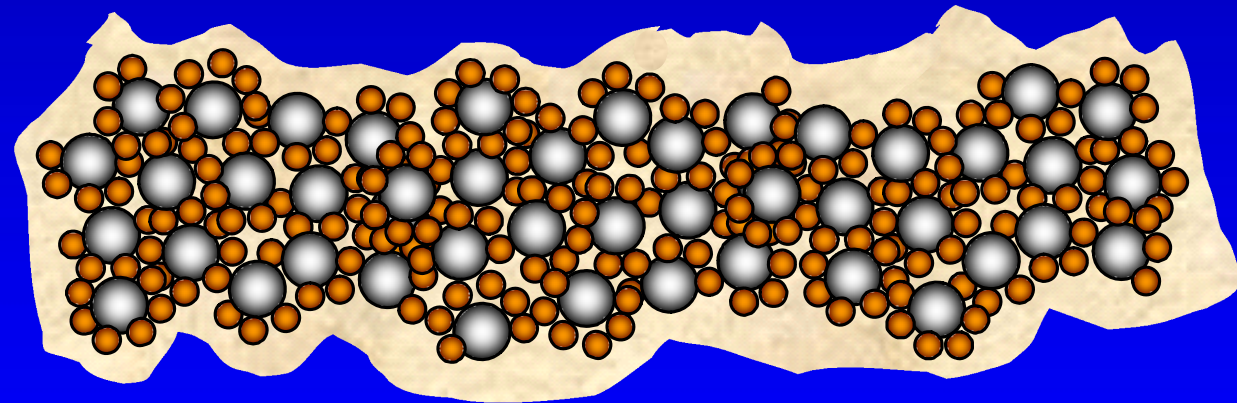
Al coexistir las tres fases, las **partículas hidrofóbicas** “preferirán” adherirse a la **fase gaseosa** (burbujas), evitando así el contacto con el agua, mientras que las demás permanecerán en la fase líquida. Las burbujas con partículas adheridas y una densidad conjunta menor que la del líquido, ascenderán hasta llegar a la espuma.



Flotación

El agregado **burbuja – partículas** debe lograr mantenerse tras dejar la superficie de la pulpa e ingresar a la fase espuma. El conjunto de agregados burbuja – partículas, en la superficie, debe adquirir la forma de una **espuma estable** para posibilitar su remoción.

Espuma



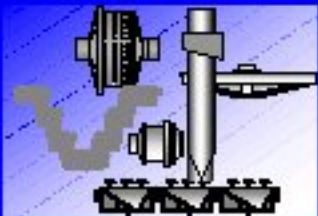
Flotación

❖ Interfases

Los fenómenos que ocurren en flotación son interacciones fisicoquímicas específicas entre elementos y compuestos de las distintas fases. Esto ocurre a través de las tres interfases posibles: *Gas – Líquido*, *Sólido – Líquido* y *Sólido - Gas*.

➤ Termodinámica de Interfases

En cualquier interfase se genera una fuerza de tensión característica en el plano de la interfase. Esta fuerza de tensión se denomina “**Tensión Interfasial**” o “**Tensión Superficial**” y puede ser considerada igual a la energía libre de superficie.



Flotación

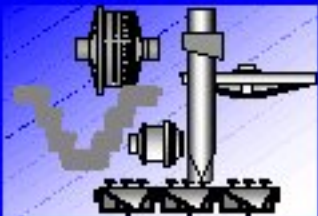
Tensión Superficial (γ)

La tensión superficial es definida termodinámicamente como el trabajo reversible (W) que debe realizarse en orden a incrementar el área de la interfase en 1 cm². La tensión superficial entonces es numéricamente igual a la energía libre de Gibbs por unidad de área y se puede expresar como sigue:

$$\gamma = \left[\frac{dW}{dA} \right]_{T,P,n}$$

unidades: (dinas/cm), (ergs/cm²)

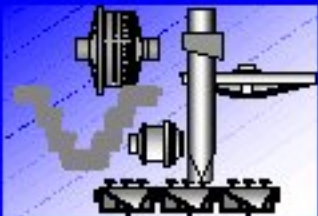
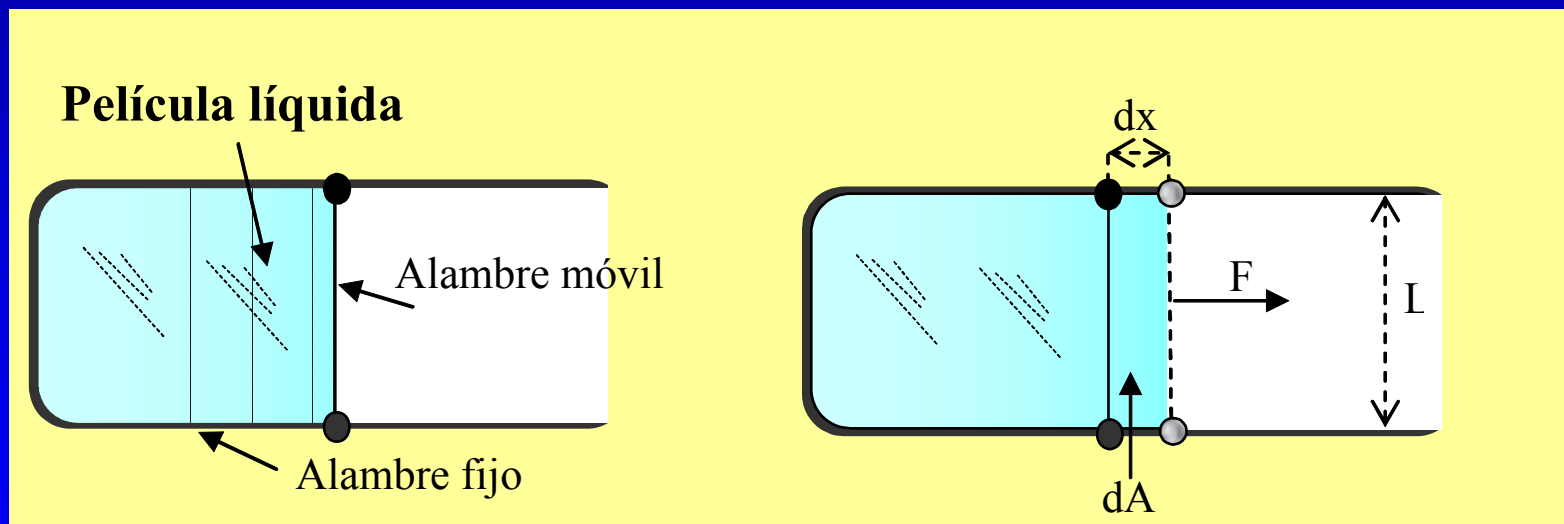
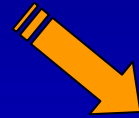
En otras palabras, la **tensión superficial es el costo energético asociado a incrementar en una unidad el área de interfase.**



Flotación

Tensión Superficial, “ γ ”:

Ilustración del concepto



Flotación

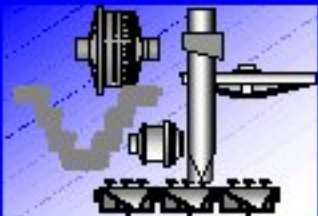
Para aumentar el área de la película de líquido en dA , debe realizarse una cantidad proporcional de trabajo. La energía de Gibbs de la película aumenta en γdA . El aumento en la energía de Gibbs implica que al movimiento del alambre móvil se opone una fuerza F . Si el alambre se mueve una distancia dx , el trabajo realizado es $F dx$. Estos dos aumentos de energía son iguales, por lo que:

$$F dx = \gamma dA$$

Si “ L ” es la longitud de la parte móvil, el aumento en área, como la película tiene dos lados, es $2 (L dx)$. Por lo tanto la tensión superficial del líquido puede expresarse como:

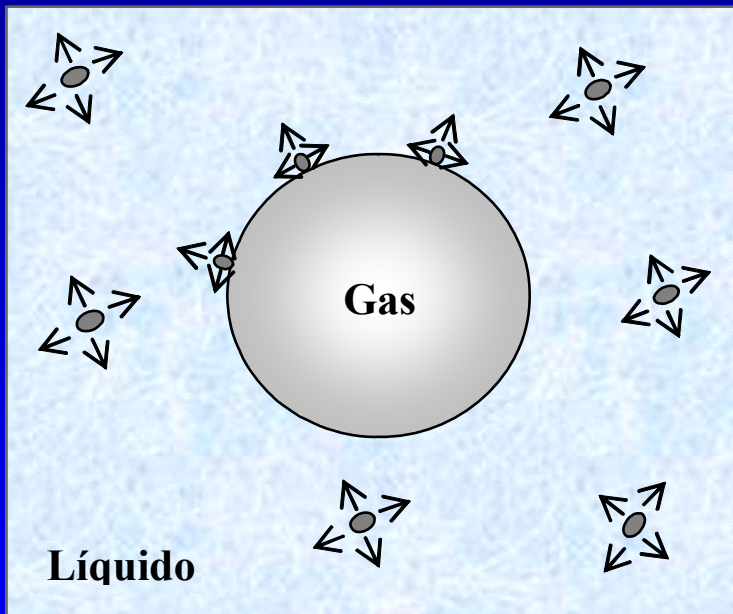
$$\gamma = \frac{F}{2L}$$

La tensión superficial actúa como una fuerza que se opone al aumento en área del líquido. Las unidades son: N/m, dinas/cm, Joules/m²



Flotación

Las moléculas de agua, en el seno del líquido, interactúan entre sí en todas direcciones. Esto no es válido para aquellas que están en la interfase burbuja – agua, en donde el desbalance genera la energía superficial cuya magnitud se mide en la tensión superficial.

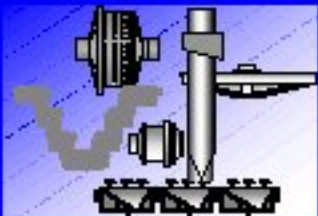


Un análisis del equilibrio de presiones en ambos lados de la interfase líquido – gas, permite determinar que la **presión interna en una burbuja** (P_B) es:



ρ = densidad del líquido
 h = altura a la interfase
 r = radio de la burbuja
 P_A = presión atmosférica

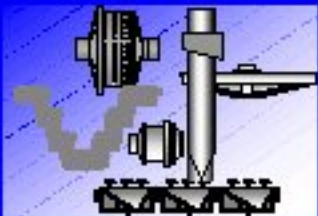
$$P_B = P_A + \rho g h + 2 \frac{\gamma}{r}$$



Flotación

➤ Superficie de sólidos

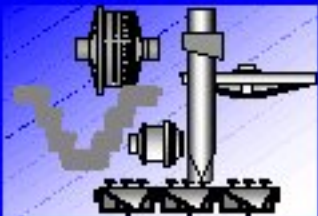
Cuando se trata de la superficie de sólidos, es más apropiado hablar de **energía libre superficial**. En los sólidos cristalinos se produce una polarización y deformación de los iones de la superficie debido a la asimetría de la configuración espacial anión – catión en las cercanías de dicha superficie, esto permite la ocurrencia de fenómenos como la **adsorción**, el **mojado** y la nucleación.



Flotación

➤ Adsorción

Se denomina **adsorción** al fenómeno de acumulación de materia en una superficie (interfase), lo que produce, en la interfase, una concentración diferente a la de dicha materia lejos de la interfase. Cuando la concentración es mayor en la interfase se dice que la **adsorción es positiva** (ej. **espumantes y colectores**), en el caso contrario se habla de **adsorción negativa** (ej. **sales**).



Flotación

La adsorción en una interfase es descrita por la ecuación de adsorción de **Gibbs** como:

$$\Gamma_i = -\frac{1}{RT} \left(\frac{d\gamma}{d \ln C_i} \right)$$

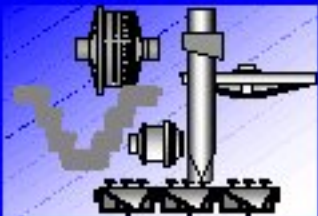
Γ_i = Adsorción relativa del componente i (densidad de adsorción).

C_i = Concentración del componente i

T = Temperatura absoluta

R = Constante de los gases

“Si disminuye la tensión superficial la adsorción aumenta” (adsorción positiva).

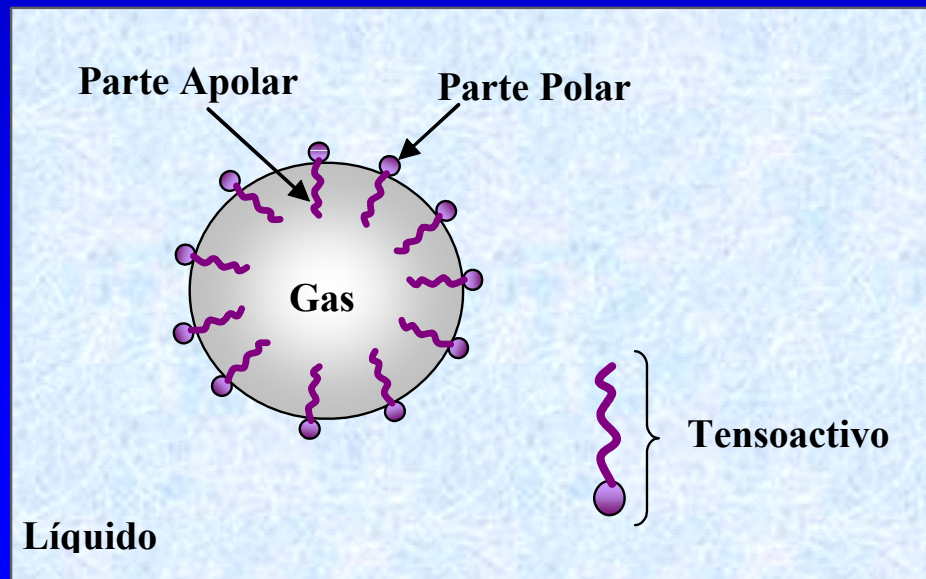
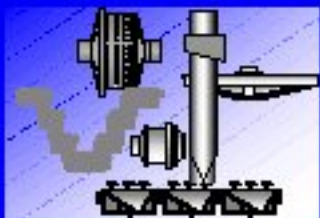


Flotación

Los dos casos de adsorción de mayor interés en flotación son aquellos en la interfase gas – líquido (**aire – agua**) y en la interfase sólido – líquido (**mineral – agua**). También ocurren en la fase gas – sólido (oxidación superficial de minerales).

Interfase Gas – Líquido, G-L

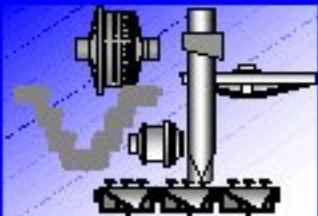
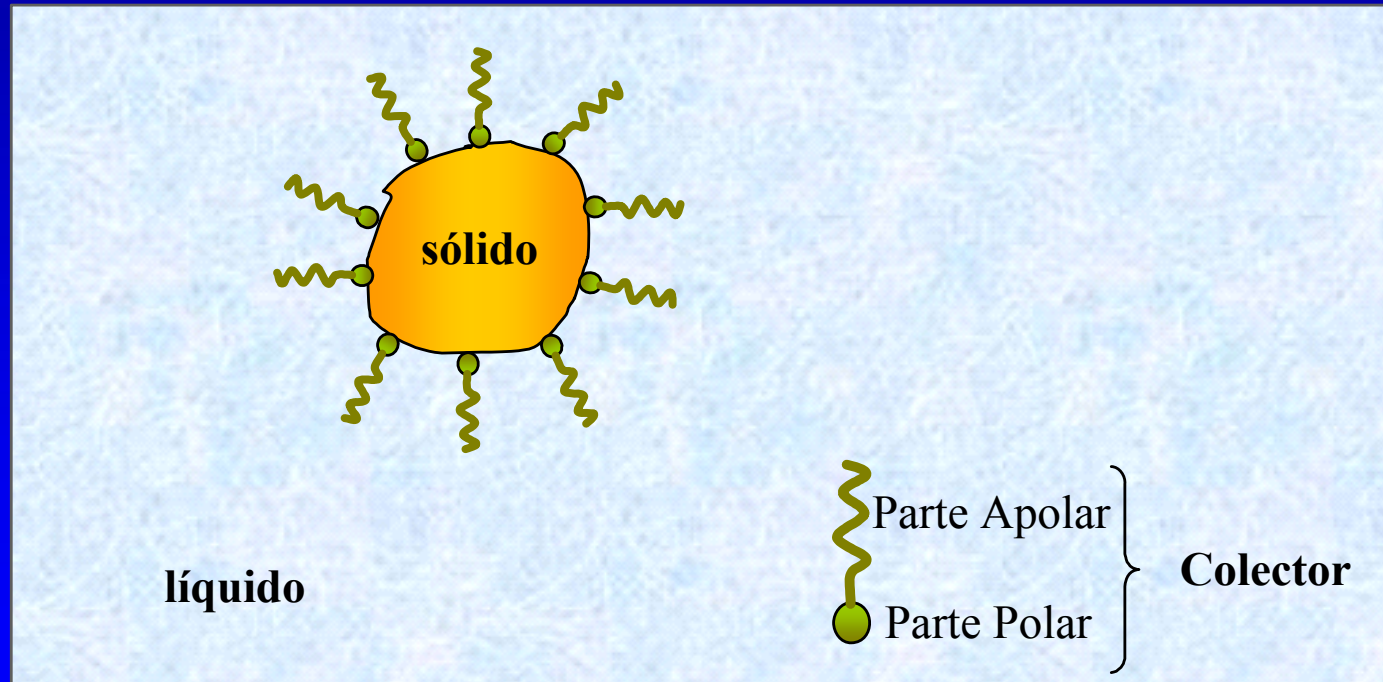
Los compuestos que se adsorben selectivamente en la interfase **G-L** reducen la tensión superficial y reciben el nombre de **tensoactivos**. Los tensoactivos utilizados en flotación son conocidos como **espumantes** por su efecto en la estabilización de la fase espuma. Estos tienen además un efecto en la generación de burbujas de tamaño pequeño.



Flotación

Interfase Sólido – Líquido, S-L

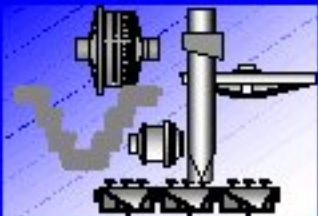
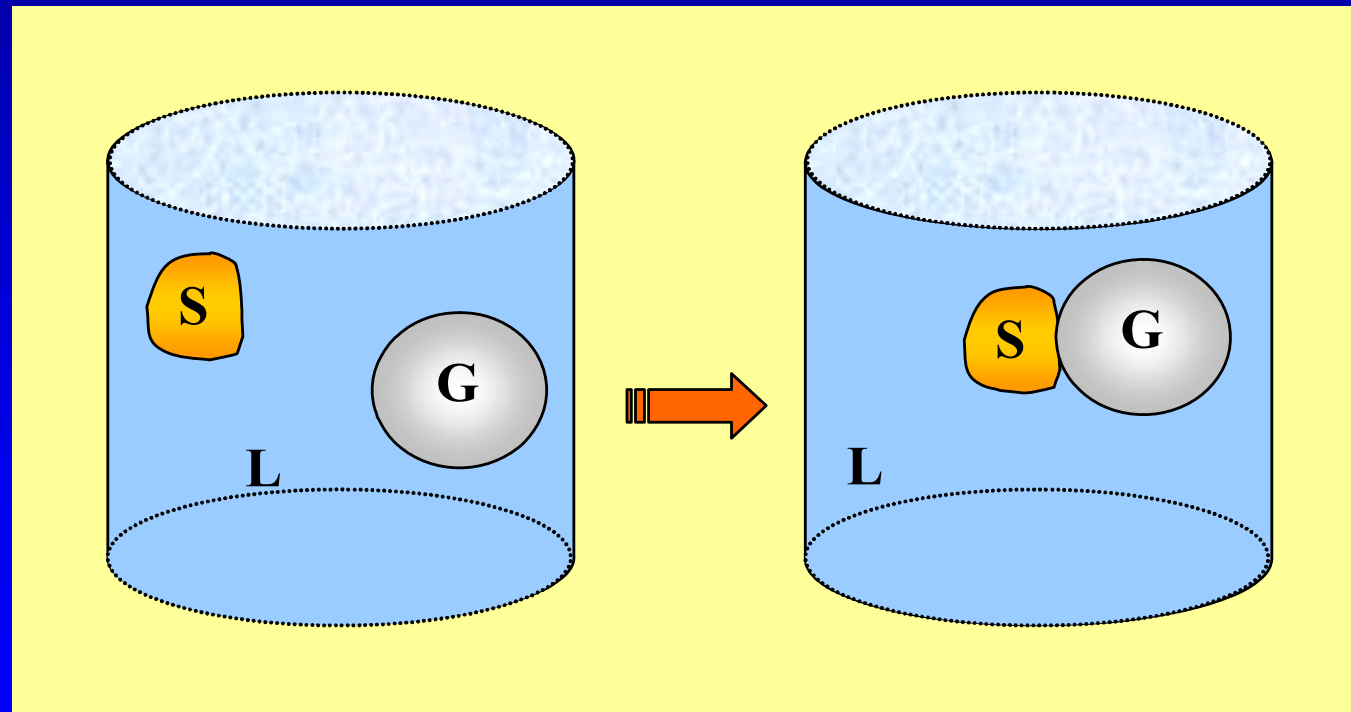
Otros reactivos que se usan en flotación, llamados **colectores**, son compuestos que se adsorben en la superficie de los minerales produciendo la **hidrofobización artificial y selectiva** de los minerales de interés. Esto favorece la “colección” de partículas de interés en flotación.



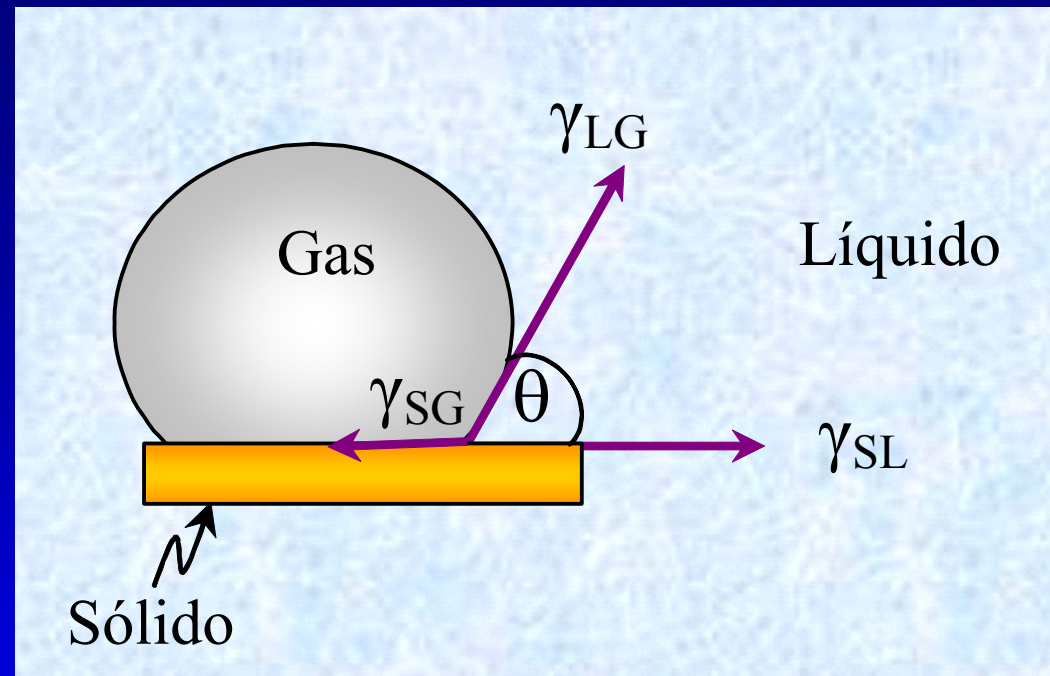
Flotación

➤ Contacto entre fases (S – L – G) y mojabilidad del sólido

En la flotación de una partícula sólida utilizando una burbuja de aire como medio de transporte, la unión entre estos dos elementos se efectúa a través del contacto trifásico (Sólido – Líquido - Gas).

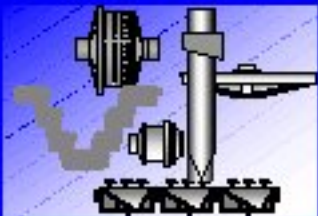


Flotación



Las energías interfasiales “ γ ” de las tres fases en equilibrio se pueden relacionar por la ecuación de Young, con el ángulo de contacto “ θ ”:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta$$

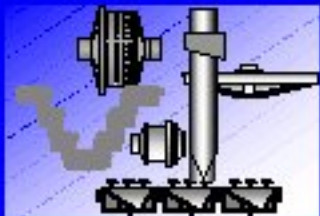


Flotación

➤ **Ángulo de Contacto θ**

Es de suma importancia porque relaciona en forma cuantitativa las propiedades hidrofóbicas de un mineral con su flotabilidad.

Si el sólido es hidrofóbico, ya sea en forma natural o por la adsorción de un colector en su superficie, la película de líquido retrocede hasta una posición en la que las tres tensiones superficiales se encuentren en equilibrio. El ángulo que se genera entre las tensiones interfasiales γ_{LG} y γ_{SL} , se llama ángulo de contacto.



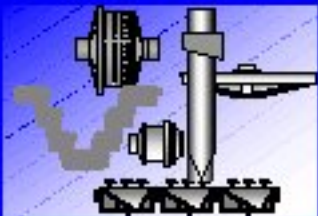
Flotación

El cambio de energía libre por unidad de área correspondiente al proceso de unión partícula-burbuja (desplazamiento del agua por la burbuja de aire) se expresa por la ecuación de Dupre:

$$\Delta G = G_f - G_i = \gamma_{SG} - (\gamma_{SL} + \gamma_{LG})$$

Al sustituir la ecuación de Young en esta ecuación, es posible expresar la energía libre en términos del ángulo de contacto, θ :

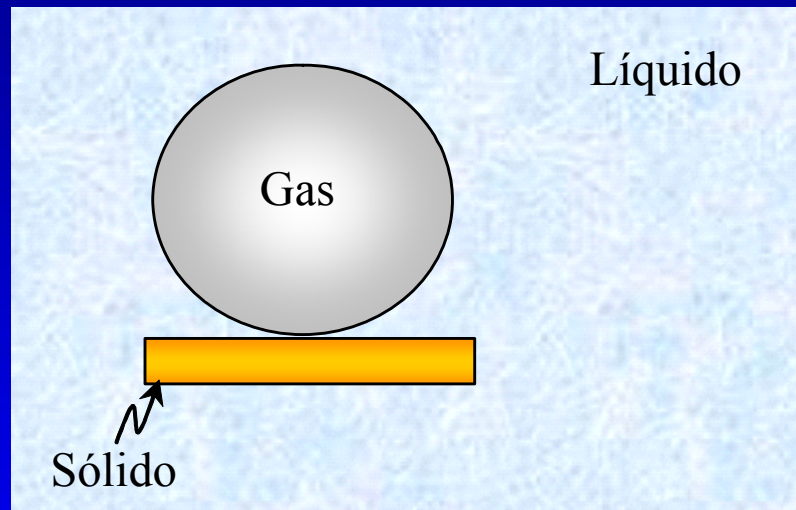
$$\Delta G = \gamma_{LG} (\cos \theta - 1)$$



A mayor **ángulo de contacto**, mayor es la variación de **energía libre** y, por lo tanto, el proceso de adhesión partícula – burbuja es más espontáneo.

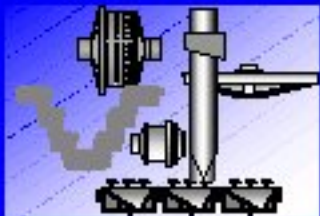
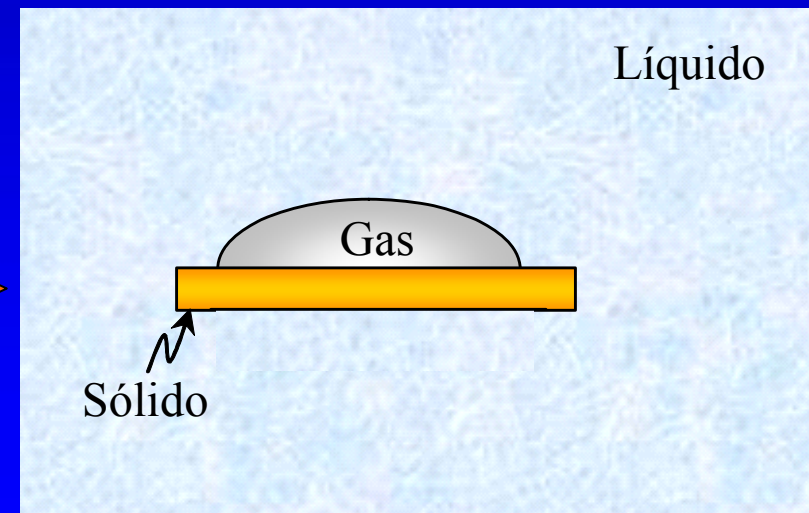
Flotación

Cuando no hay contacto entre las tres fases, θ es cero y, por el contrario, cuando es máxima la afinidad, θ es 180° .



$\theta = 0^\circ \Rightarrow$ afinidad nula (hidrofílico)

$\theta = 180^\circ \Rightarrow$ máxima afinidad (hidrofóbico)

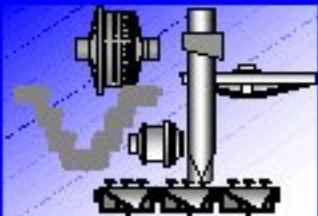


Flotación

❖ Reactivos

La mayoría de los minerales son naturalmente hidrofílicos. Para lograr separarlos por flotación, la superficie de algunos debe ser selectivamente transformada en hidrofóbica. Esto se logra **regulando la química** de la solución y agregando reactivos que se adsorban selectivamente en dicha superficie entregándole características hidrófobas. Estos reactivos se denominan **colectores**.

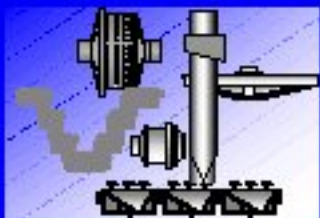
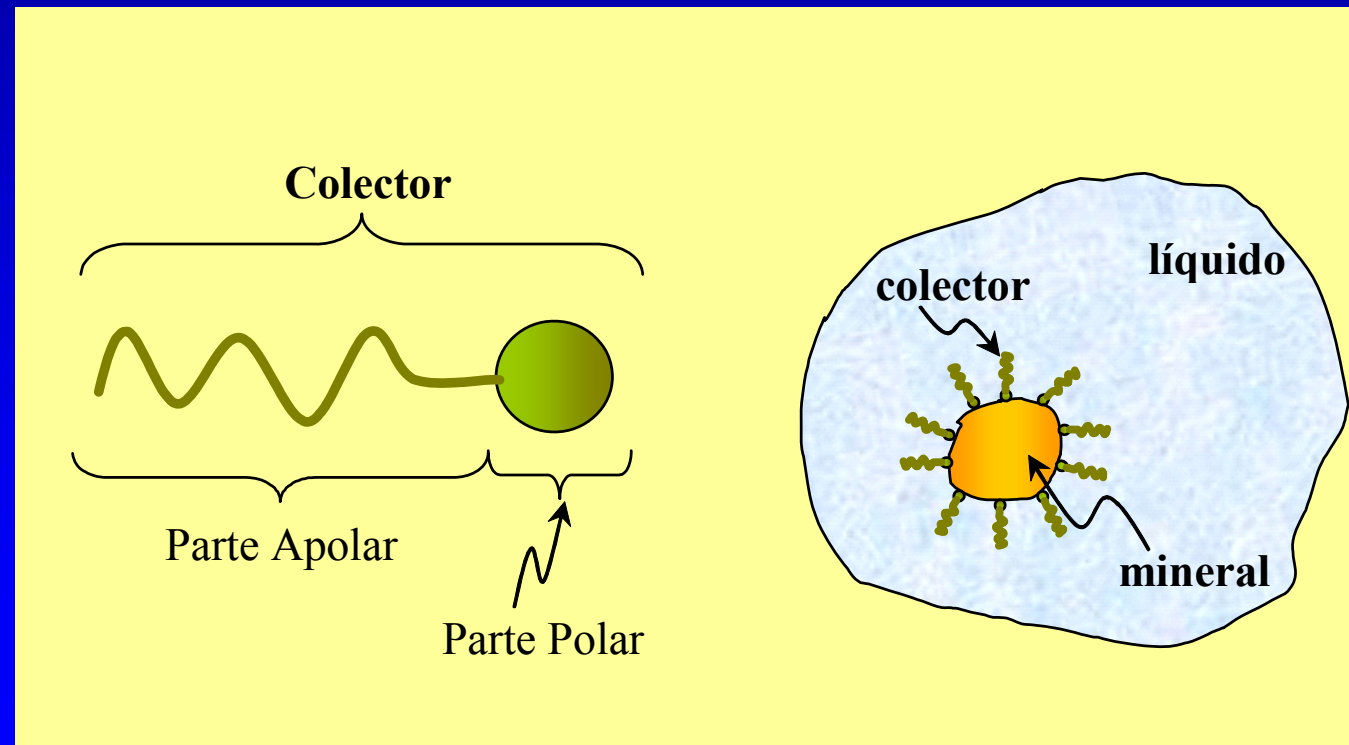
Pocos minerales son hidrofóbicos por naturaleza, tales como la molibdenita, y es posible su flotación sin el uso de colectores, aunque es práctica común ayudarse con colectores suplementarios.



Flotación

➤ Colectores

Compuestos orgánicos cuya función es tornar **hidrofóbicas** las superficies de los minerales. Los más comunes son iónicos siendo compuestos **heteropolares** solubles en agua. Su grupo polar es la parte activa que se adsorbe (física o químicamente) en la superficie de un mineral. La parte apolar se orienta hacia la fase líquida, sin interactuar con ésta.

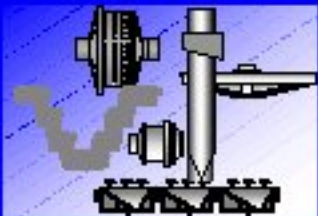
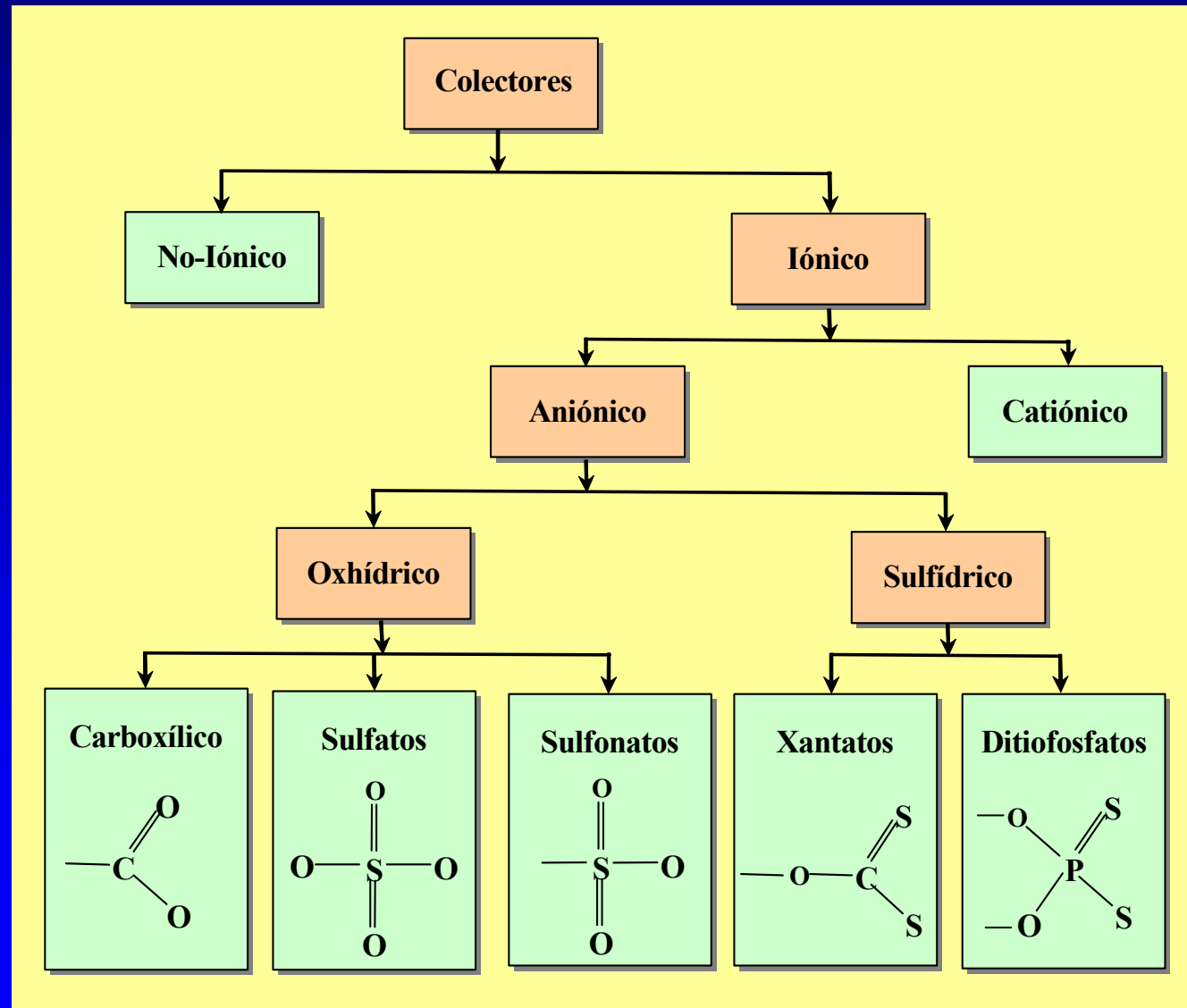


Flotación

Clasificación de los Colectores

♣ Los colectores iónicos son los más comunes, en diversas subcategorías.

♣ Existen también colectores no polares (no ionizados).



(Glembotskii)

Flotación

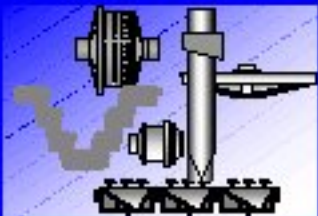
- **Colectores Iónicos**

Contienen un grupo funcional polar hidrofílico unido a una cadena de hidrocarburos.

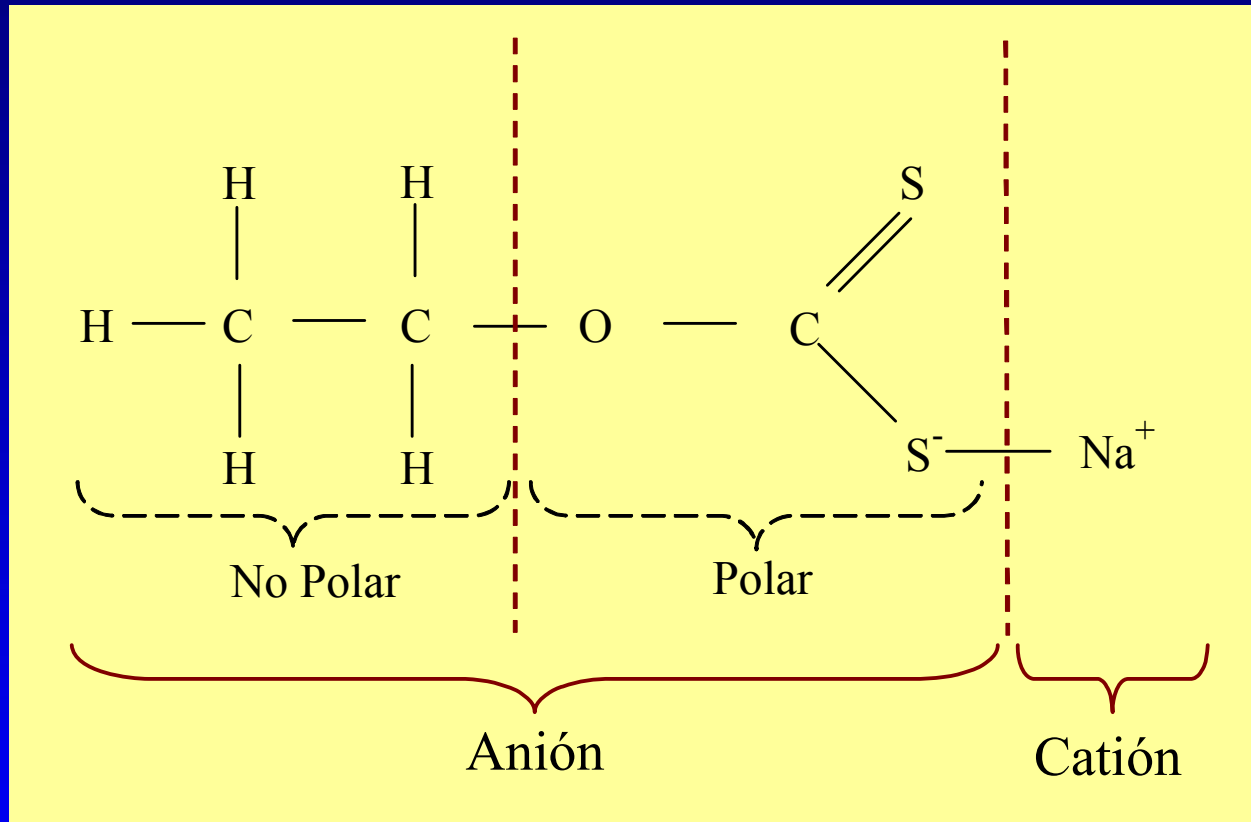
Si al disociarse un colector en agua, su parte principal es un anión o un catión, se distingue dos grupos de colectores: **Colectores Aniónicos** y **Colectores Catiónicos**.

Colectores Aniónicos (constituyen la mayoría)

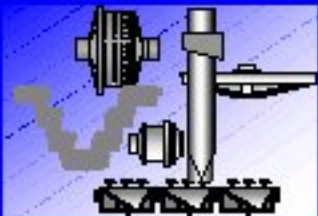
Estos colectores se disocian de modo que sus radicales junto con el grupo polar constituyen un anión (-), dejando en la solución un catión que puede ser sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^+) o el mismo hidrógeno.



Flotación



Estructura del etil xantato de sodio

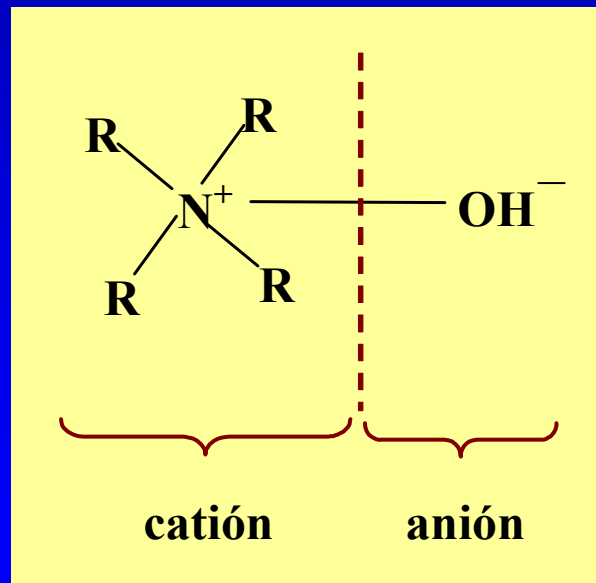


Flotación

Colectores Catiónicos

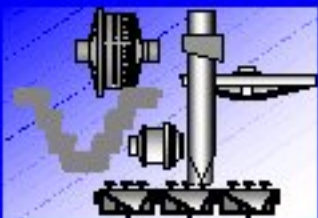
Aminas y sales cuaternarias de amonio. Derivados del amoníaco, con hidrógenos reemplazados por radicales. Según el número de reemplazos se tiene aminas I, II y III. Las cuaternarias (IV). se obtienen al actuar cloruros sobre aminas terciarias.

Los radicales con el nitrógeno forman el catión (+) mientras el anión es un hidroxilo.



Amina cuaternaria

Flotación de talco, micas, sericita, caolinita, carbonatos y, en menor grado, zirconio, cuarzo, silicatos, aluminosilicatos, varios óxidos, etc..

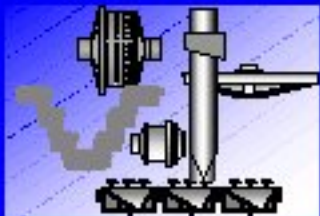
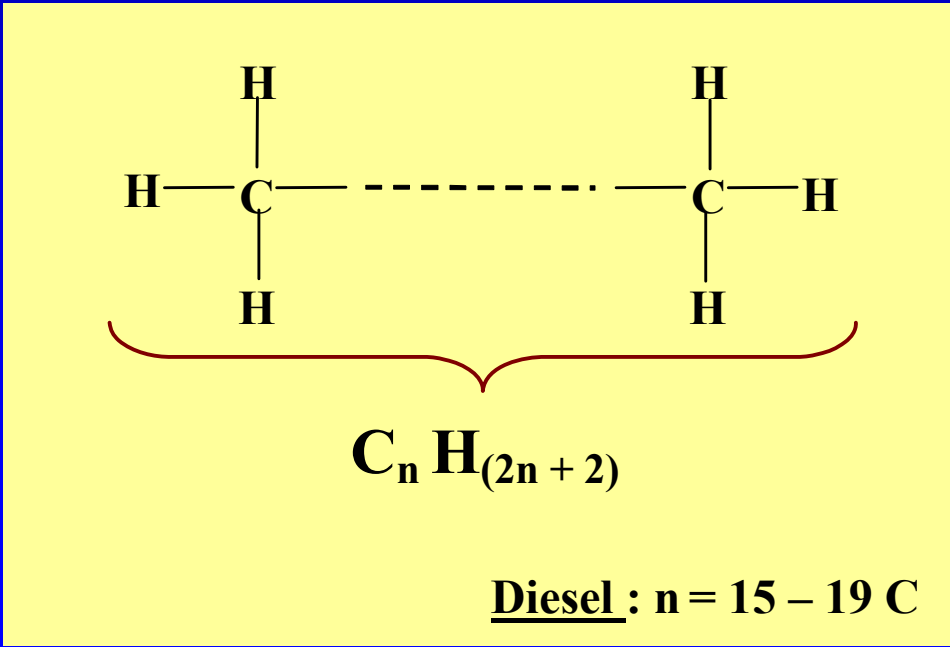


Flotación

- **Colectores No Iónicos**

No poseen grupos polares. Hidrocarburos saturados o no saturados, fuel oil, kerosén. Tornan al mineral repelente al agua al **ubrir** su superficie con una **fin película**.

Fuertemente hidrófobos, se utilizan en flotación de minerales pronunciadamente hidrofóbicos, tales como carbón, grafito, azufre y en especial, **molibdenita**.

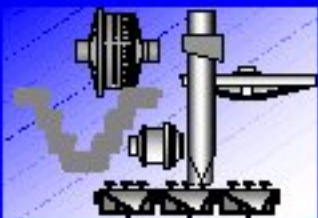
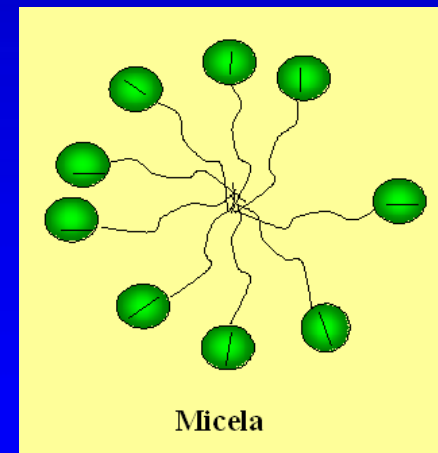
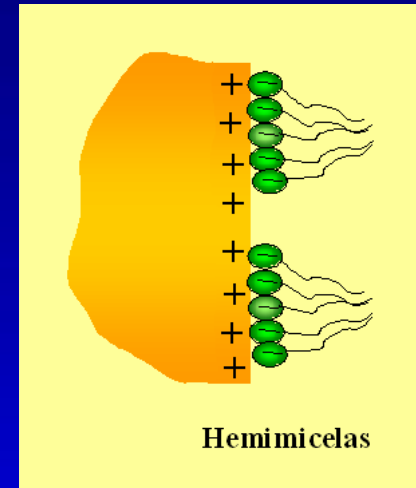


Flotación

- **Adsorción del Colector**

En la interfase mineral - solución, los iones colectores pueden adsorberse en la superficie del mineral en forma individual a bajas concentraciones, o en **hemimicelas** a altas concentraciones del colector.

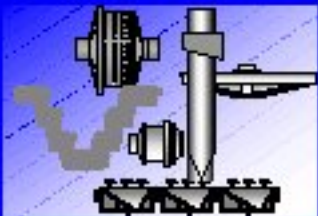
Las **micelas** son agregados de iones colectores de tamaño coloidal que se forman por uniones de van der Waal entre las cadenas de hidrocarbones del colector. Se forman debido a que las cadenas de hidrocarbones son no iónicas y existe incompatibilidad entre las moléculas polares del agua y las cadenas de hidrocarbones no polares.



Flotación

Cuando se alcanza una cierta concentración de reactivo, se produce la asociación de las cadenas de hidrocarbones del colector. Esta concentración se denomina “**concentración micelar crítica, CMC**”.

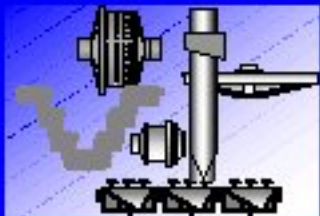
En estas condiciones las **micelas**, por hidrofobicidad, salen de la pulpa. Cuando este fenómeno ocurre en la superficie del mineral, estos agregados se llaman **hemimicelas** y los iones colectores son adsorbidos bajo estas condiciones. Se evita esto con la presencia de sales inorgánicas o moléculas orgánicas neutras tales como alcoholes de cadena larga.



Flotación

Los colectores de una misma familia se distinguen entre si, entre otras cosas, por el número de carbonos de la cadena apolar (radical). Esta característica se relaciona con la capacidad colectora expresada en el ángulo de contacto, como se ilustra para los xantatos:

Radical	Nº de carbonos	Ángulo de contacto
Metil	1	50°
Etil	2	60°
Propil	3	68°
Butil	4	74°
Amil	5	80°
Hexil	6	87°
Reptil	7	90°
Octil	8	94°
Cetil	16	96°



Flotación

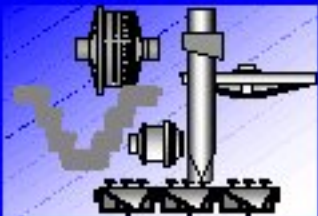
Tipos de Adsorción (colectores):

- **Física**

Adsorción de iones de signo contrario (contraiones) por atracción electrostática sin producir cambio químico. Este tipo de adsorción se produce en la flotación de óxidos y silicatos.

- **Química/Electroquímica**

Los compuestos adsorbidos pierden su individualidad química y forman nuevos compuestos superficiales. Se distinguen por el intercambio de iones y formación de compuestos insolubles. Flotación de sulfuros.

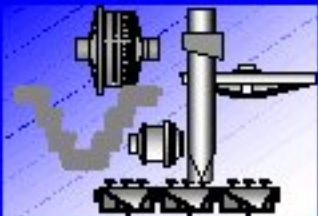


Flotación

Aspectos generales de la adsorción física de colectores en sulfuros

La adsorción física ocurre por **interacciones electrostáticas** entre las moléculas de colector y la superficie del mineral. Es necesario entonces hacer una revisión de los fenómenos que determinan la carga superficial en el mineral:

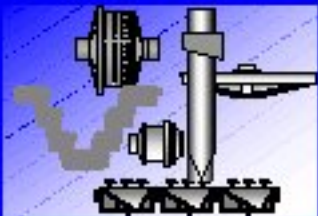
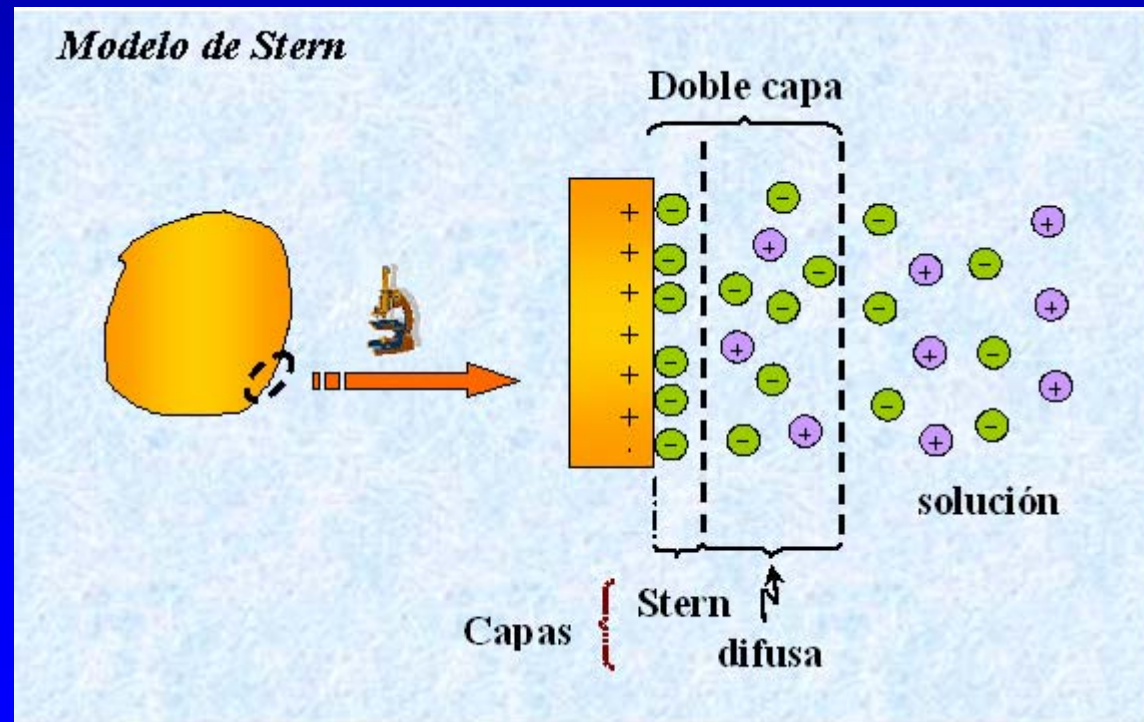
- Doble capa eléctrica
- Potencial superficial
- Potencial zeta



Flotación

❖ Doble capa eléctrica

En una partícula mineral en contacto con un líquido, se desarrolla una carga eléctrica superficial que es compensada por una distribución equivalente de carga en la fase acuosa (capa Stern). Entre esta capa y el seno del líquido se forma una capa difusa de contraiones. Ambas capas en conjunto forman la denominada **doble capa eléctrica**, que influye directamente en la adsorción de los reactivos sobre la superficie de los minerales.



Flotación

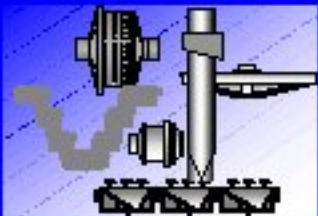
Aquellos iones que son quimioadsorbidos sobre la superficie del mineral establecen la carga superficial y son llamados *iones determinantes del potencial*. Estos pueden ser iones del mineral, iones **hidrógeno (H⁺)** o **hidroxilo (OH⁻)**, iones colectores que forman sales insolubles con iones en la superficie del mineral, o iones que forman iones complejos con los iones de la superficie del mineral.

La carga superficial en un mineral es determinada por la densidad de adsorción de los iones determinantes del potencial en la superficie del mineral. La carga superficial σ_s (para una sal de valencia 1) está dada por:

$$\sigma_s = F \left(\Gamma_{M^+} - \Gamma_{A^-} \right)$$

F corresponde a la constante de Faraday.

Γ_{M^+} y Γ_{A^-} son las densidades de adsorción del catión y del anión determinantes del potencial, respectivamente.



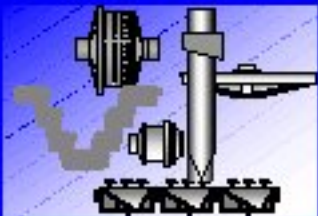
Flotación

Para muchos minerales los iones determinantes del potencial son los iones H^+ y OH^- . En estos casos, el pH al cual la carga superficial es cero, se denomina **Punto Cero de Carga, PCC**.

➤ *Potencial Superficial, \mathcal{E}*

Aunque la carga superficial no se puede medir, es posible determinar la diferencia de potencial entre la superficie y la solución, lo que se denomina **potencial superficial o potencial electroquímico, “ \mathcal{E} ”**.

Las propiedades **hidrofílicas** de la superficie de los minerales tienen una relación directa con el potencial de la doble capa eléctrica, que, en este caso, forma un fuerte campo eléctrico que atrae moléculas y iones de alta constante dieléctrica (agua). Un campo eléctrico débil atrae moléculas de baja constante dieléctrica (moléculas orgánicas) que fomentarán las propiedades hidrófobas de la superficie.



Flotación

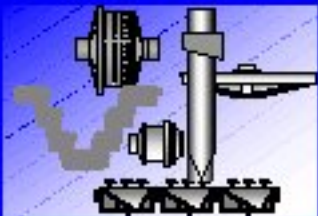
El potencial superficial se puede expresar como:

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{a}{a^0} \quad [\text{volt}]$$

Donde F es la constante de Faraday, R es la constante de los gases, T es la temperatura absoluta, n es la valencia del ión determinante del potencial, a es la actividad del ión determinante del potencial en solución y a^0 es la actividad del ión determinante del potencial al PCC.

Por ejemplo: el PCC del cuarzo es pH 1,8 y por lo tanto la actividad del ión hidrógeno a este pH es $10^{-1,8}$. Para pH 7, el valor del potencial superficial será entonces:

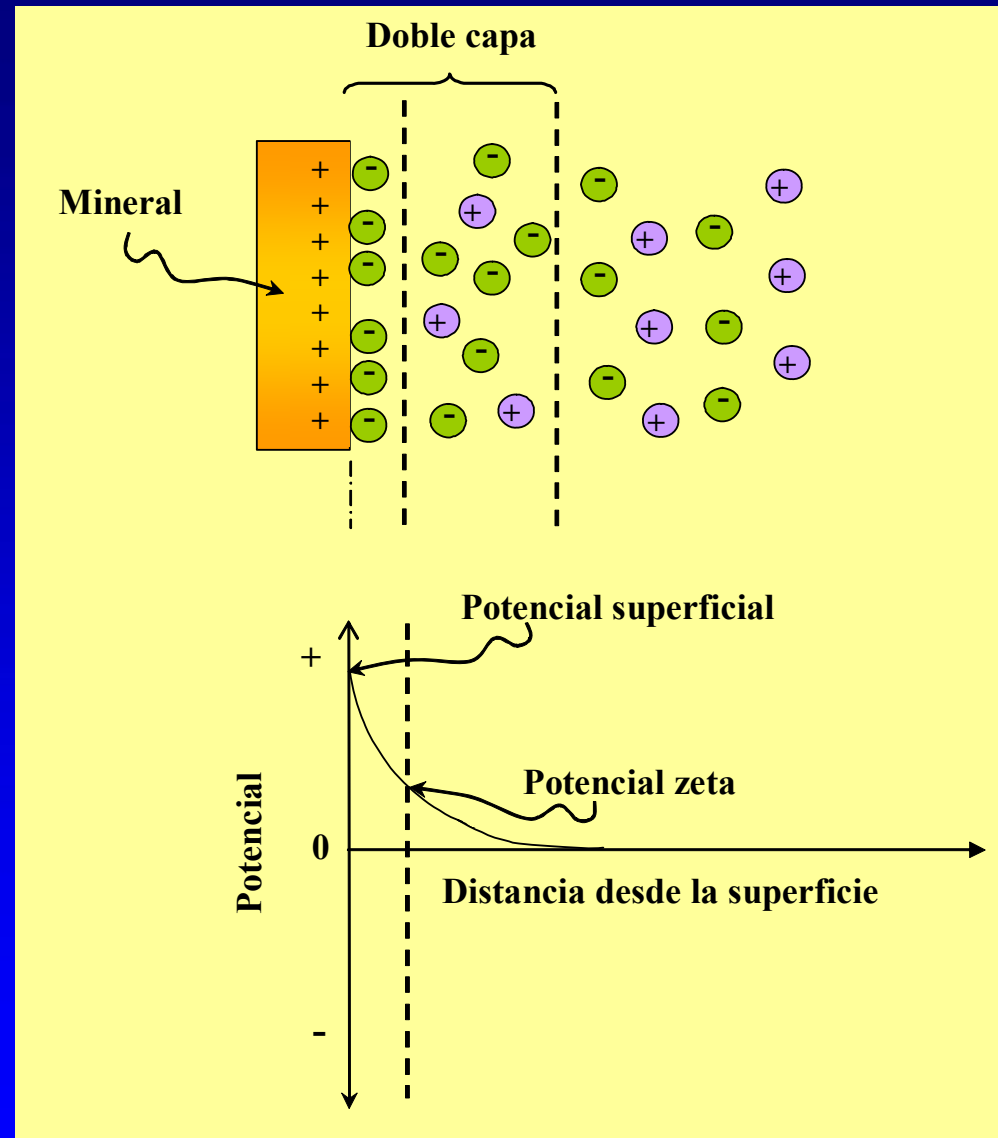
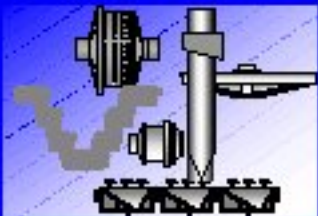
$$E = \frac{1,98(\text{cal}/^\circ\text{K mol}) 298(^\circ\text{K})}{1(\text{equiv/mol}) 23.060(\text{cal/volt-equiv})} \ln \frac{10^{-7}}{10^{-1,8}} = -0,31 \text{ volt}$$



Flotación

➤ *Potencial Electrocinético o Potencial Zeta, ζ*

Cuando existe un movimiento relativo entre el sólido y el líquido, los iones que forman la capa Stern quedan firmemente asociados con la superficie del sólido, mientras que los iones de la capa difusa quedan o se mueven con el líquido. Esto genera un **plano de corte** entre ambas capas, generando un potencial eléctrico entre las dos superficies, denominado **potencial electrocinético o potencial zeta**, “ ζ ”.



Flotación

El potencial zeta, ξ , puede ser determinado mediante electrophoresis según:

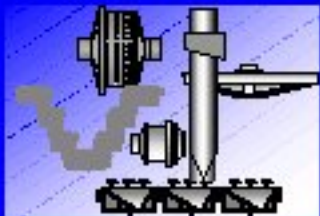
$$\xi = \frac{4 \pi \eta V}{D E} \quad [\text{milivolts}]$$

D = Constante dieléctrica del líquido.

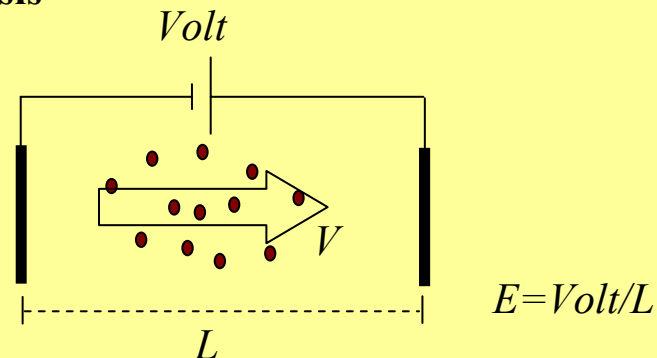
η = Viscosidad del líquido (0,01 a 20°C)

V = Velocidad de movimiento del sólido micrones/segundo.

E = Intensidad del campo eléctrico volt/cm.



Electrophoresis

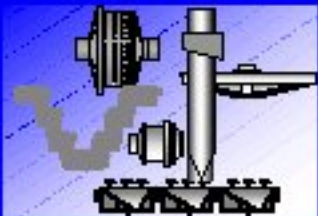
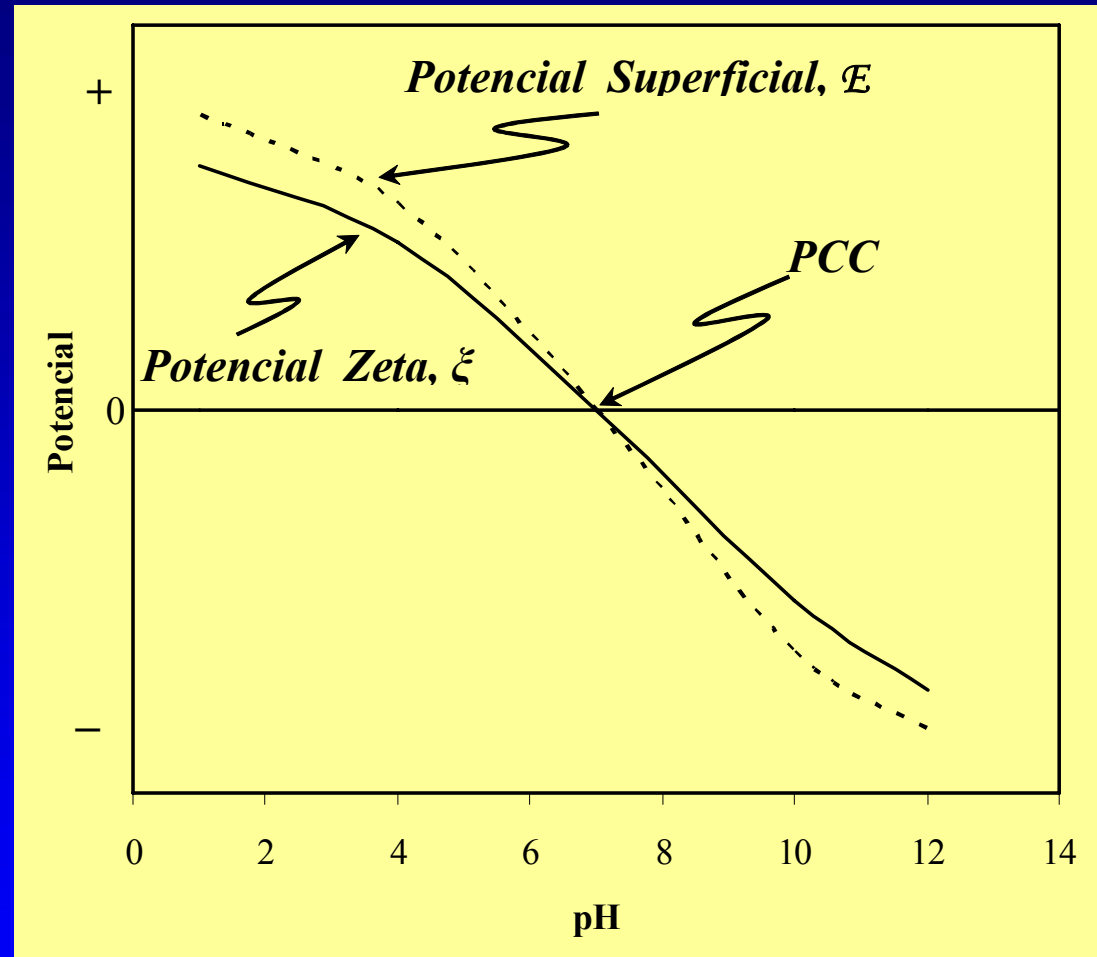


Flotación

El pH al cual el potencial superficial es cero se denomina **Punto Cero de Carga (PCC)**.

Aquel al cual el potencial zeta es igual a cero, se denomina **punto isoeléctrico (IEP)**.

En los óxidos y silicatos estos puntos son iguales.



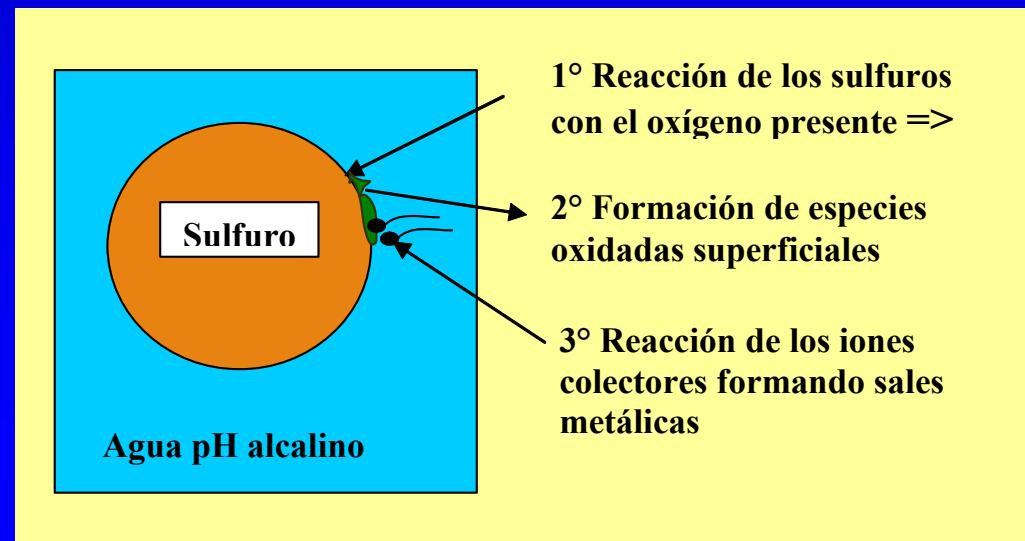
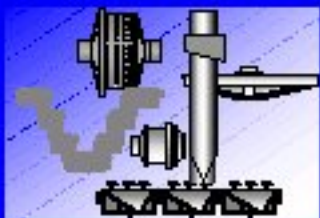
Flotación

Aspectos generales de la adsorción química/electroquímica de colectores en sulfuros

En flotación de sulfuros la adsorción de colectores sulfhídricos es fundamental. El **oxígeno** juega un papel importante en ella.

➤ Teoría Química

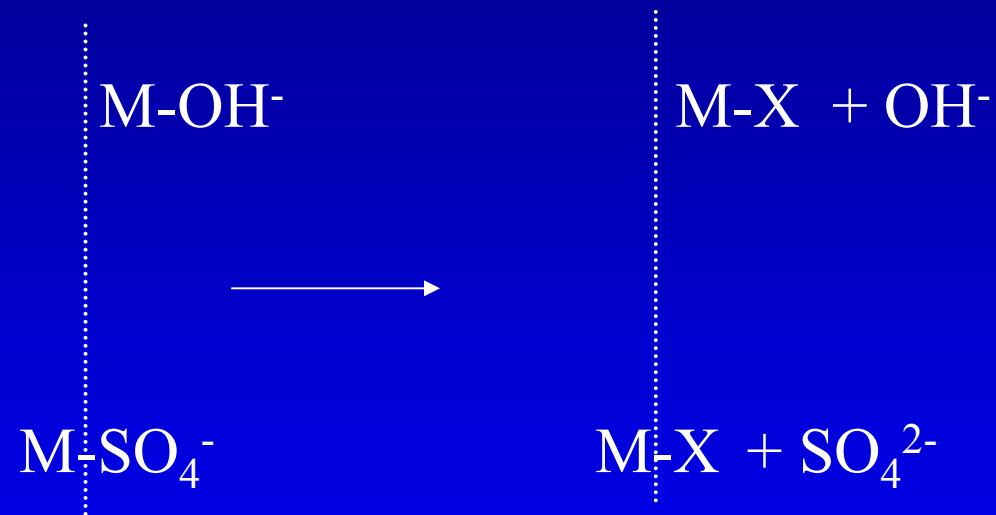
En un medio acuoso alcalino los sulfuros tienen una **reacción previa con el oxígeno** formándose **especies oxidadas superficiales**, las cuales reaccionan posteriormente con los iones colectores para formar **sales metálicas** de menor solubilidad que las especies oxidadas.



Flotación

Mecanismo de adsorción química:

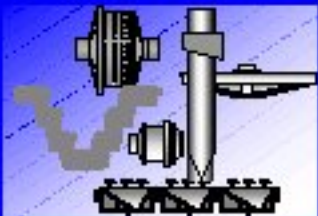
1. Oxidación superficial promovida por presencia de oxígeno.
2. Formación de sales metálicas (por intercambio iónico) en la superficie del mineral.



Evidencia:

Liberación de SO_4^{2-}

Altos valores de pH inhiben la flotación

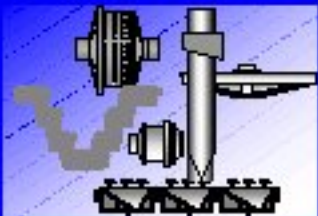


Flotación

Sales Metálicas:

Son producto de la reacción química entre los iones colectores y los iones metálicos superficiales.

La solubilidad de éstas depende del ión metálico y del colector, se puede encontrar sales de baja y alta solubilidad.



Flotación

Solubilidad baja => son de difícil remoción de la superficie de minerales sulfurados de ese elemento. Ejm. los xantatos de plomo son de muy baja solubilidad comparado con los xantatos de cinc, por lo tanto la superficie de los minerales de plomo, en presencia de xantatos, es más hidrófoba que las de los cinc.

Solubilidad Alta => son de fácil remoción de la superficie de minerales sulfurados de ese elemento. Los xantatos de cinc son de fácil remoción de la superficie ya que son muy solubles.

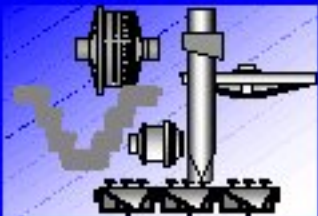
Para un mismo tipo de colector y ión metálico, la solubilidad de la sal disminuye con el largo de la cadena. Ejemplo:

Etil xantato de Plomo (2 carbonos):

Producto de Solubilidad $2,1 \times 10^{-17}$

Amil xantato de Plomo (5 carbonos):

Producto de Solubilidad $1,0 \times 10^{-24}$



Flotación

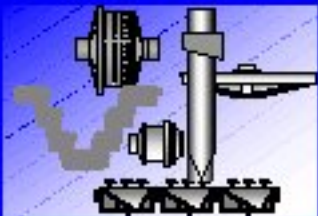
Para un mismo tipo de colector y largo de la cadena hidrocarbonada, distintos iones metálicos originan sales de distinta solubilidad.

Etil xantato de Plomo (2 carbones):

Producto de Solubilidad $2,1 \times 10^{-17}$

Etil xantato de Cinc (2 carbones):

Producto de Solubilidad $4,9 \times 10^{-9}$



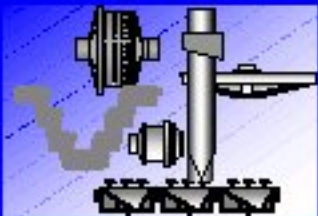
Flotación

➤ *Teoría Electroquímica (semiconductores)*

En la **superficie** del mineral se produce la **oxidación** de ciertos colectores sulfhídricos, los cuales son luego adsorbidos.

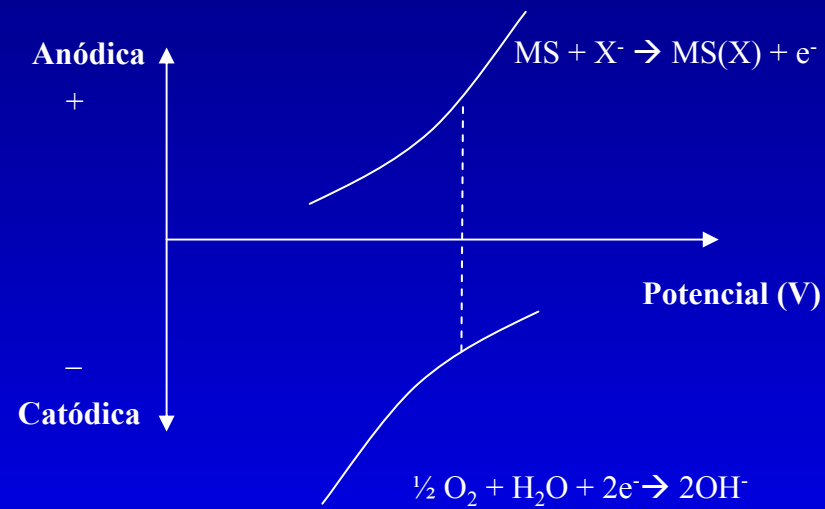
La reacción de oxidación, o reacción anódica, debe ser acompañada por una reacción de reducción (catódica) en la cual se ‘aceptan’ los electrones liberados.

El más común **aceptor de electrones** es el **oxígeno** a través de la reacción de hidrólisis del agua:



Flotación

Mecanismo de adsorción electroquímica:

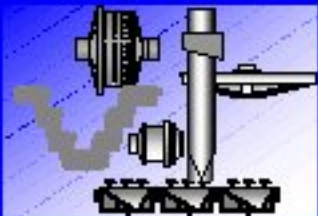


Evidencia:

Potencial decrece cuando xantato es adsorbido.

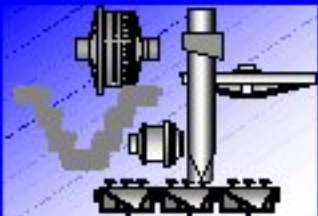
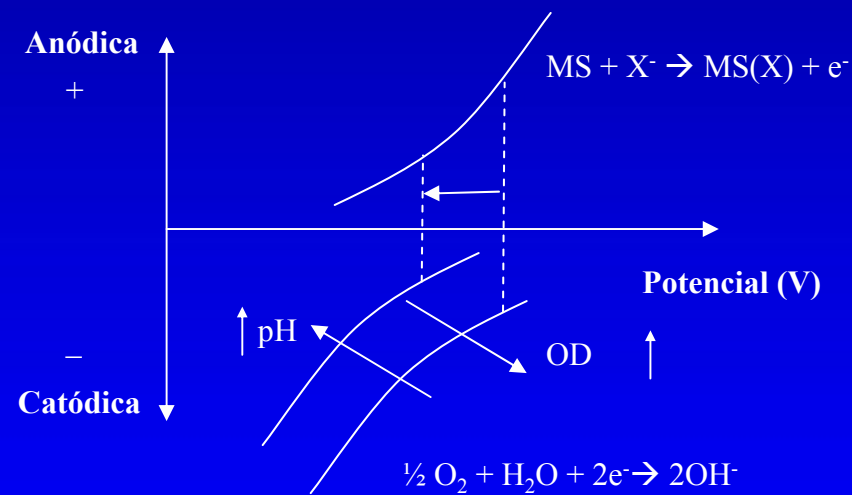
Bajos potenciales previenen adsorción.

Concentración de oxígeno (OD) y pH afectan la adsorción.



Flotación

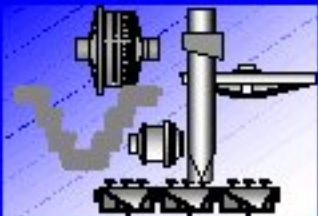
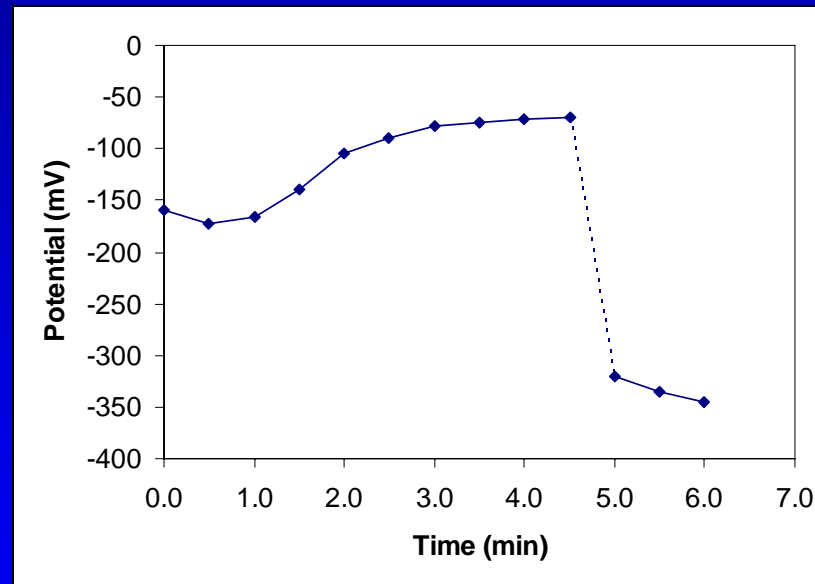
Tanto el pH como el oxígeno disuelto (OD) afectan el potencial en la pulpa. Aumentos en pH tienden a reducir el potencial, mientras que aumentos en el oxígeno disuelto lo aumentan.



Flotación

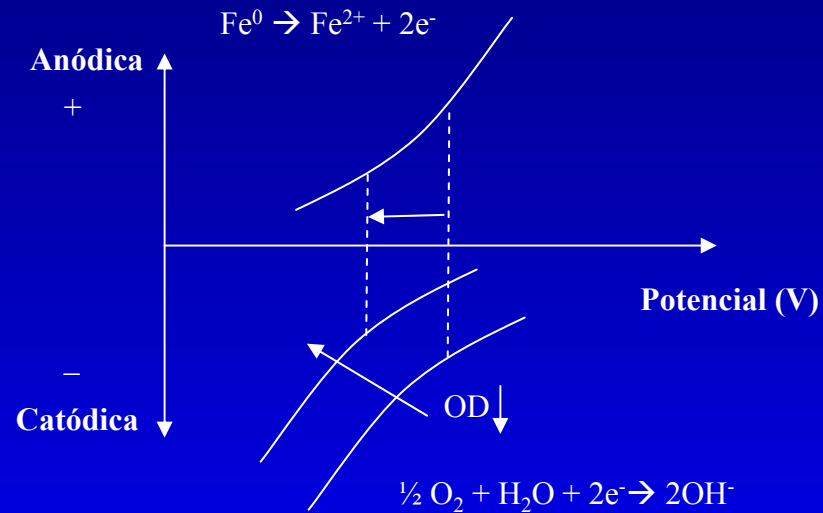
Efecto de la aireación (oxígeno disuelto) en el potencial de pulpa:

Potencial de pulpa vs. tiempo en una celda de flotación de laboratorio. Aireación detenida a los 4.5 minutos.



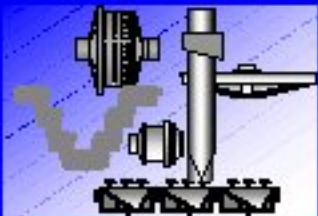
Flotación

Acero en molienda consume oxígeno (al oxidarse), por lo tanto el potencial electroquímico es reducido. Esto afecta el accionar de colectores en la etapa de flotación.



Si se encuentra que recuperación y ley aumentan a lo largo de un banco de celdas, es una indicación de que puede haber un problema de aireación.

Es una buena idea incluir una etapa de aireación entre molienda y flotación.



Flotación

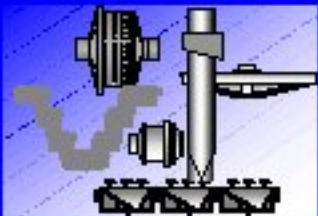
Dímeros:

Si el potencial de la pulpa es alto se pueden formar dímeros (dixantógenos) en la superficie de algunos minerales.

Reacción Anódica de oxidación de xantato => El xantato se oxida a **dixantógeno** (pierde electrones).

Reacción Catódica de reducción de oxígeno => El oxígeno se reduce (capta electrones).

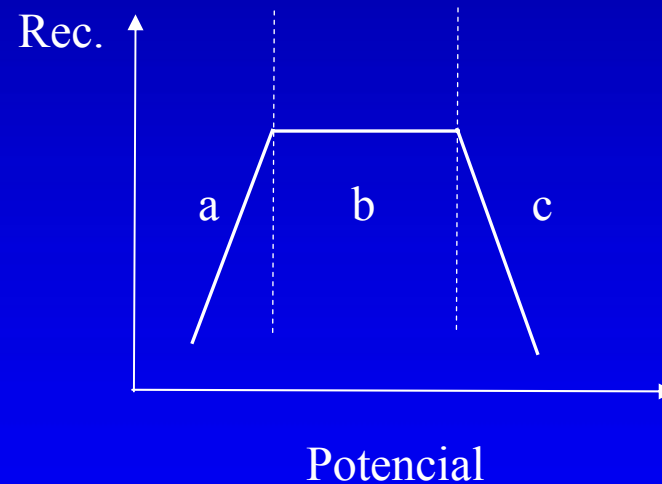
Dixantógenos se forman en **pirita** y en menor medida en calcopirita. En otros minerales como galena, se favorece la adsorción de xantato.



Flotación

Precaución con el potencial:

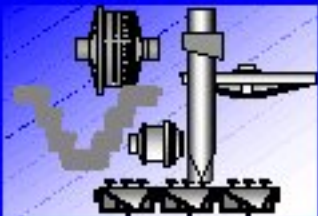
Si el potencial de la pulpa se aumenta demasiado, por ejemplo aumentando el oxígeno disuelto, se corre el **riesgo de** que la **oxidación superficial** de los minerales haga que éstos sean **hidrofilicos** y por lo tanto **no flotables**.



(a) Zona de bajo potencial no favorece adsorción de colector.

(b) Zona de potencial intermedio (rango de flotación).

(c) Zona de oxidación de minerales, desfavorece flotación.

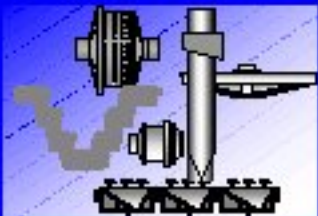


Flotación

¿Cuál es la teoría correcta?

Ambas teorías (química y electroquímica) concuerdan con la evidencia encontrada. La adsorción entonces puede ser producto de una acción tanto química como electroquímica.

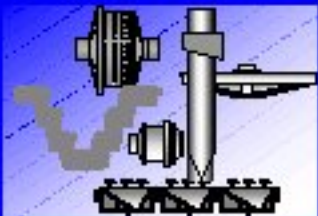
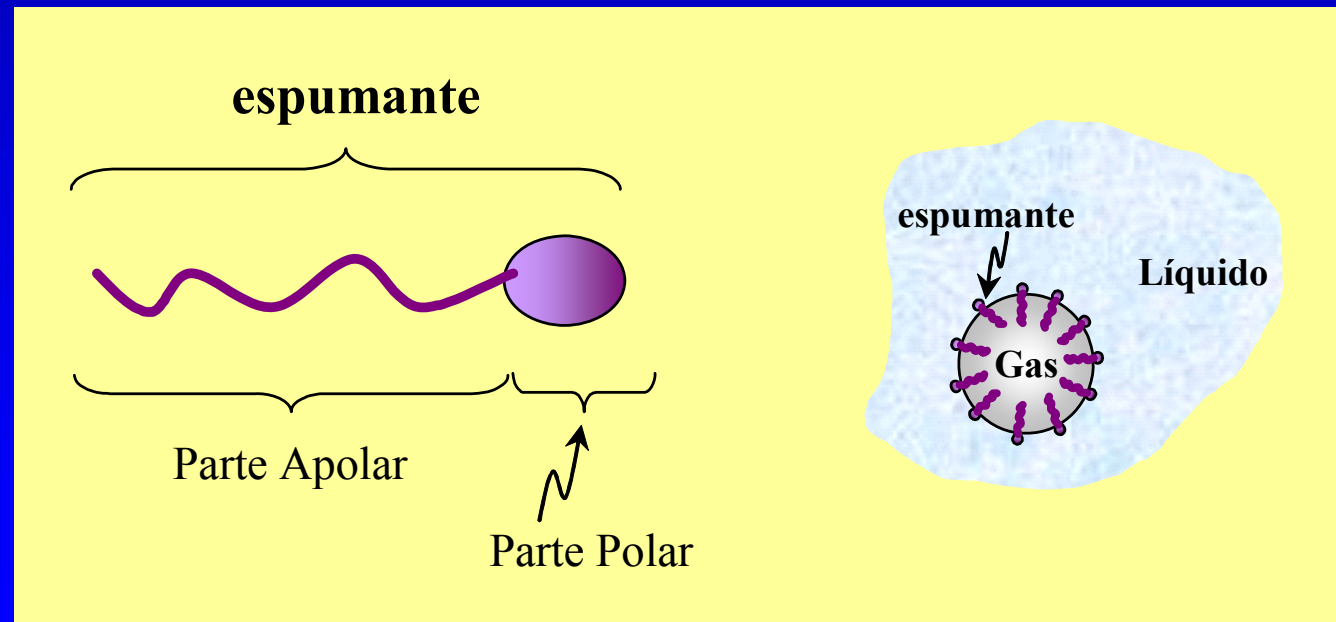
Se tienen entonces sales metálicas adsorbidas químicamente, acompañadas de colectores adsorbidos físicamente después de una reacción electroquímica.



Flotación

➤ Espumantes

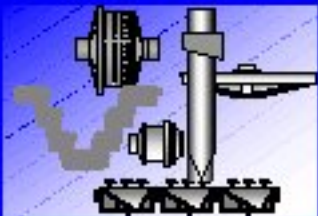
Son reactivos orgánicos de carácter **heteropolar**. Análogos a los colectores iónicos en su estructura, su diferencia radica en el carácter del grupo polar que en los colectores es activo para reaccionar con la superficie de los minerales, mientras que en los espumantes es un grupo con **gran afinidad con el agua (OH⁻)**. Permiten la formación de una espuma estable y burbujas de tamaño apropiado (pequeño) para llevar los minerales al concentrado.

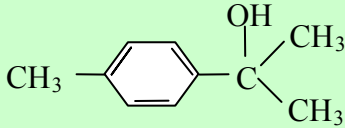
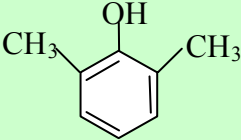


Flotación

Ácidos, aminas y alcoholes son los espumantes más usados.

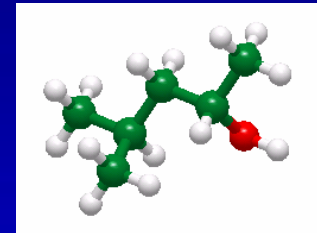
De estos tres, se prefiere a los alcoholes que al no tener propiedades colectoras facilitan una flotación selectiva.



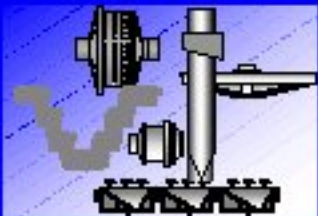
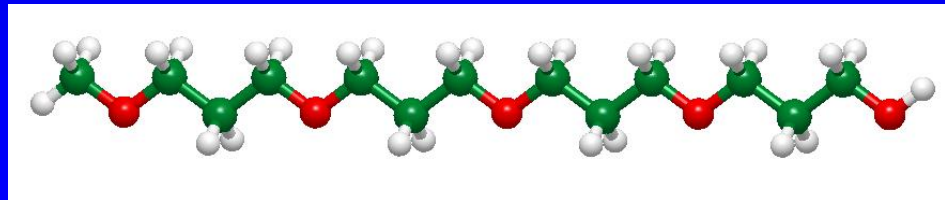
ESPUMANTE	FÓRMULA
Metil isobutil carbinol MIBC (alcohol alifático)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_3 \\ \qquad \qquad \\ \text{CH}_3 \qquad \qquad \text{OH} \end{array}$
Terpinol (aceite de pino) (alcohol aromático)	
Cresol (ácido cresílico) (alcohol aromático)	
Éter glicol polipropinil (éter poliglicólico)	$\text{CH}_3 - (\text{O} - \text{C}_3\text{H}_6)_n - \text{OH}$

Flotación

MIBC (metil isobutil carbinol):
espumante más utilizado en la industria.
Su bajo peso molecular hace que sea
muy volátil, i.e., tiende a evaporarse.



Dowfroth-250 (éter poliglicólico): su
mayor peso molecular lo hace menos
volátil que el MIBC. Genera una espuma
muy estable debido a que favorece el
arrastre de agua.



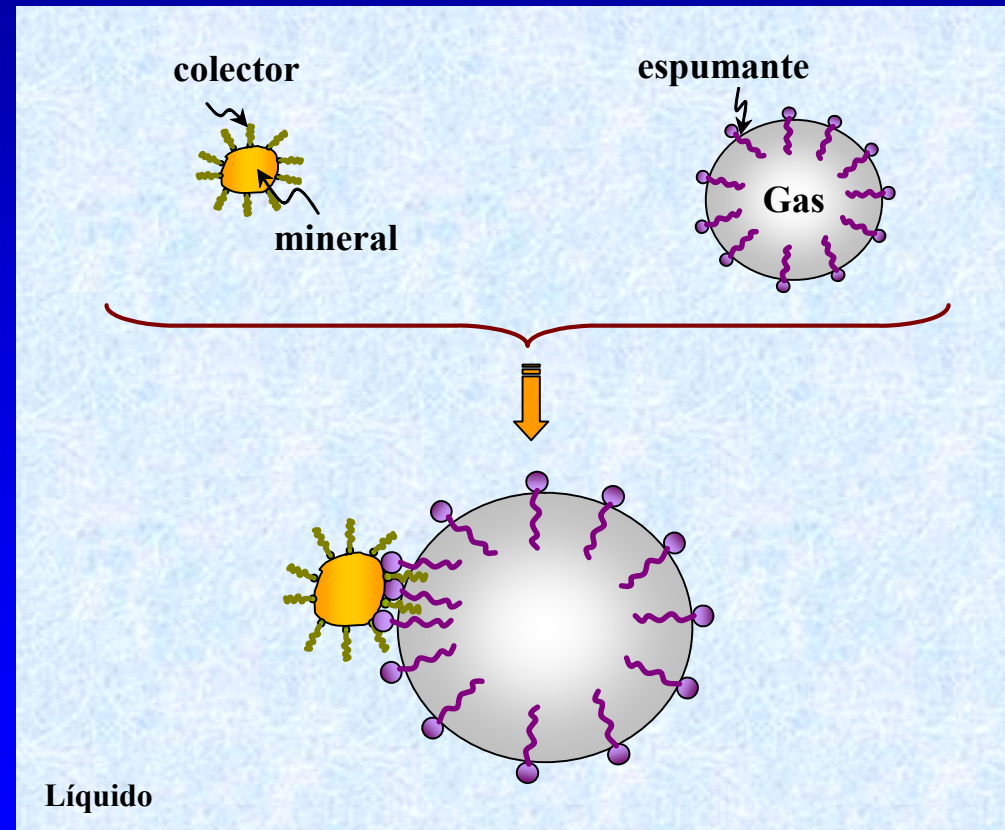
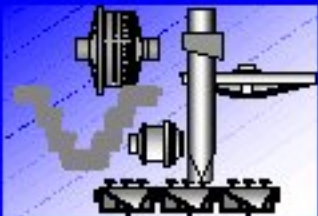
Flotación

➤ Colector y Espumante: Contacto Mineral - Burbuja

Tras el contacto mineral – burbuja, las moléculas de espumante en la burbuja pueden penetrar la capa de colector sobre el mineral para formar una capa mixta, estableciéndose una adsorción más fuerte (teoría de Leja y Schulman).

Si se agrega un exceso de colector, las partículas son aparentemente **incapaces** de penetrar la interfase LG y la flotación se inhibe.

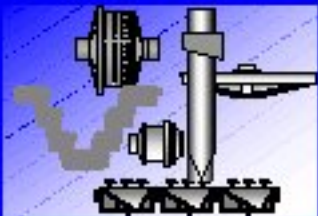
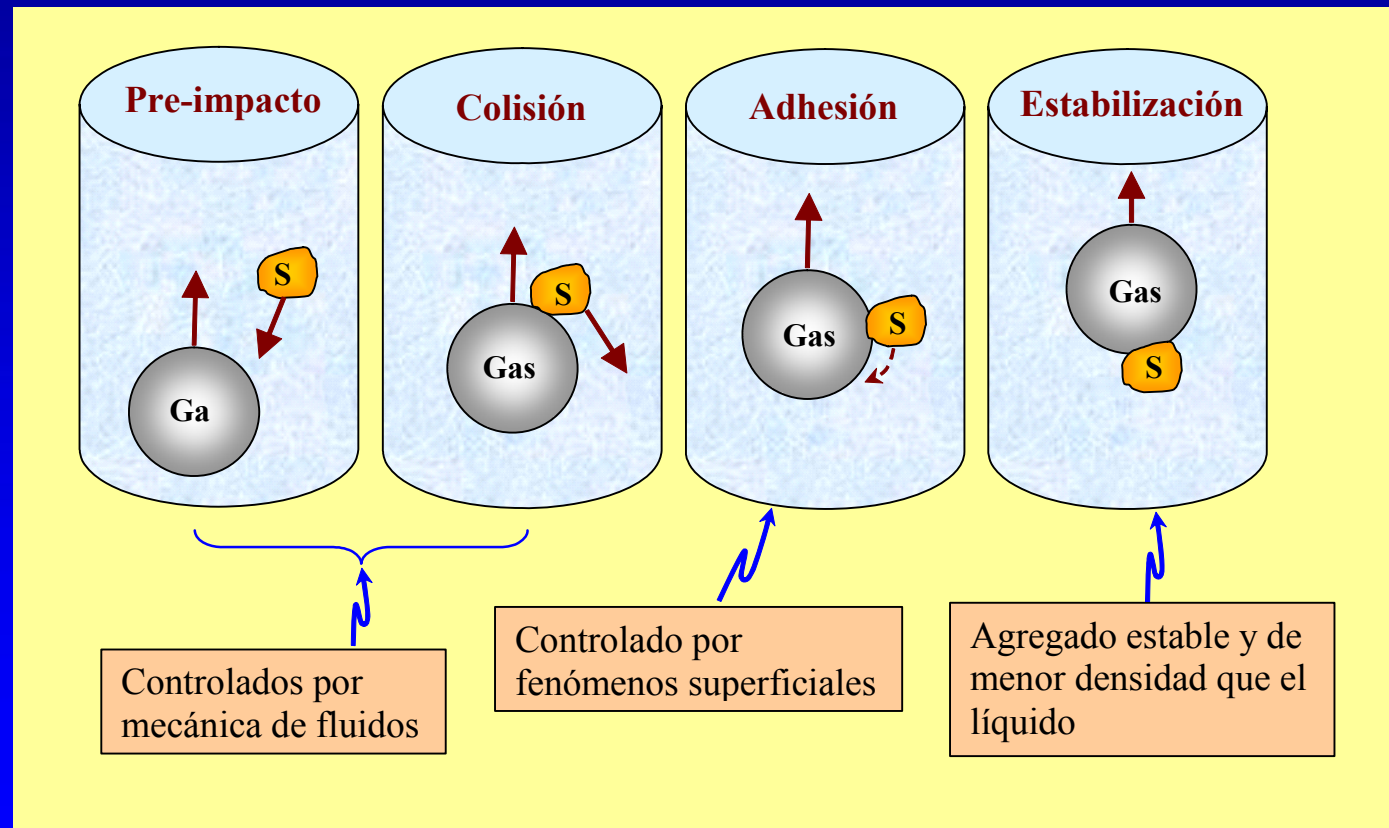
Si se agrega exceso de espumante, γ_{LG} puede disminuir demasiado, reduciendo la variación de energía libre, lo que desfavorece la adhesión partícula burbuja.



Flotación

❖ Mineralización de la Burbuja

En la pulpa, para que exista la unión entre burbujas y partículas (mineralización de la burbuja) deben concurrir 3 mecanismos: **colisión, adhesión y estabilización**.



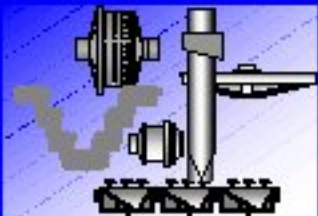
Flotación

➤ Colisión o Impacto

Está controlada por fenómenos hidrodinámicos y variables tales como: radio de la burbuja (R), radio de la partícula (r), forma de la partícula, densidad del líquido (ρ_L), densidad del sólido (ρ_S), viscosidad (μ).

Existen diversos fenómenos relacionados con la colisión, estos son:

- ≈ **Sedimentación:** caen las partículas y se encuentran con las burbujas que van ascendiendo.
- ≈ **Intercepción:** las partículas pasan a distancias menores que el radio de la burbuja, (r/R).
- ≈ **Inercia:** las partículas siguen las líneas de flujo.
- ≈ **Arrastre Hidrodinámico:** turbulencia.

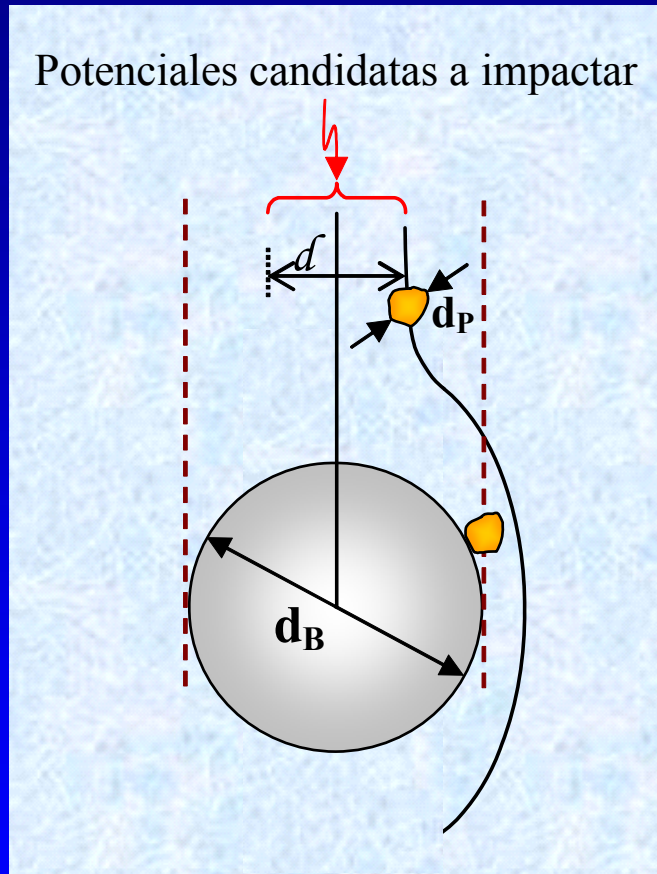
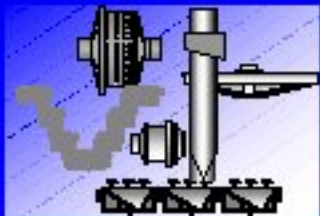


Flotación

- Probabilidad de Colisión, P_C

Depende del régimen de flujos. Para el caso turbulento (de alta agitación), la literatura entrega una expresión – para P_C – dependiente de los tamaños de partícula y burbuja:

$$P_C = 3 \left(\frac{d_P}{d_B} \right)$$



En la figura, las partículas potenciales candidatas a impactar son aquellas que están a una distancia “ d ” menor o igual a “ d_b ”

Flotación

➤ Adhesión

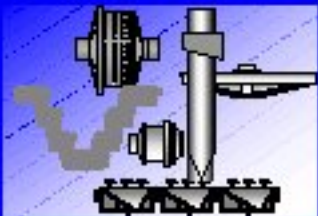
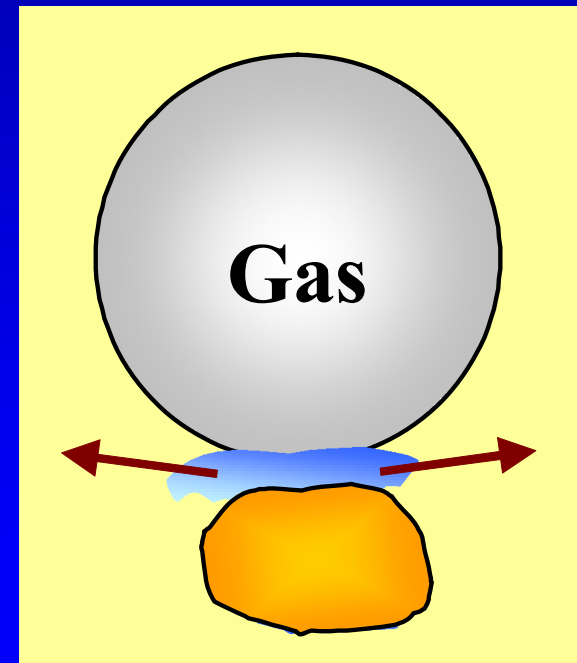
La termodinámica señala la tendencia, pero la adhesión depende además fuertemente de las condiciones **cinéticas** que participan en el proceso.

La adhesión partícula - burbuja ocurre en etapas:

≈ **Acercamiento** entre partícula y burbuja, hasta aproximarse a la película de agua que rodea al sólido.

≈ **Adelgazamiento** de la película de agua hasta permitir la adhesión.

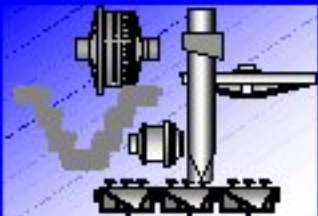
≈ Establecimiento de un **contacto en equilibrio**.



Flotación

Cuando la separación entre partícula y burbuja es grande, las fuerzas hidrodinámicas son predominantes. Al acercarse, las fuerzas moleculares en la película de agua que rodea a la partícula, adquieren importancia. Estas son:

- ≈ Fuerzas de Van der Waals de atracción.
- ≈ Fuerzas eléctricas provenientes de la interacción (deformación) de las capas hidratadas alrededor de las partículas.
- ≈ Hidratación de algunos grupos hidrofílicos sobre las superficies de las partículas.



Flotación

Se define **Tiempo de Inducción (t_i)** como el tiempo mínimo necesario para adelgazar la película de agua que está entre la partícula y la burbuja de aire, hasta permitir la adhesión entre ambas. Este tiempo está relacionado con la temperatura por la ecuación de Arrhenius:

$$t_i = t_0 e^{\left(\frac{W}{K T}\right)}$$

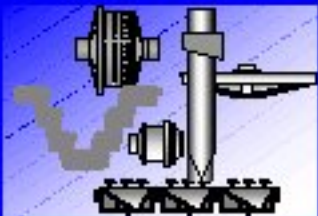
K = constante de Boltzman

t_0 = tiempo de inducción particular
(constante, depende del proceso).

T = temperatura absoluta.

W = energía de activación (constante,
depende del mineral).

El tiempo (t_c) que debe estar en contacto la burbuja con la partícula para que se produzca la adhesión debe ser mayor que el tiempo de inducción ($t_c > t_i$).

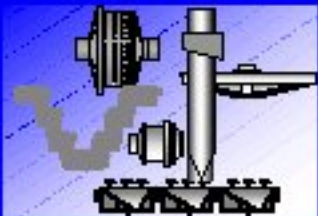
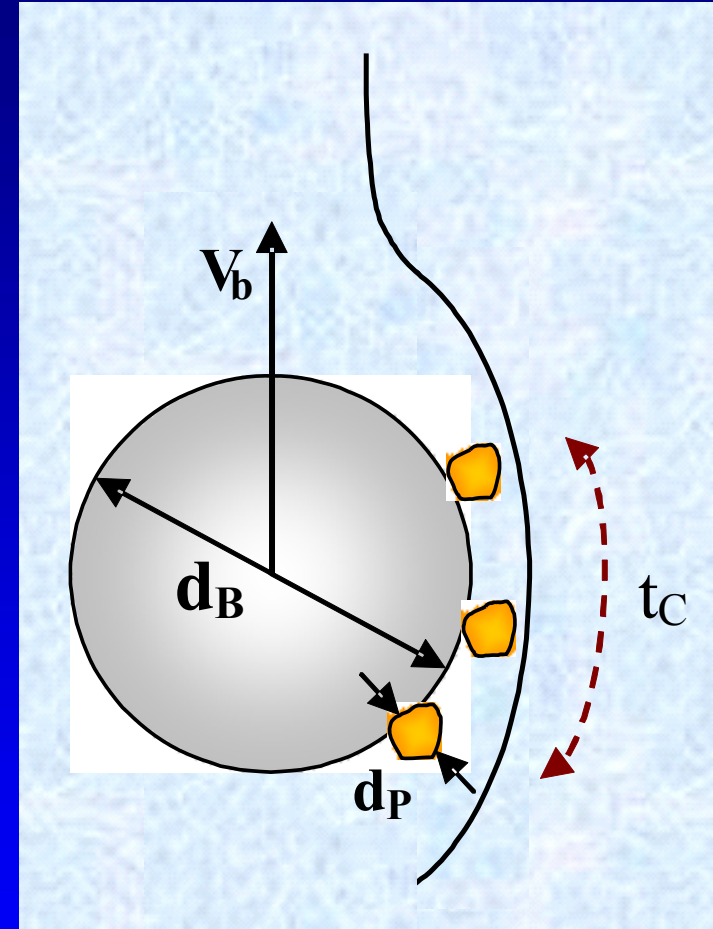


Flotación

- Probabilidad de Adhesión, P_A

Depende del régimen de flujos, de la velocidad de ascenso de las burbujas (V_b) y del tiempo de inducción t_i . Para el caso turbulento (de alta agitación):

$$P_A = \text{sen}^2 \left(2 \arctan \left(\exp \left(\frac{-3 V_b t_i}{d_P + d_B} \right) \right) \right)$$



Flotación

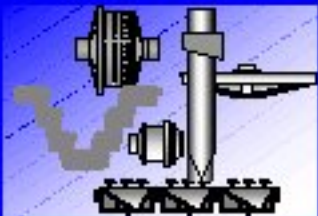
➤ Estabilización

Da cuenta de que la unión partícula – burbuja sea estable. Considera tanto el que el agregado no se rompa como el que pueda ser levantado (flotado) a superficie. Esto también puede ser visto como la probabilidad de que la partícula, una vez adherida, no se desprenda.

Levante

Para que exista ascenso de una burbuja cargada con partículas, se debe cumplir que la **densidad conjunta** del agregado burbuja – partículas sea menor que la del líquido en que se encuentran. Para el caso general de una burbuja en contacto con N_p partículas, el tamaño mínimo de la burbuja, para que el conjunto burbuja - partículas pueda ascender es:

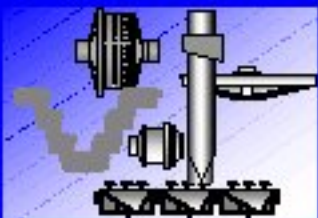
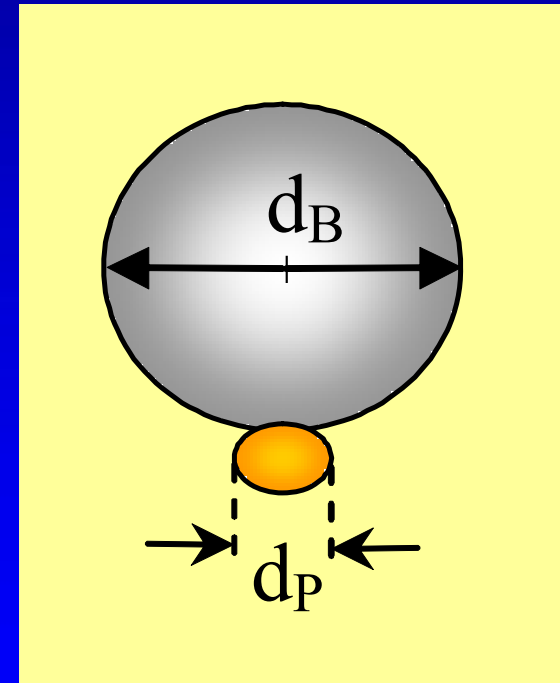
$$d_B \geq d_P \left(\frac{N_P \alpha_V}{\pi / 6} \right)^{1/3} \left[\frac{\rho_S}{\rho_L} - 1 \right]^{1/3}$$



Flotación

Para el caso particular de una burbuja en contacto con una partícula ($N_p = 1$) esférica ($\alpha_v = \pi/6$), el tamaño mínimo de la burbuja, para que el conjunto burbuja - partícula pueda ascender es:

$$d_B \geq d_P \left[\frac{\rho_S}{\rho_L} - 1 \right]^{1/3}$$

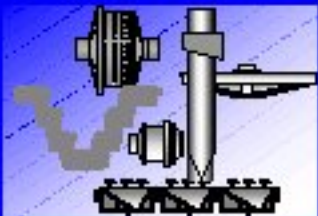


Flotación

- **Probabilidad de Estabilización, P_E**

La probabilidad de que la partícula se desprenda de la burbuja depende de la relación entre el tamaño de la partícula y el tamaño máximo de las partículas presentes en la pulpa ($d_{P,\max}$), y por lo tanto, la probabilidad de estabilización es:

$$P_E = 1 - \left[\frac{d_P}{d_{P,\max}} \right]^{1,5}$$



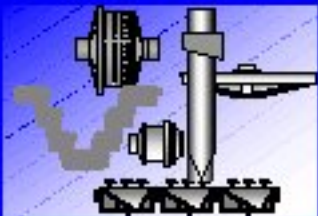
Flotación

- Probabilidad y Tasa de Flotación

Conforme a lo señalado, la probabilidad que una partícula sea colectada por una burbuja de aire y que ésta llegue a la superficie, corresponde a la **probabilidad de flotación**, P_F , que está dada por:

$$P_F = P_C P_A P_E$$

P_F representa la probabilidad de recuperar el mineral de interés. Se relaciona, al menos **teóricamente**, con la tasa de flotación, K (constante cinética de flotación o velocidad de flotación), en la práctica se han encontrado factores fáciles de medir que permiten modelar la constante cinética.



Flotación

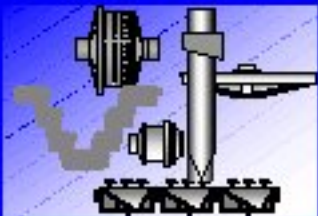
La velocidad a la cual los sólidos dejan la pulpa es proporcional a la probabilidad de flotación y a la frecuencia de colisiones (f_c).

$$K \propto P_F f_c = P_C P_A P_E f_c$$

f_c es a su vez proporcional al número de partículas por unidad de volumen (c) y al área superficial de burbujas por unidad de volumen (S), entonces:

$$K = k_e P_C P_A P_E c S$$

k_e = constante de proporcionalidad



Flotación

❖ Cinética de Flotación, K

La cinética de flotación puede ser representada, análogamente a la cinética química, por la ecuación diferencial ordinaria:

$$-\frac{dC_P}{dt} = K C_P^n C_B^m$$

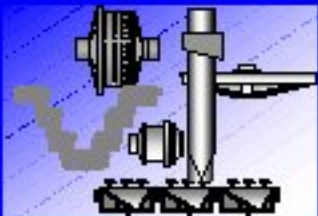
C_P y C_B son las concentraciones de partículas y burbujas respectivamente.

t es el tiempo de flotación.

n y m son los respectivos órdenes de la ecuación diferencial.

Si el suministro de aire es constante, los cambios en la concentración de burbujas son despreciables. Una simplificación generalmente adoptada es considerar una **cinética de primer orden**. Incorporando estos aspectos se obtiene que:

$$-\frac{dC_P}{dt} = K C_P$$

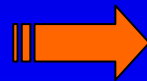


Flotación

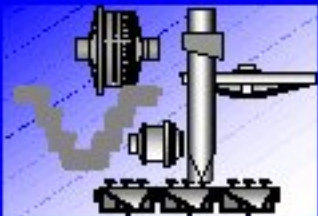
Determinando condiciones de borde:
$$\left\{ \begin{array}{l} C_P = C_0 \quad \text{en } t = 0 \\ C_P = C(t) \quad \text{en } t = t \end{array} \right.$$

Se obtiene:

$$\ln\left(\frac{C(t)}{C_0}\right) = -K t$$

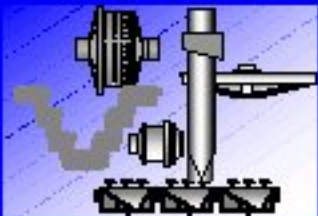


$$C(t) = C_0 e^{-K t}$$



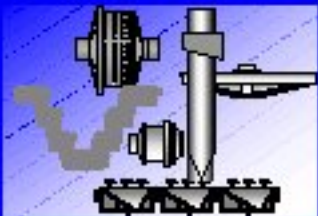


Flotación de minerales



Flotación

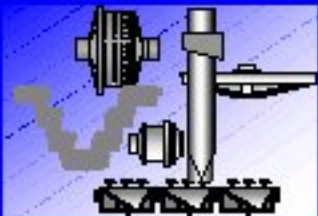
- La concentración de minerales, en el procesamiento de minerales metálicos, permite **disminuir de manera importante** la cantidad de material (ganga) que pasa a la(s) etapa(s) de extracción de elementos de interés (metalurgia extractiva), permitiendo un aumento de la **eficiencia** operacional y una disminución de los **costos** asociados. Con la concentración de minerales se obtiene el **primer producto comercializable** (con valor de mercado) en la línea productiva.
- La concentración por flotación se efectúa aprovechando las diferencias en las **propiedades fisicoquímicas** de las especies mineralógicas que se desee separar. Lo característico de esta operación es que las especies mineralógicas **mantienen su identidad**.



Flotación

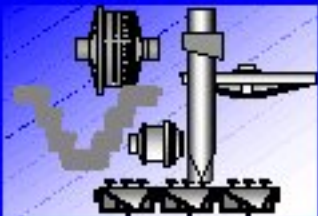
- Si la mena contiene cantidades significativas de más de un mineral valioso, la finalidad de la concentración de minerales es, por lo general, separarlos, pudiéndose obtener más de un concentrado. Si hay minerales indeseables que puedan interferir con los procesos subsecuentes de refinación, que generen problemas de contaminación o que afecten la calidad del producto, es necesario extraerlos en la etapa de separación.

En la siguiente Tabla se aprecia los niveles de consumos principales y costos de la flotación de minerales de cobre sulfurado en Chile. Los valores no corresponden a una faena en particular, sino que al promedio de ocho faenas importantes en términos de capacidad de tratamiento.



Flotación

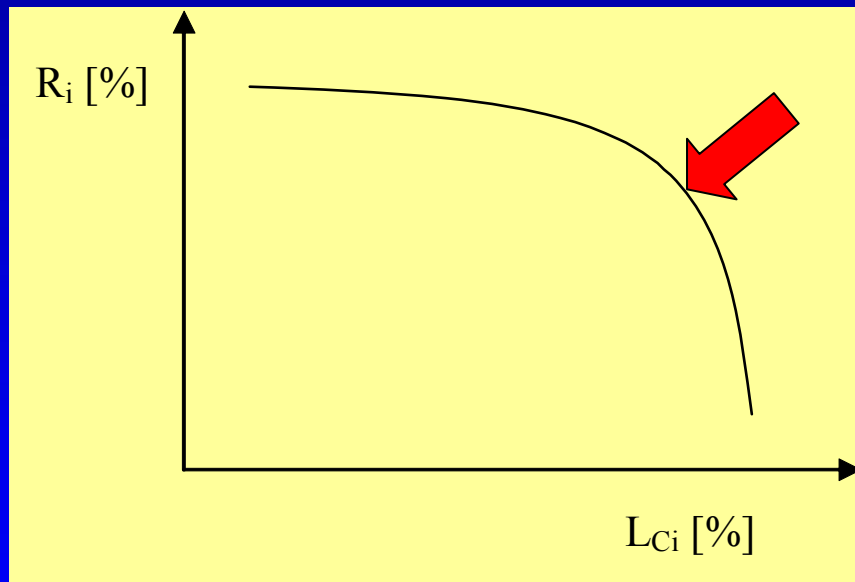
INDICADOR	VALOR PROMEDIO	RANGO
<u>Consumos en Flotación:</u>		
◆ Energía global [kWh/t]	3	2,9 - 7
◆ Reactivos Flotación Colectiva:		
Colectores [g/t]	20	10 – 100
Espumante [g/t]	35	15 – 100
Cal [g/t]	1.790	250 – 2.500
◆ Reactivos Flotación Moly:		
NaSH [kg/t]	4,8	4,5 – 5,0
Diesel [g/t]	220	50 – 250
<u>Costos unitarios:</u>		
◆ Flotación Colectiva [US\$/t]	0,5	n.d.
◆ Planta de Moly [US\$/kg Mo]	0,8	n.d.



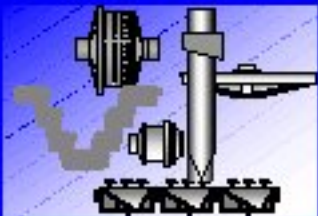
Flotación

❖ Etapas de flotación

Como se planteó en la introducción, las leyes de los productos y la recuperación metalúrgica son parámetros que se trata de maximizar, pero en la práctica se debe optar por valores que maximicen el "**óptimo económico**" del proceso. Lo anterior se debe a que estos parámetros se relacionan de manera inversa, como se ve en la figura.



Este aspecto conduce a especializar diferentes **etapas del proceso**, destinadas a maximizar cada factor por separado y en conjunto alcanzar un **óptimo** global técnico – económico de recuperación y ley de concentrado.

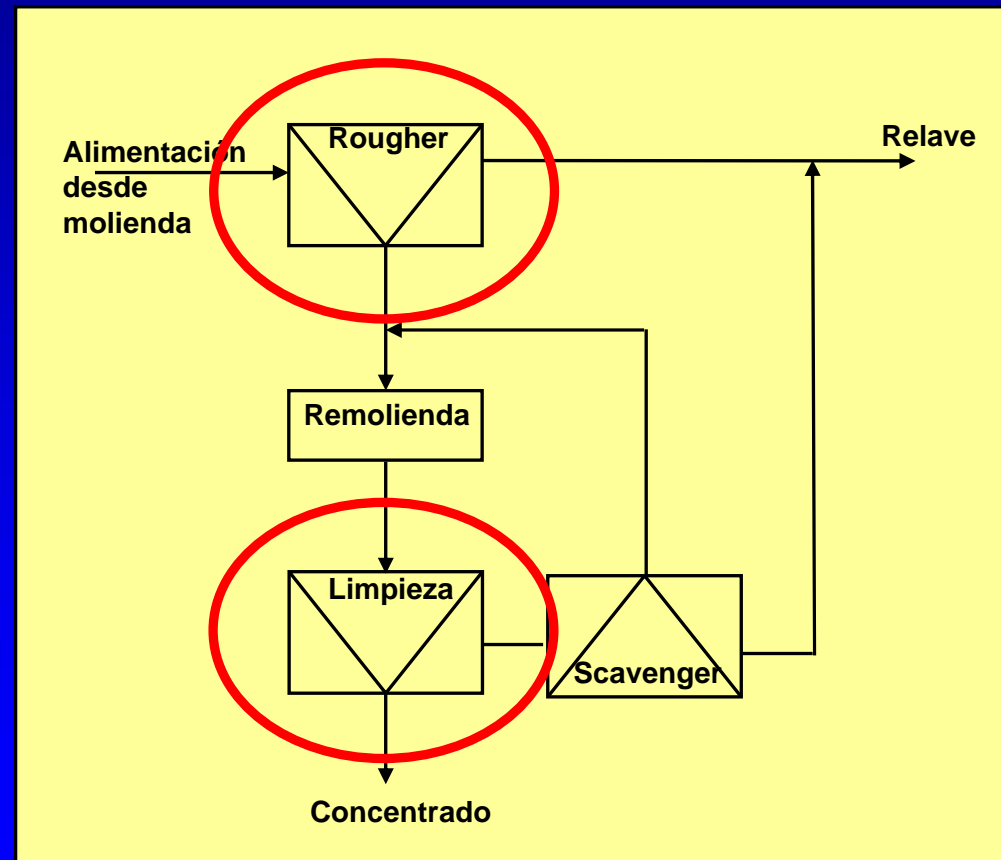
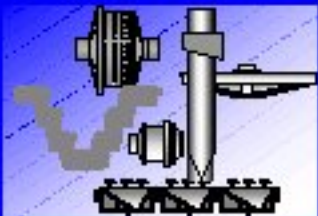


Flotación

➤ El mineral proveniente de la conminución es alimentado a una primera etapa de flotación **rougher o primaria**. Celdas con agitación mecánica, **maximización de la recuperación** (relave libre de especies de interés).

➤ El concentrado obtenido de la etapa anterior, requiere de una etapa previa de **remolienda de concentrados**, antes de seguir a una segunda etapa de flotación de **limpieza o cleaner**. Uso de celdas columnares, **maximización de las leyes de concentrado**.

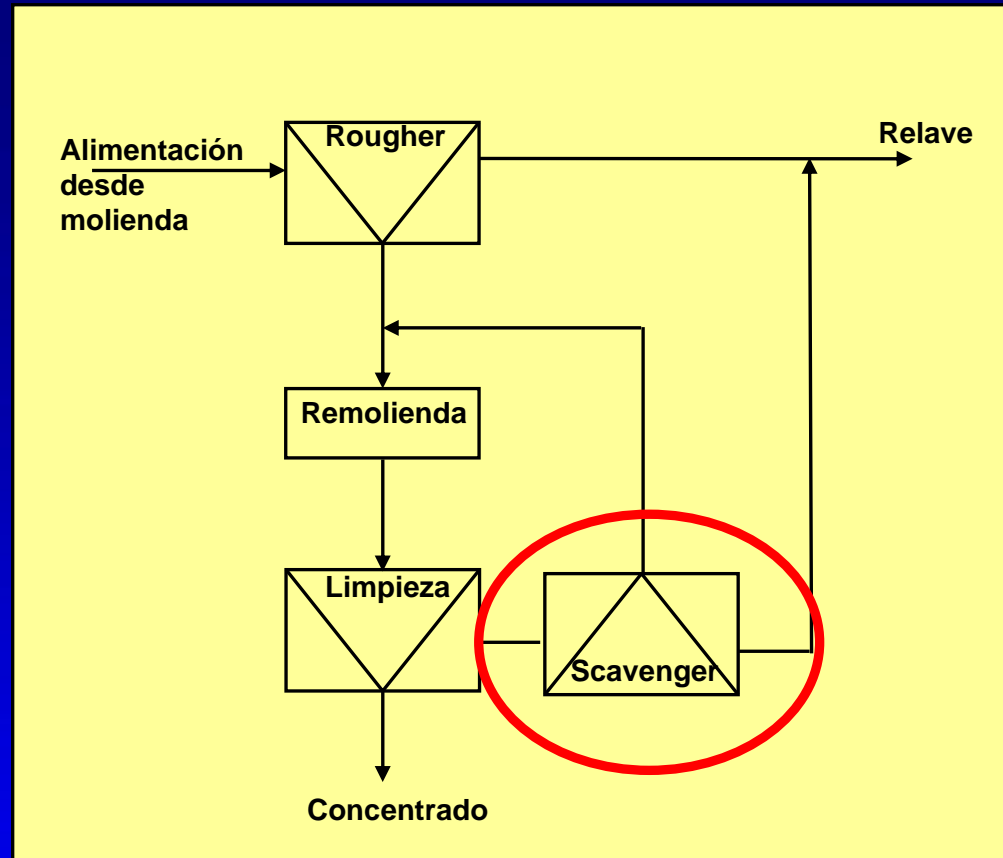
Puede usarse más de una de estas etapas: 1ª limpieza, 2ª limpieza, etc. De la última limpieza se genera el **concentrado final**.



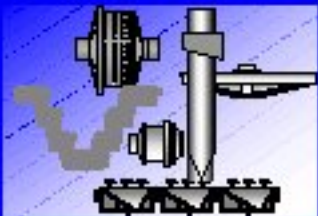
Flotación

➤ El relave de la limpieza suele ser retratado en una flotación **scavenger o de barrido**. Uso de celdas con agitación mecánica, **maximización de la recuperación**.

El concentrado de esta etapa retorna a la flotación de limpieza, con o sin remolienda.

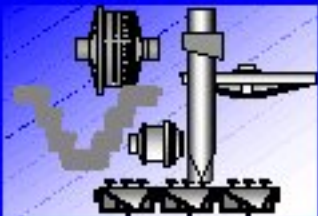


Como el **incremento en ley** que se alcanza con la flotación columnar va acompañado de una **pérdida significativa en recuperación**, los relaves de la columna deben ser retratados en celdas mecánicas, en la etapa denominada **scavenger – cleaner** (barrido – limpieza).



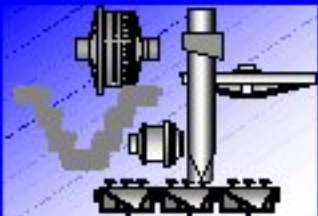
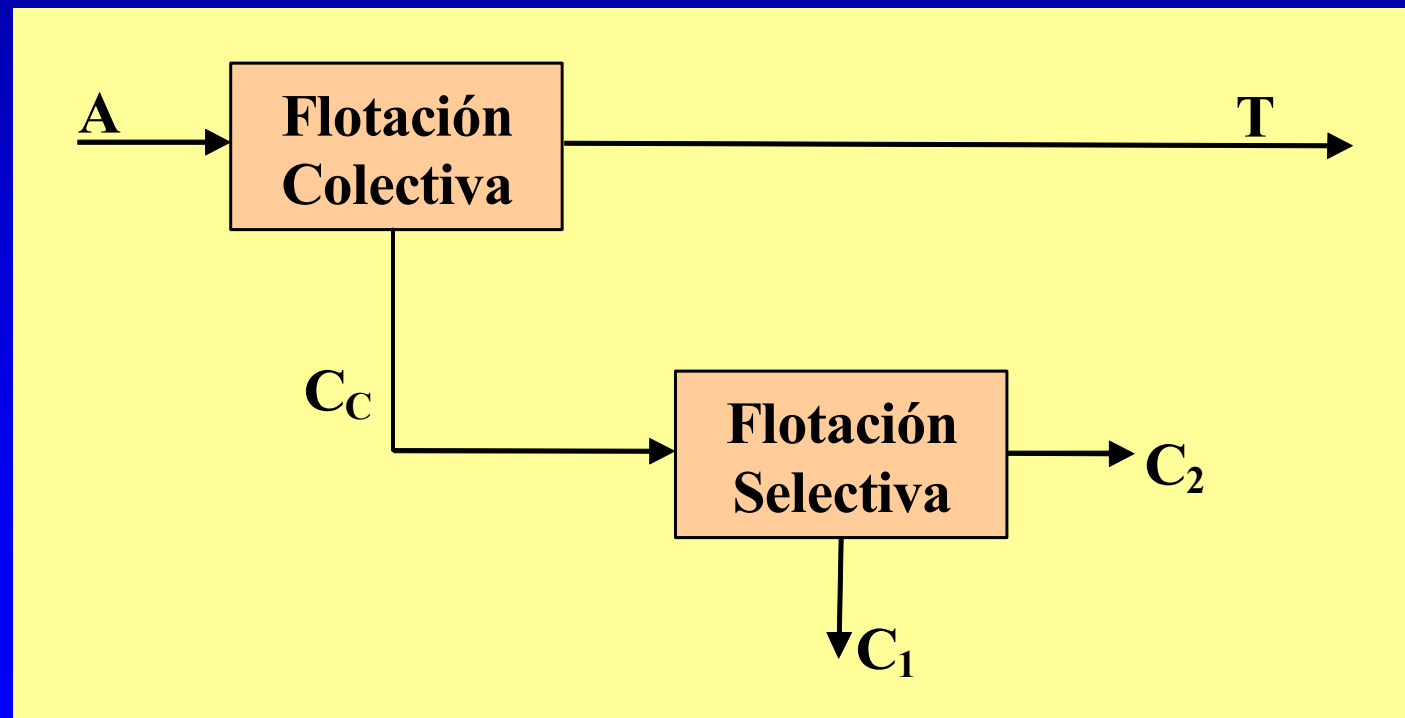
Flotación

- ◆ Cuando se tiene **más de una especie mineralógica de interés**, ya sea que se pretenda obtener diferentes productos comercializables o separar especies contaminantes, es además necesario introducir **más de un circuito**, como el descrito, con la finalidad de realizar una eficiente **separación selectiva**.
- ◆ Es habitual en estos casos y por razones obvias de eficiencias técnico-económicas, el proceder **primero a separar la o las especies más abundantes** que normalmente constituyen el relave. Con este fin se procede primero a separar un **concentrado colectivo** (en el que se encuentran las especies de interés) del relave. Se habla en este caso de un circuito o planta de **flotación colectiva**, la que está constituida por las diferentes etapas ya mencionadas.



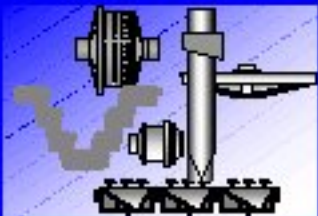
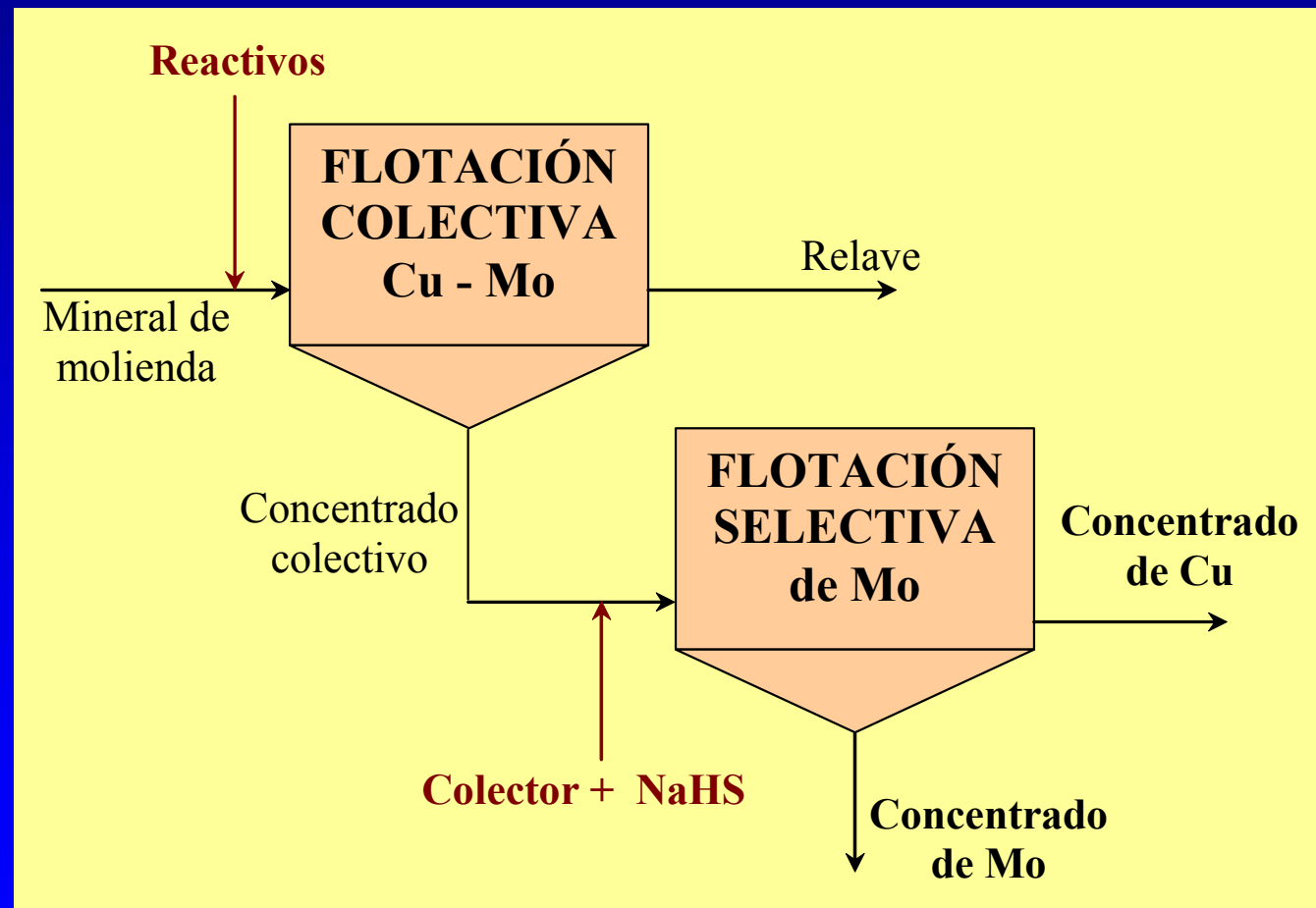
Flotación

- ◆ Tras sacar al relave (T) del circuito, el concentrado colectivo (C_C) debe ser procesado en una o más plantas de **flotación selectiva**, constituidas también por diversas etapas, donde esta vez tanto el concentrado como el relave final de cada una corresponde a un producto (C_i) y no a un material sin valor.



Flotación

Ejemplos en que se requiere más de una planta de flotación, son la concentración de minerales sulfurados de **cobre y molibdeno** y la concentración de **minerales poli metálicos**.



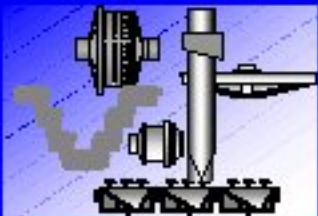
Flotación

❖ Equipos de flotación

Una máquina de flotación es esencialmente un reactor que recibe el nombre de **celda de flotación**. Ahí se produce: el contacto burbuja partícula, la adhesión entre ellas y la separación selectiva de especies.

Cualquier celda de flotación debe ser capaz de:

- Mantener una adecuada **suspensión y dispersión de la pulpa**.
- Posibilitar la incorporación de **gas** (aire).
- Disponer de una zona sin turbulencia, para **formación y remoción** de la **espuma**.
- Ser adecuada a las necesidades de recuperación y/o calidad (ley) del concentrado.
- Permitir la variación de algunos parámetros operacionales (flujo de aire, nivel, etc.).

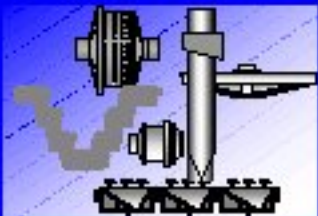


Flotación

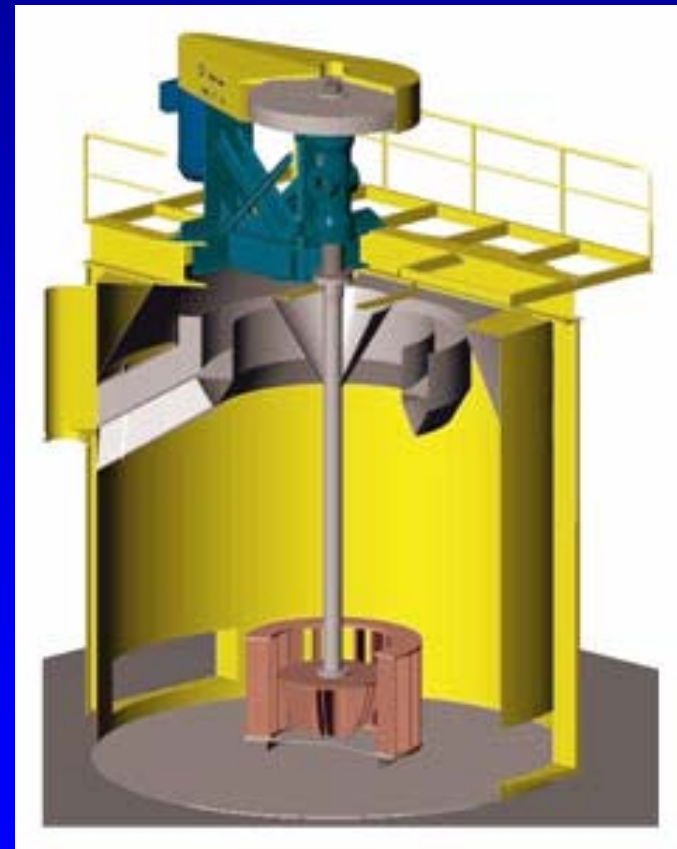
Las celdas de flotación se clasifican en dos grandes familias: **Celdas mecánicas** y **Celdas neumáticas**. Se presenta a continuación las principales características y ejemplos de ambos tipos de celdas.

➤ Celdas mecánicas o convencionales

Son las más comunes y las **más usadas** en la industria. Se caracterizan por tener un **impulsor o agitador mecánico** (rotor o impeler). Alrededor del eje del rotor se tiene un tubo concéntrico hueco que sirve de conducto para el **ingreso del gas** al interior de la pulpa, lo que ocurre en el espacio entre el rotor y un estator o difusor, donde es dispersado en pequeñas burbujas (1 - 3 mm).



Volumen: 0,5 a 300 m³

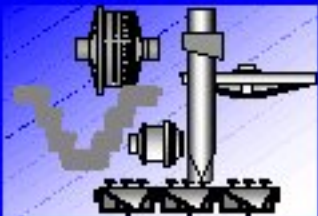


Flotación

En la zona próxima al arreglo **rotor – estator** existe una gran **agitación** de la pulpa, para favorecer el **contacto partícula – burbuja**. A partir de un nivel medio de la celda se tiene una zona menos turbulenta, donde el agregado burbuja-mineral hidrófobo asciende con menor probabilidad de romperse. A medida que las burbujas se mueven al nivel del labio de la celda, son arrastradas fuera por el empuje de las burbujas que vienen atrás.

Según el tipo de aireación se tiene:

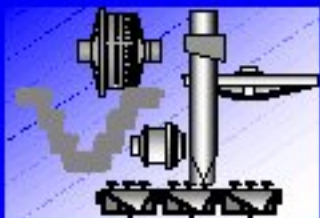
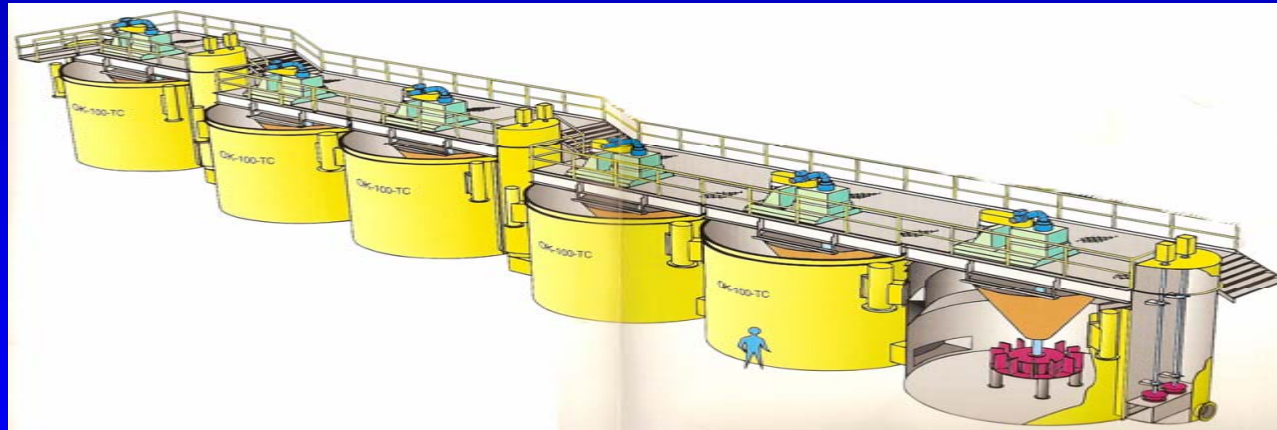
- **Celdas auto aireadas**, que utilizan el vacío creado por el movimiento del rotor para inducir o succionar el aire desde la atmósfera hacia abajo, por el tubo concéntrico alrededor del eje del rotor.
- **Celdas con aire forzado**, que reciben el aire desde un soplador.



Flotación

Las celdas de flotación son operadas usualmente en **serie**, con la pulpa fluyendo continuamente de una celda a la siguiente a través de traspasos. Al final de cada grupo de celdas se tiene una compuerta que se utiliza para controlar el nivel de la pulpa.

El tamaño y número de celdas se ajusta a las características de la alimentación (flujo, flotabilidad de las partículas), de manera de compatibilizar los requerimientos de recuperación y calidad del concentrado. La pulpa que se descarga desde la **última celda** es la **cola o relave**.

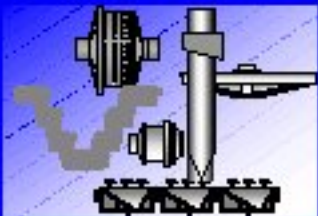


En general, un **banco** de celdas **con pocas unidades** (menor a 4), aumenta la probabilidad de **cortocircuitos**, afectando negativamente la recuperación.

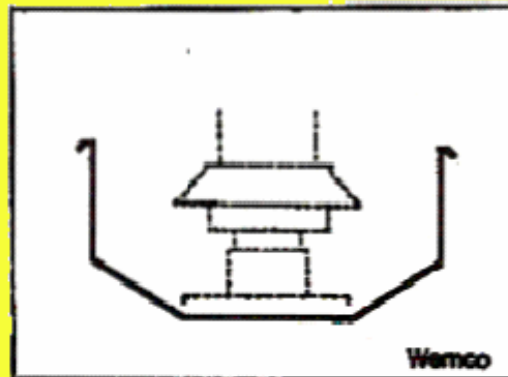
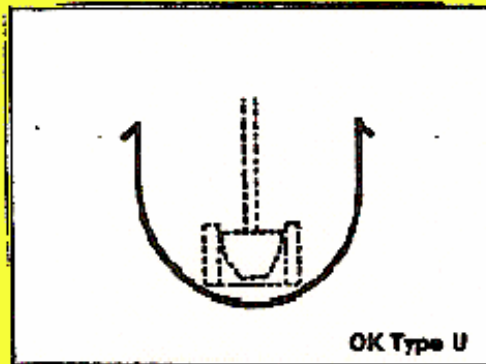
Flotación

No existe una forma o geometría estándar para las celdas convencionales. Estas pueden ser cuadradas, rectangulares o circulares, con fondo plano o curvo.

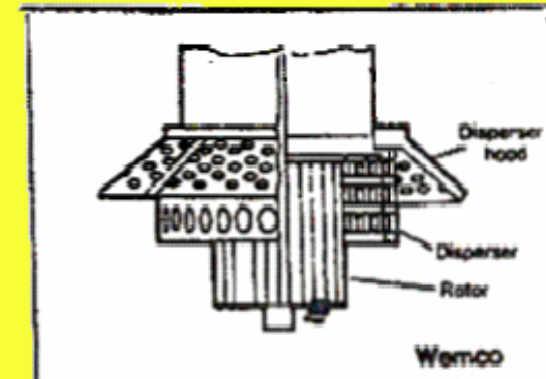
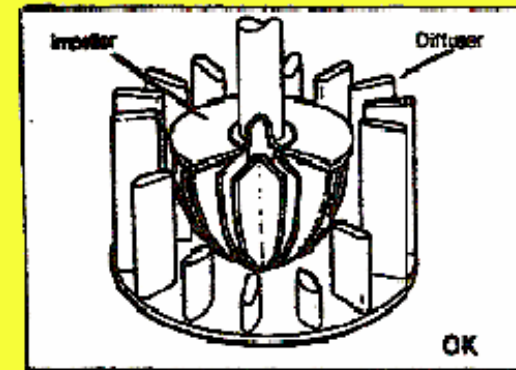
El diseño del **rotor** puede variar en forma, tamaño y número de "dedos" del rotor y estator, el espacio entre estos, etc. Todas estas diferencias inciden en cierto grado en la suspensión y homogenización de los sólidos, así como en el consumo de energía.



Esquema de la Celda

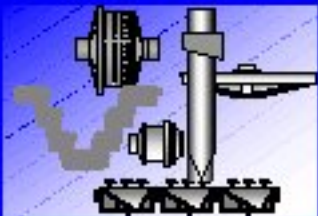
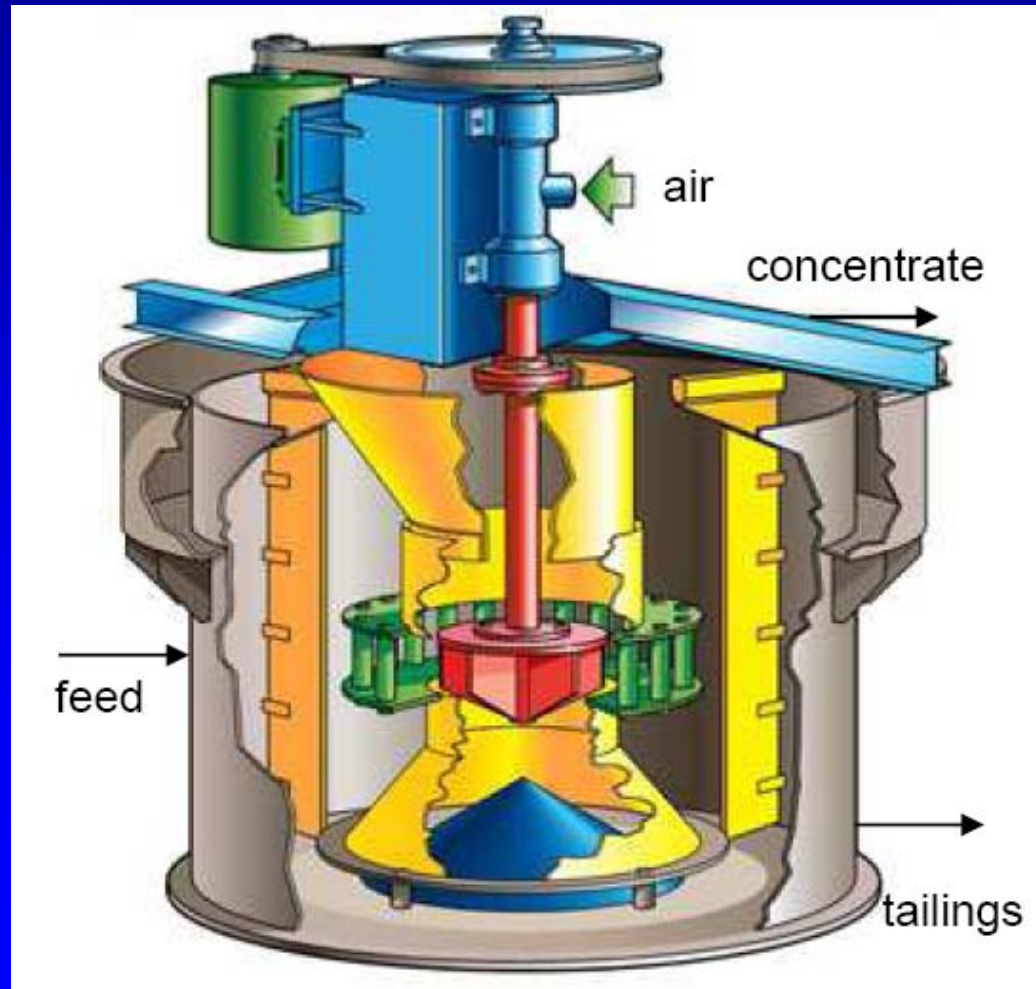


Esquema del Rotor y Difusor



Flotación

- ◆ La generación y características de las burbujas es una consecuencia de la **cantidad de aire** que ingresa a la celda, del **diseño** del arreglo rotor-estator y de la dosificación del **reactivo espumante**.

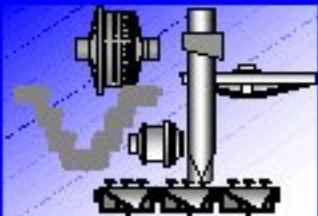


Flotación

◆ En las celdas mecánicas, la eficiencia de separación se ve perjudicada al realizarse **funciones** en cierto modo **incompatibles**. Tienen que producir **turbulencia** para mantener las partículas en suspensión y favorecer el **contacto** partícula – burbuja, mientras que tienen que, simultáneamente, presentar una **región en calma** para que se produzca una **separación** de las burbujas cargadas.

◆ Es inevitable arrastrar **ganga** al **concentrado**. Esto se debe a los siguientes mecanismos (**no selectivos**):

- Grado de liberación del mineral de interés
- La turbulencia de la pulpa en la interfase pulpa – espuma hace que entren partículas indeseables en la fase espuma.
- **Arrastre** a la espuma de partículas finas por el flujo de burbujas ascendentes.
- **Arrastre** a la espuma de partículas muy finas por la fracción de agua de alimentación que se reporta al concentrado.

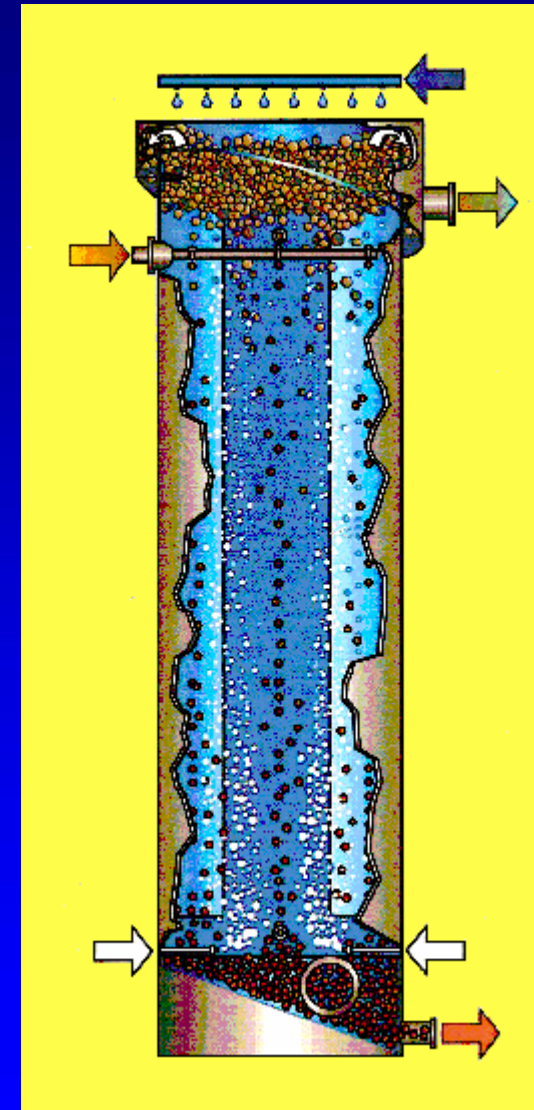
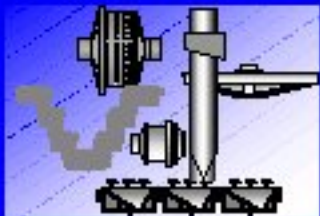


Flotación

➤ Celdas columnares

Las celdas de columna son los equipos **neumáticos** más usados en flotación, en especial en etapas de **limpieza de concentrados**, debido a las mejores leyes que es capaz de producir, aunque con menores recuperaciones.

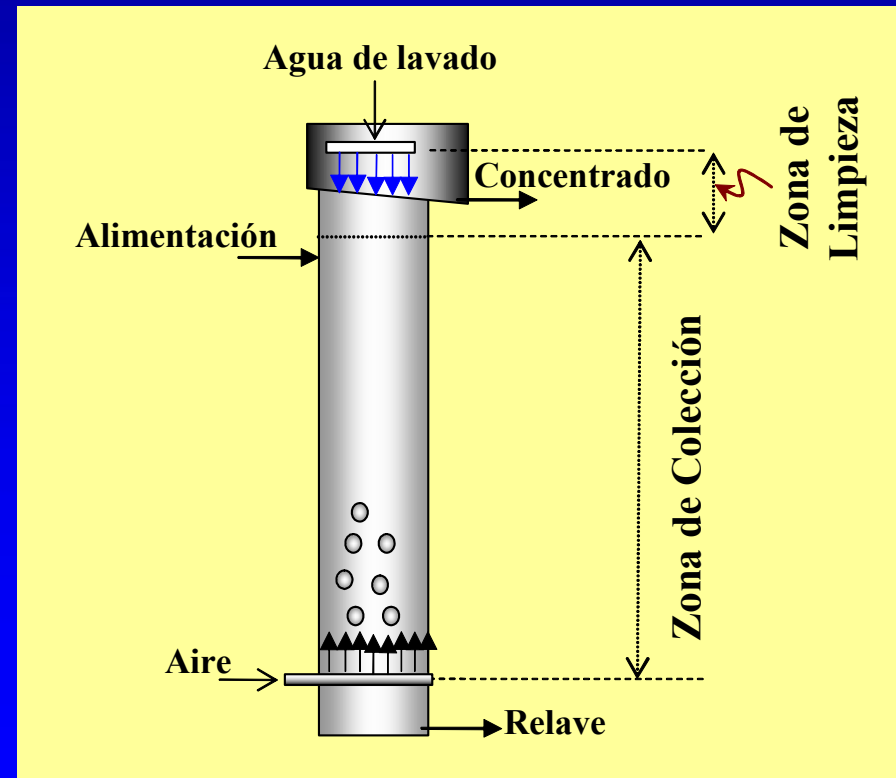
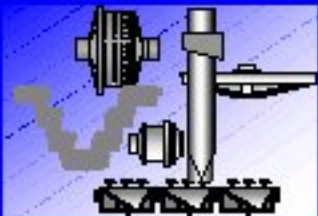
Típicamente tienen una altura de 9 a 15 m (la gran mayoría del orden de 13 m) y están **compuestas de secciones** cuadradas o rectangulares, con lados comúnmente de 1 m. Siendo normal el combinarlas en una misma estructura de 4 -16 unidades (secciones de 1 m²).



Flotación

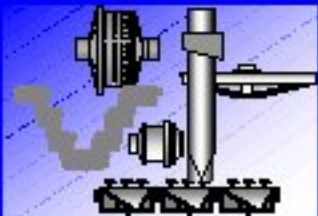
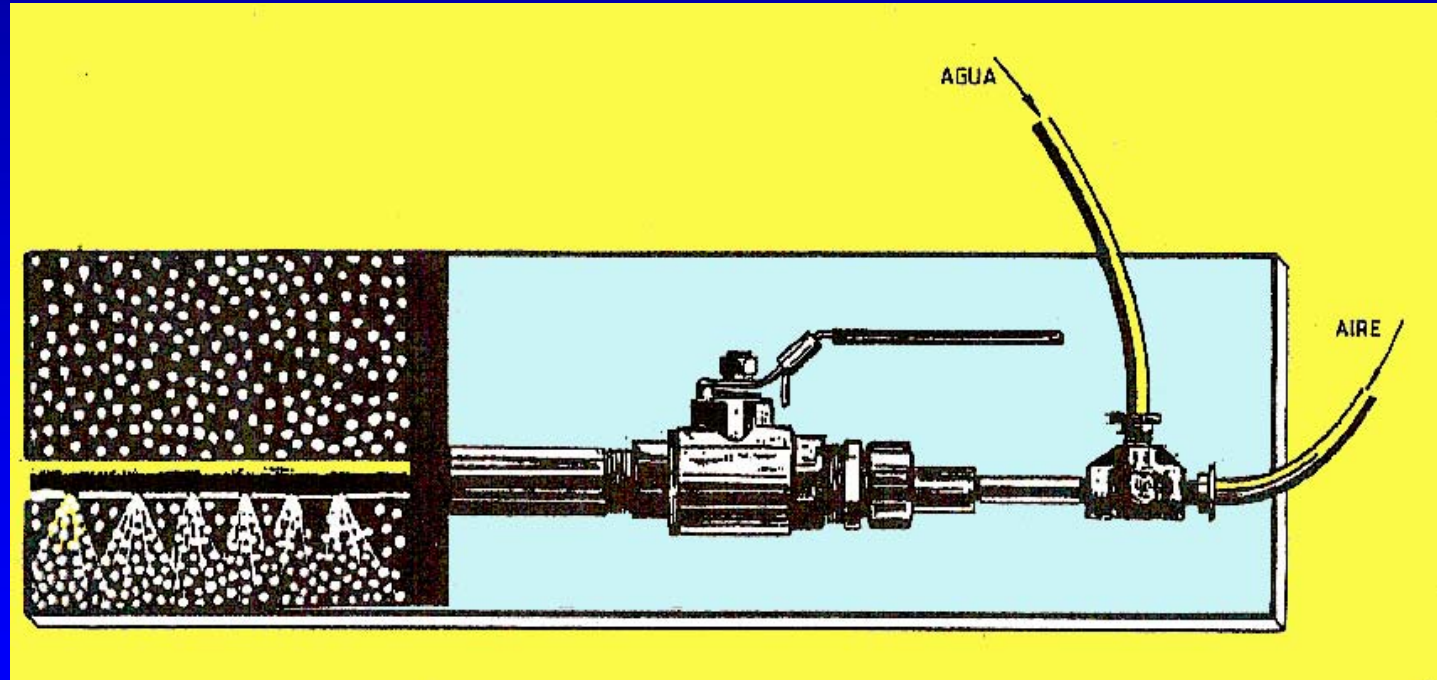
La pulpa se alimenta por debajo de la interfase pulpa - espuma, descendiendo y encontrándose en **contra-corriente** con las burbujas. Las partículas flotables se adhieren a las burbujas en la **zona de colección**, siendo transferidas a la **zona de limpieza** (espuma), donde el **agua de lavado** limpia la espuma de partículas de ganga arrastradas mecánicamente. El agua de lavado se agrega sobre o dentro de la espuma, normalmente con un arreglo de tubos perforados.

El aire ingresa a la columna a través de **burbujeadores (inyectores o “spargers”)** instalados horizontalmente en una o más corridas. El diseño de los burbujeadores es tal que permite que sean reemplazados sin detener la operación.



Flotación

Los diseños actuales (de fábrica) han incorporado mezcladores externos donde se junta aire y agua, formando micro burbujas, antes de entrar a los burbujeadores, y/o la posibilidad de variar la sección transversal por donde ingresa el aire. No obstante, en muchas operaciones se opta por la construcción de sus propios burbujeadores.



Flotación

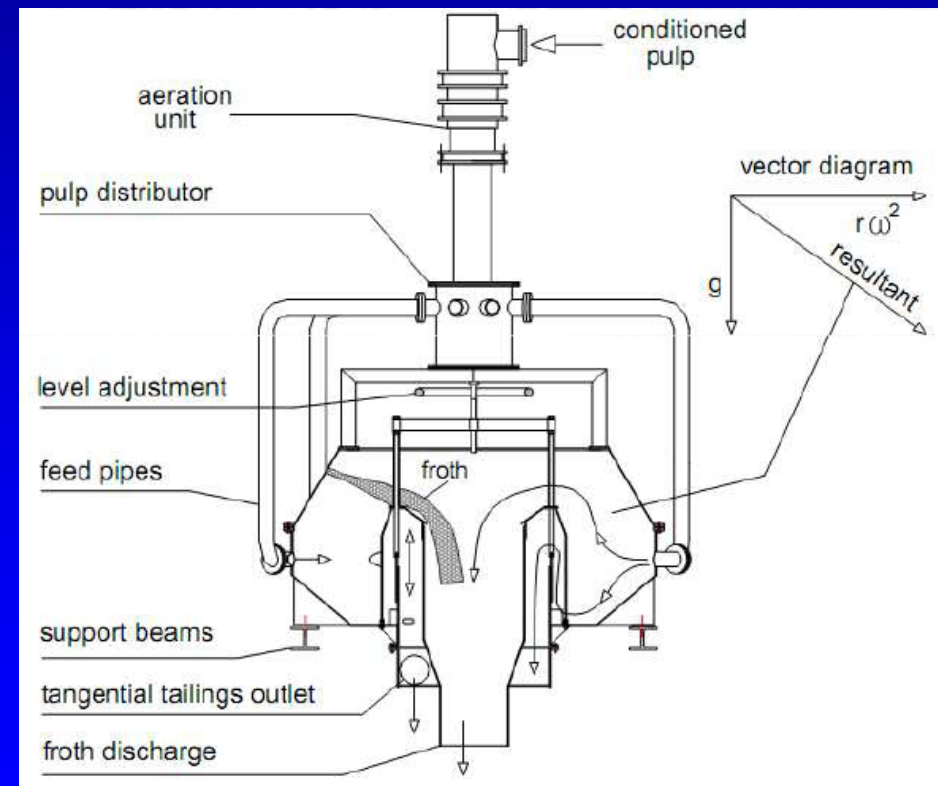
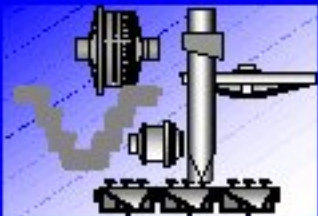
➤ Otras celdas neumáticas

Aparte de la celdas columna, que son actualmente las más comunes en las plantas industriales, existe una serie de otras alternativas de tipo neumático. Las siguientes son un ejemplo de ellas:

◆ Celda G Cell (Giratory cell, Imhof)

La pulpa de alimentación, previo paso por aireadores, entra a la celda de manera tangencial en más de un punto.

El concentrado se recoge en la parte central superior del equipo, en tanto que las colas salen por su parte central inferior.

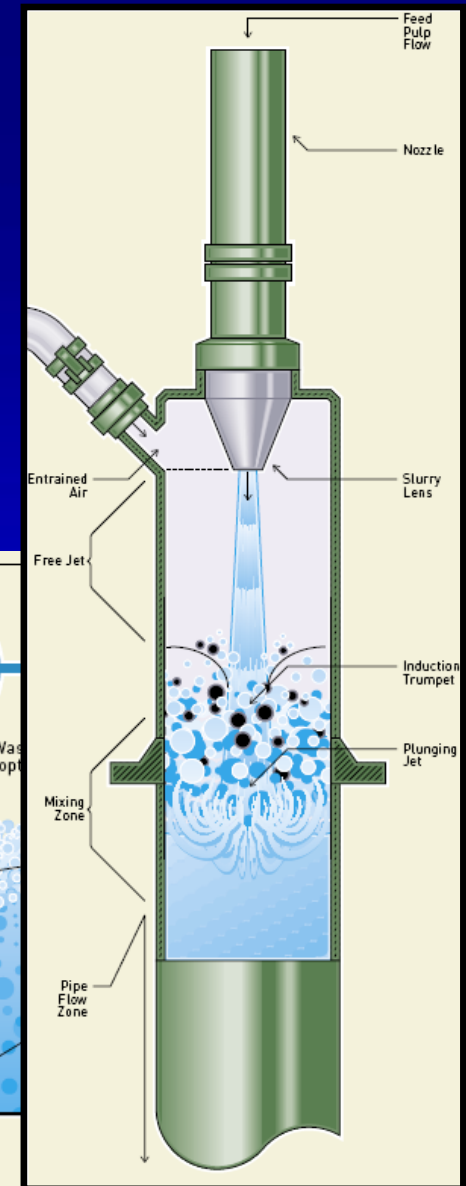
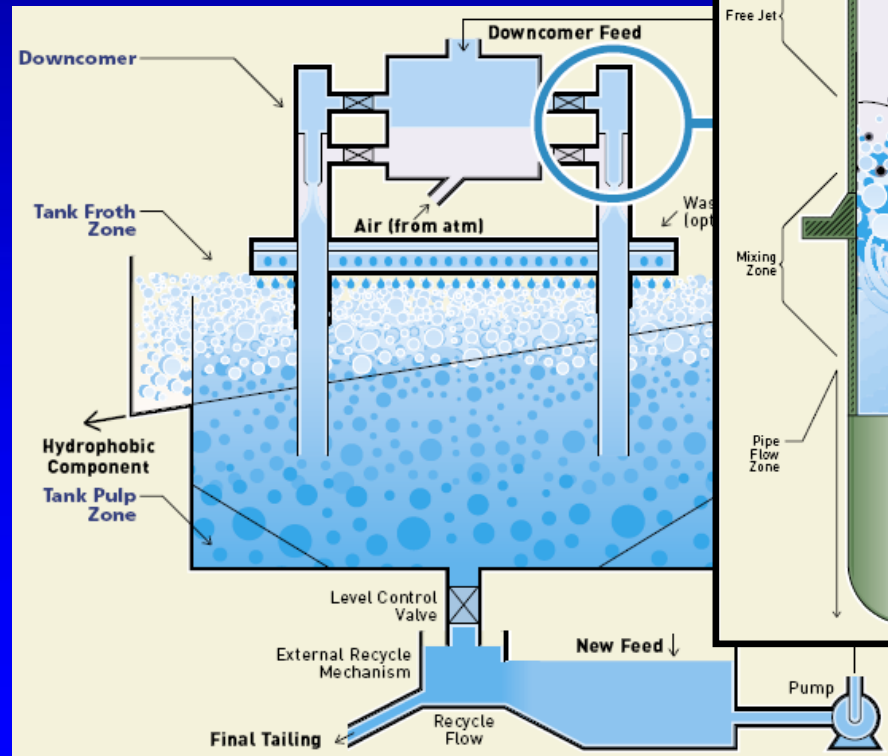
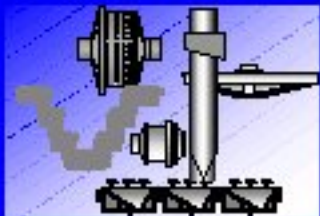


Flotación

◆ Celda Jameson (Xstrata)

La alimentación a esta celda es a través de tubos verticales (downcomer), en donde se mezcla con aire y se produce el contacto partícula – burbuja. La entrada a presión de la pulpa de alimentación provoca un vacío que permite la entrada de aire sin requerir de un compresor.

Cuando la pulpa emerge al interior de la celda por el fondo del downcomer, los agregados burbuja – partículas hidrofóbicas pasan a la zona de espuma y se retiran como concentrado.

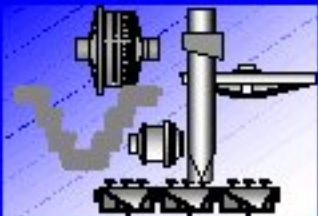


Flotación

❖ Circuitos de flotación

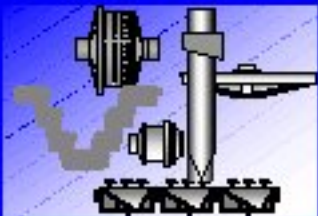
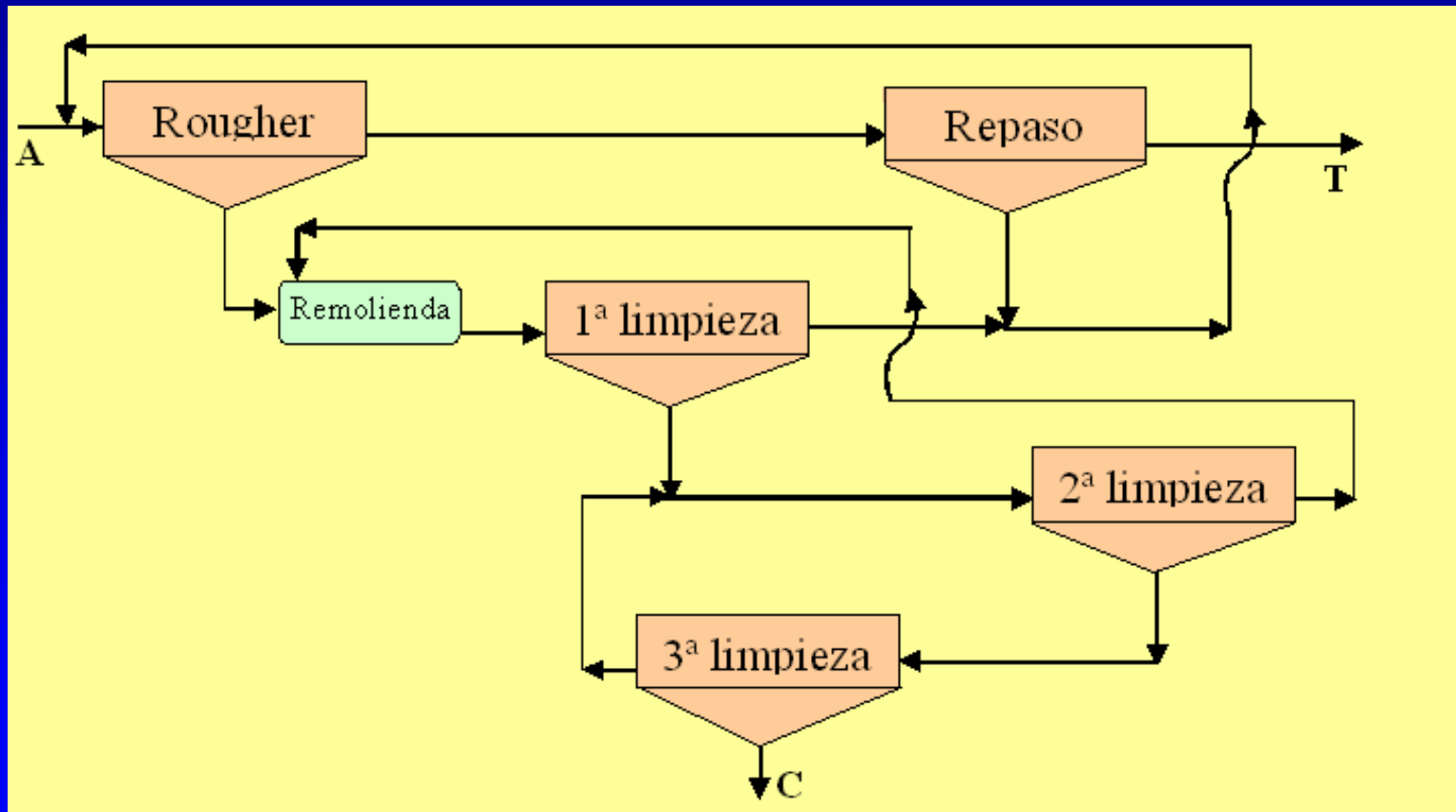
Dependiendo de la especie de la que se trate y del tipo de máquinas de flotación involucradas, se tendrá diversas configuraciones de circuitos posibles, los que involucrarán bancos de **celdas mecánicas en serie**, varios de ellos en paralelo (para dar la capacidad de tratamiento requerida), **columnas de flotación** e incluso etapas intermedias de **remolienda de concentrados**. Aunque las combinaciones son muchas, **2 son los circuitos más típicos** o al menos los que mejor los ejemplifican.

*En los siguientes diagramas, **una etapa de flotación** está referida a **múltiples equipos**. En las etapas constituidas por celdas mecánicas, normalmente se trata de uno o más bancos en paralelo, de N celdas cada uno. En el caso de las etapas con celdas columna, se refiere a varias columnas en paralelo.*



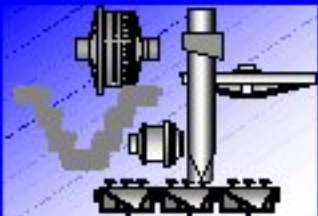
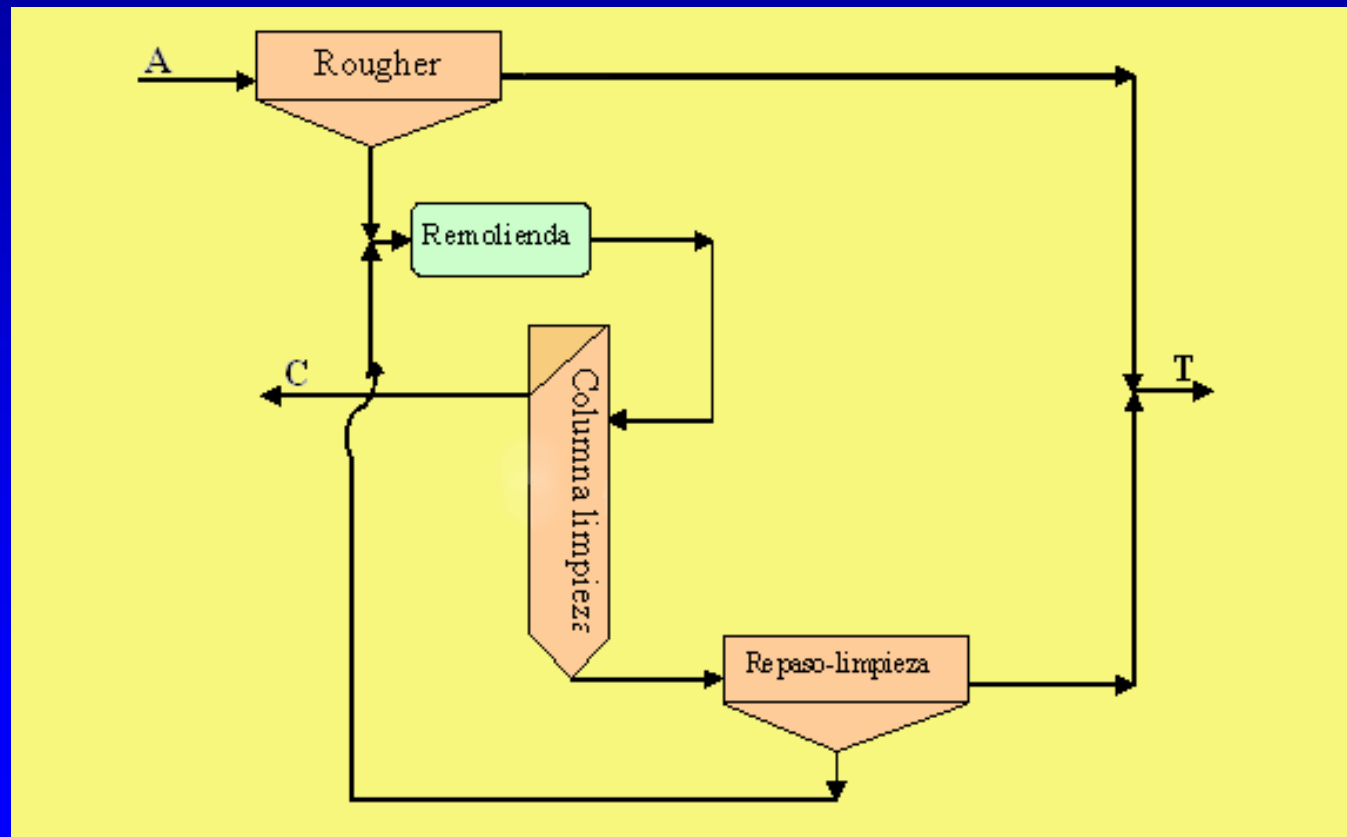
Flotación

El primer caso corresponde a los circuitos utilizados **antes de la introducción a escala industrial de la flotación en columnas**, los que podían tener un número variable de etapas de limpieza, siempre en una configuración en **contra-corriente**:



Flotación

Por su mejor capacidad de limpieza, la introducción de la flotación en columnas permitió reemplazar varias etapas de limpieza, por una sola etapa en columna. Al incremento en ley que se alcanza con la columna le acompaña una menor recuperación, por lo que los relaves deben ser retratados en bancos de celdas mecánicas, en una etapa de barrido de limpieza. Esto da origen al **circuito más usado actualmente**:

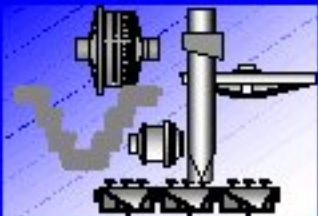


Flotación

❖ Cinética de flotación

Las diferentes partículas, caracterizadas según su especie, tamaño y liberación, son recuperadas o no en el concentrado, como resultado de las condiciones de operación en la flotación (tipo y dosis de reactivos, pH, Cp, tipo de celda, agitación, flujo de aire, granulometría, etc.).

Las partículas son recuperadas con **diferentes velocidades**, fundamentalmente relacionadas con sus probabilidades de flotación. Esta velocidad de flotación se expresa por medio de la **cinética de flotación**. A continuación se analiza la cinética de flotación en celdas agitadas mecánicamente para los casos de: flotación batch, flotación en una celda en continuo y flotación en continuo en un banco de N celdas en serie.



Flotación

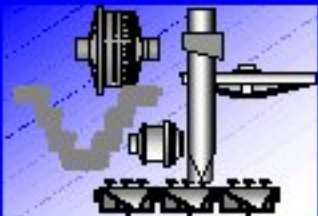
◆ Cinética de flotación batch

Si se considera la ecuación de la cinética de primer orden, presentada en el capítulo de fundamentos:

$$C(t) = C_0 e^{-Kt}$$

Se deduce que para un tiempo $t \rightarrow \infty$ se tendría que $C = 0$, lo que significaría que todas las partículas que contienen la especie de interés deberían flotar, lo que nunca se alcanza. Por más que se flote, **permanecerá siempre en la celda una cierta cantidad C_∞** de finos. Para corregir este aspecto, la ecuación anterior se reescribe como:

$$\frac{C(t) - C_\infty}{C_0 - C_\infty} = e^{-Kt}$$



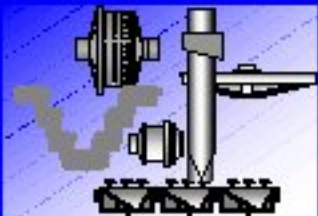
Flotación

Considerando que la recuperación (R) a un cierto tiempo t , corresponde a la razón entre los finos recuperados durante dicho tiempo y los finos iniciales en la celda:

$$R(t) = \frac{C_0 - C(t)}{C_0}$$

Análogamente, existirá una recuperación a tiempo infinito, R_∞ , dada por:

$$R_\infty = \frac{C_0 - C_\infty}{C_0}$$



Flotación

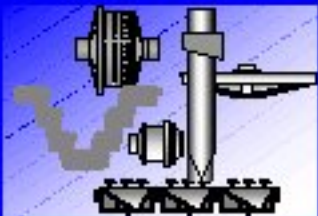
Por lo tanto, reemplazando ambas expresiones en la ecuación cinética original, se obtiene la **ecuación cinética de la flotación batch**:

$$R(t) = R_{\infty} \left(1 - e^{-K t} \right)$$

Donde K se conoce como la **constante cinética de flotación** de la especie o elemento de interés (min^{-1}) y R_{∞} es la **recuperación a tiempo infinito** (máxima recuperación obtenible de la especie o elemento de interés, para las condiciones de flotación dadas).

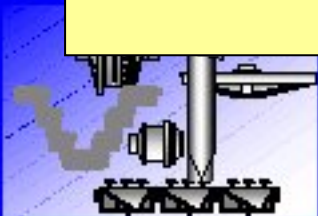
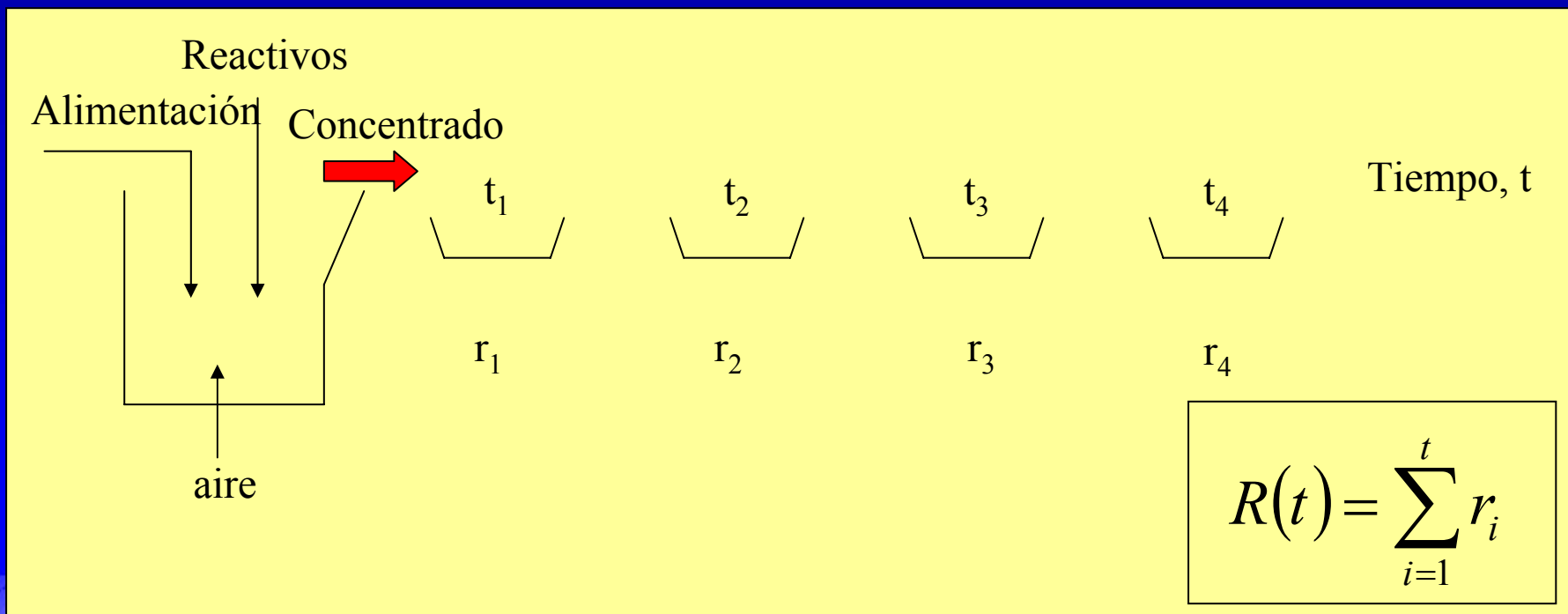
Lógicamente, con las mismas bases así establecidas, se puede plantear una ecuación equivalente para cada especie presente en el mineral, y en consecuencia existirán parámetros cinéticos para cada una de ellas.

Aunque existen varios otros modelos cinéticos, éste es el más usado y normalmente sirve de base para los demás.



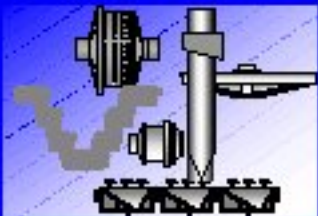
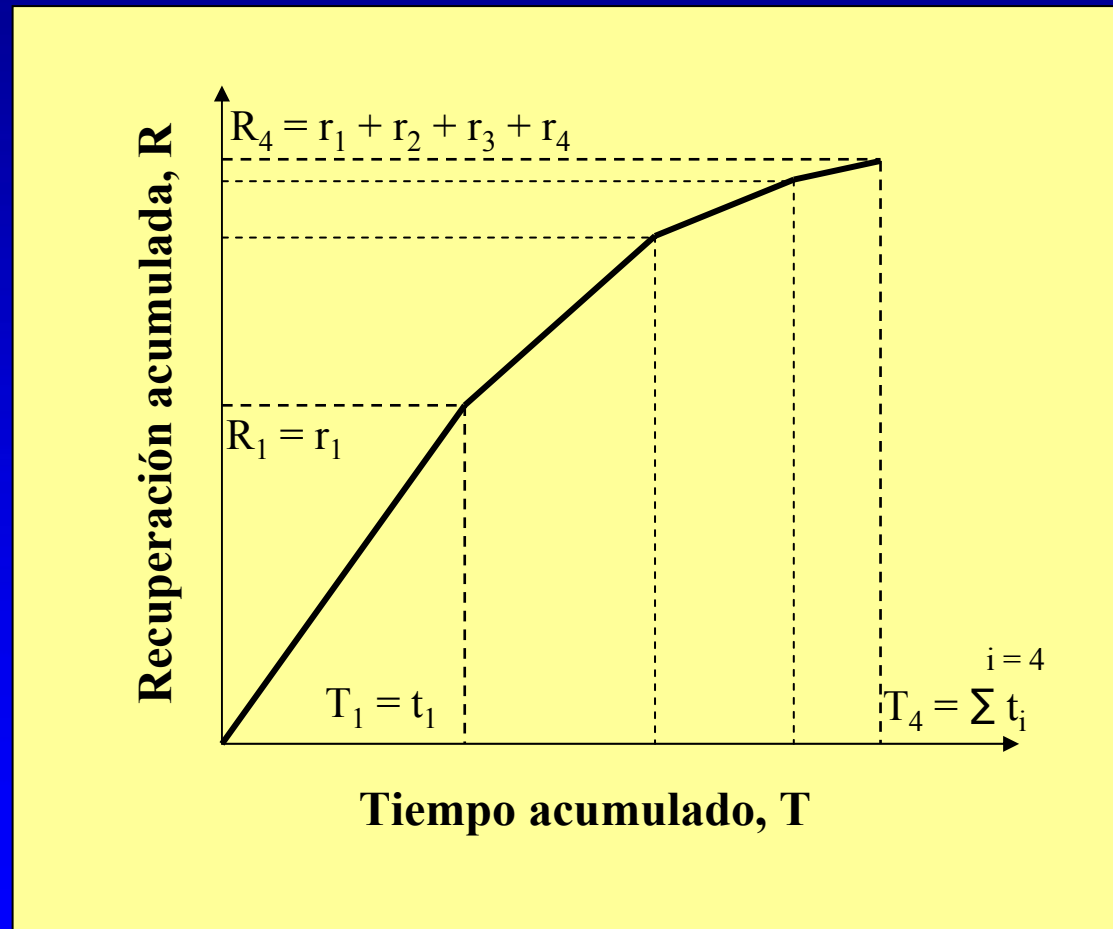
Flotación

Para establecer los parámetros cinéticos K y R_{∞} , de un cierto mineral, se utiliza un procedimiento de laboratorio batch en el cual se colecta concentrados parciales a diferentes tiempos (t_1, t_2, t_3, \dots), los que son pesados y caracterizados por ley del elemento de interés. Con los resultados obtenidos se calcula la recuperación para cada tiempo (r_1, r_2, r_3, \dots) y la recuperación acumulada en el tiempo ($R(t)$).



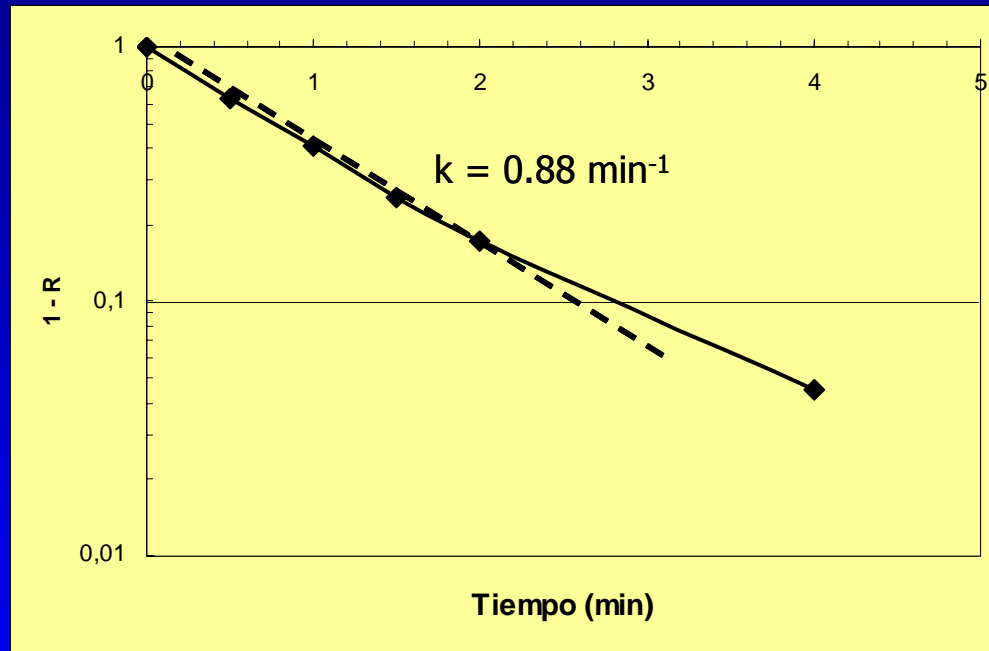
Flotación

Con estos datos se puede construir el gráfico de recuperación (acumulada) en el tiempo

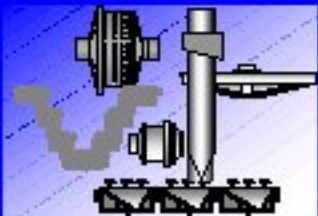


Flotación

Al graficar los valores experimentales en coordenadas semi-logarítmicas, como se muestra en la figura, se obtiene una recta de pendiente $-K$.

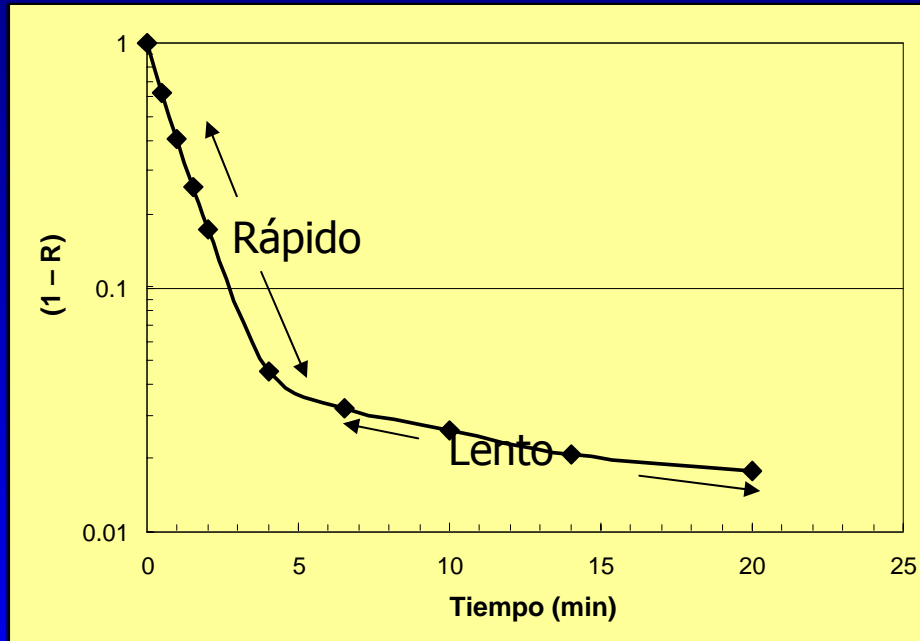


Ambos parámetros (K y R_{∞}) pueden ser determinados simultáneamente utilizando planillas de cálculo, lo que además permite la minimización de las diferencias de los valores experimentales con los de la ecuación, de manera que los valores finales representan mejor a los reales.



Flotación

Fracciones rápida y lenta

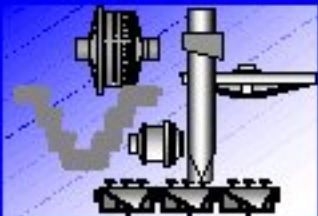


En vez de considerar sólo un mineral que flota con una constante cinética K , se pueden considerar dos fracciones: rápida y lenta.

Se tiene entonces una fracción rápida θ_r con una constante cinética k_r y una fracción lenta θ_l con una constante cinética k_l .

El modelo se transforma en:

$$R = \mathcal{G}_r (1 - \exp(-k_r t)) + \mathcal{G}_l (1 - \exp(-k_l t))$$
$$\mathcal{G}_r + \mathcal{G}_l = 1 \text{ (ó } R_\infty \text{)}$$



Flotación

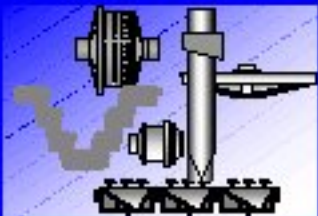
◆ Modelo de Klimpel

Si se extiende el modelo anterior (fracciones rápida y lenta) a fracciones infinitesimales, cada una con su constante cinética, se puede escribir la recuperación acumulada global del siguiente modo:

$$R(t) = R_{\infty} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{K t} \right) \left(1 - e^{-K t} \right) \right\}$$

donde K corresponde a la constante cinética de la fracción que flota más rápido.

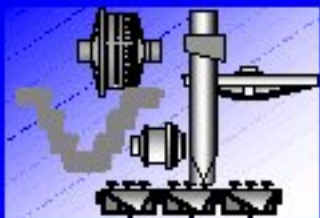
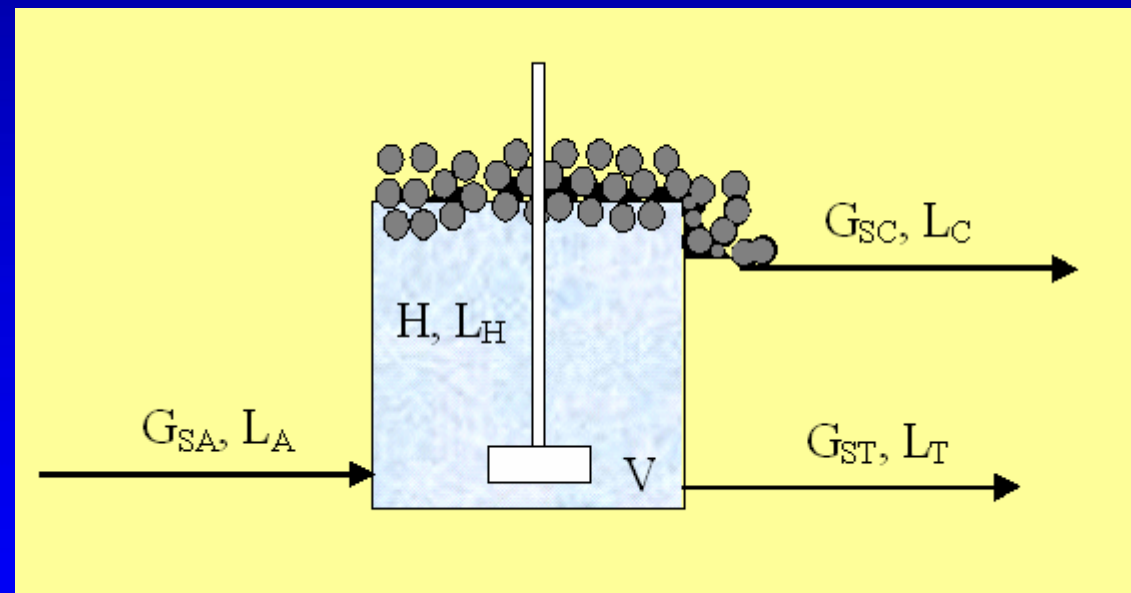
Este es el modelo más usado ya que normalmente ajusta mejor los datos cinéticos en la parte final de la curva (valor permanente).



Flotación

◆ Cinética de la flotación en continuo en una celda

En este caso se tiene **flujos continuos** de alimentación (G_{SA}), concentrados (G_{SC}) y relaves (G_{ST}), fluyendo hacia o desde un volumen efectivo de pulpa V y con leyes de una especie o elemento de interés dado (L_A , L_C y L_T , respectivamente); como se ilustra en la figura.



En el interior de la celda, en el equilibrio, existe una cantidad en peso constante de mineral denominada holdup (H), caracterizada por una ley L_H .

Flotación

Por definición, el flujo de la especie o elemento de interés, corresponderá a la cantidad de dicha especie presente en la celda, multiplicada por la velocidad a la que ésta flota, vale decir:

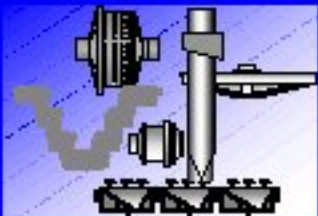
$$G_{SC} L_C = H L_H K$$

Si se define el tiempo medio de residencia, τ , como el tiempo medio que pasan las partículas de mineral en la celda, se tendrá que:

$$\tau = \frac{H}{G_{ST}} = \frac{V}{Q_{TT}}$$

V es el volumen de pulpa en la celda.

Q_{TT} es el flujo volumétrico de pulpa en el relave.



Por diseño, una celda agitada mecánicamente, es prácticamente un **mezclador perfecto**, por lo que $L_T \approx L_H$.

Flotación

Por definición:

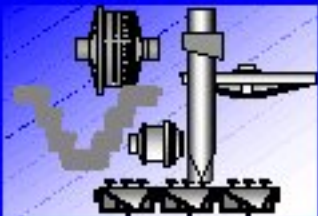
$$R = \frac{G_{SC} L_C}{G_{SA} L_A}$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores y ordenando, se obtiene:

$$R = \frac{H L_T K}{(1 + K \tau) G_{ST} L_T} = \frac{\tau G_{ST} K}{(1 + K \tau) G_{ST}}$$

$$\Rightarrow R = \frac{\tau K}{(1 + K \tau)}$$

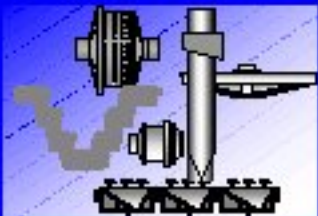
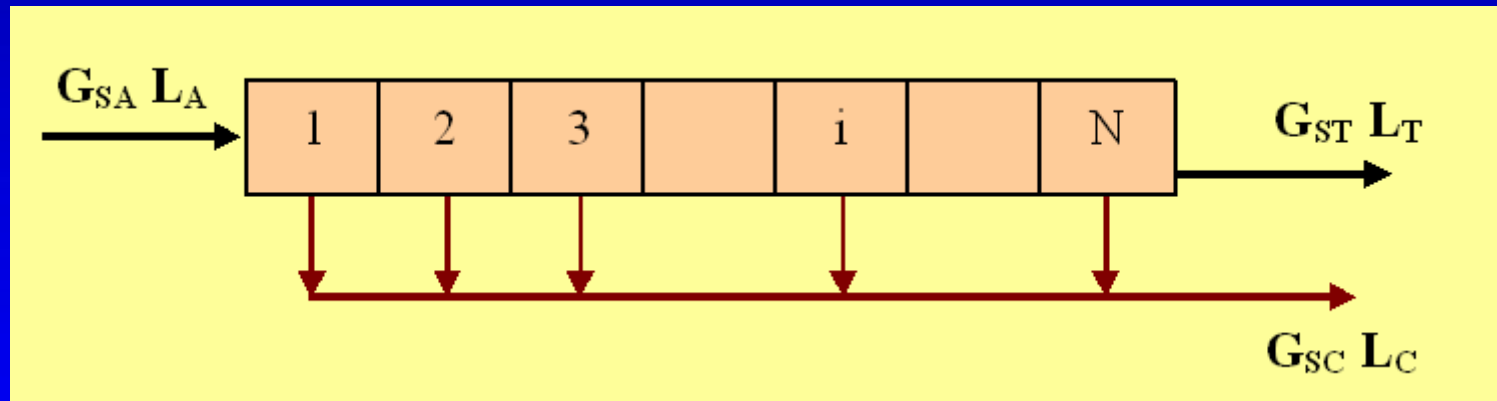
K [min^{-1}] y τ [min].



Flotación

◆ Cinética de la flotación en continuo en un banco de N celdas en serie

En la práctica no se utiliza sólo una celda operando en continuo, sino un banco de N celdas en serie, como el que se ilustra en la figura. Se requiere entonces establecer su recuperación global, \mathcal{R} .



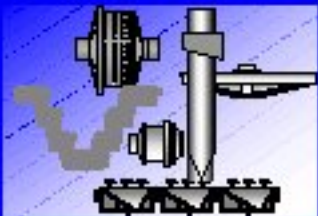
Flotación

Si se considera los flujos parciales de finos por celda y se utiliza el concepto de recuperación de una celda en continuo (R), se obtiene:

Celda #	Alimentación	Concentrado	Relave
1	$G_{SA} L_A$	$G_{SA} L_A R$	$G_{SA} L_A (1 - R)$
2	$G_{SA} L_A (1 - R)$	$G_{SA} L_A (1 - R) R$	$G_{SA} L_A (1 - R)^2$
·	·	·	·
·	·	·	·
N	·	·	$G_{SA} L_A (1 - R)^N$

Por definición, la recuperación global del banco, \mathcal{R} , corresponde a la razón entre el flujo de finos presente en el concentrado global del banco y el flujo de finos de alimentación:

$$\mathcal{R} = \frac{\text{Finos en Concentrado}}{\text{Finos en Alimentación}} = \frac{\text{Finos en Alimentación} - \text{Finos en Relave}}{\text{Finos en Alimentación}}$$



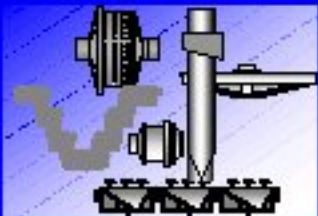
Flotación

Dado que la **alimentación global** del banco corresponde a la alimentación a la primera celda y que el **relave global** del banco corresponde al relave de la N_{esima} celda, se tiene:

$$\mathfrak{R} = \frac{G_{SA} L_A - G_{SA} L_A (1-R)^N}{G_{SA} L_A}$$

Como no es posible, ni siquiera con infinitas celdas, alcanzar un 100% de recuperación ($\mathfrak{R} = 1$), también se incorpora aquí el concepto de R_{∞} , por lo que, finalmente, reemplazando la recuperación de una celda R , se tiene:

$$\mathfrak{R} = R_{\infty} \left\{ 1 - (1 + K \tau)^{-N} \right\}$$



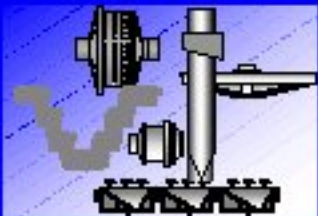
Flotación

❖ Principios de dimensionamiento (celdas agitadas mecánicamente)

A partir de un estudio de la cinética batch, en condiciones de flotación ya definidas, y una vez determinados los parámetros cinéticos de flotación correspondientes (\mathfrak{R}_∞ y K), es posible **dimensionar** la flotación, estableciendo el **tamaño y número de celdas** más convenientes, para tratar un flujo de mineral dado y alcanzar una recuperación objetivo (óptimo técnico-económico).

Se considera que al realizar el proceso en continuo a nivel industrial bajo las **mismas condiciones** definidas, dichos **parámetros no se modifican significativamente** y pueden usarse para el dimensionamiento.

Definida la recuperación (\mathfrak{R}) que se quiere alcanzar se determina, **para cada posible tamaño de celda**, el número de ellas requerido por banco, utilizando la ecuación de la recuperación de un banco de N celdas en serie:



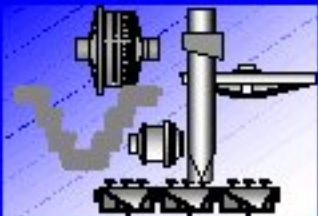
$$N = - \frac{\log\left(1 - \frac{\mathfrak{R}}{R_\infty}\right)}{\log(1 + K \tau)}$$

Flotación

Para los diferentes tipos de celdas disponibles, se considera sus **volúmenes útiles** y con ellos y el **flujo volumétrico** de pulpa que se requiere tratar, Q_T , se determina los **tiempos de residencia** τ correspondientes, según:

$$\tau [\text{min}] = \frac{V_{\text{util}} [m^3] \cdot 60 \left[\frac{\text{min}}{h} \right]}{Q_T \left[\frac{m^3}{h} \right]}$$

El número necesario de bancos en paralelo es consecuencia de la relación entre el flujo total del mineral a tratar y la capacidad de las celdas consideradas. En general **se buscará utilizar más de 4 celdas por banco** para evitar pérdidas de recuperación por cortocircuito.

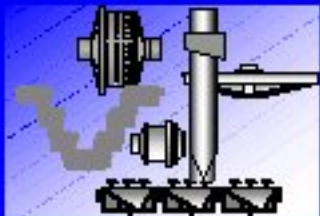


Flotación

❖ Principios de dimensionamiento (columnas)

En el caso de las columnas, **no existe un test a escala de laboratorio** que permita escalar resultados a nivel industrial, tal y como para las celdas convencionales. Esto lleva a realizar pruebas a **escala piloto**, en las que se utiliza el equivalente a una sección longitudinal de una columna industrial, i.e., una columna de altura equivalente a las industriales pero de pequeña sección circular (típicamente 2" de diámetro).

En estas columnas pilotos se ensaya, variando el tonelaje de alimentación y bajo condiciones de flotación pre-establecidas (aireación y reactivos), hasta alcanzar la ley de concentrado requerida.



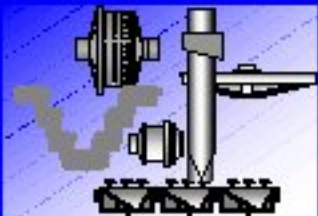
Flotación

Una vez que se ha alcanzado la ley de concentrado deseada, se determina dos factores de escalamiento:

Capacidad de Levante (CL): corresponde a la capacidad de transporte de mineral al concentrado, por unidad de área, en [toneladas de concentrado / h / m²].

Área Unitaria (AU): corresponde a la capacidad de tratamiento de mineral alimentado, por unidad de área, en [toneladas de alimentación / h / m²].

Ambos parámetros son **escalables** y permiten determinar el área requerida a nivel industrial. Al obtener áreas diferentes, se escoge la **mayor**.



Flotación

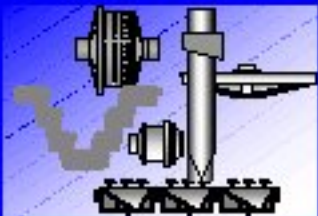
❖ Variables y perturbaciones en la flotación

En la flotación inciden múltiples variables y perturbaciones, lo que hace muy complejo el control y manejo de su operación.

Una **perturbación** es toda aquella característica del mineral o del proceso que influye significativamente en él, pero que **no puede ser modificada ni controlada**. Estas perturbaciones pueden ser medidas, en cuyo caso al menos se conoce su variación en el tiempo, o no medidas, en cuyo caso ni siquiera se sabe cuando o como varían.

Perturbaciones más comunes e influyentes

Medidas	No Medidas
<ul style="list-style-type: none">• Ley de alimentación• Flujo de alimentación• Granulometría de la alimentación	<ul style="list-style-type: none">• Mineralogía de la alimentación• Composición del agua• Modificación de superficies



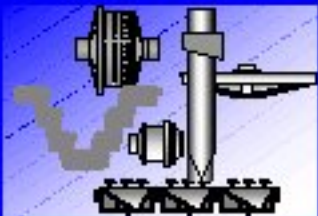
Flotación

Las **variables** operacionales **pueden ser modificadas**, dentro de ciertos rangos, ya sea manual o automáticamente.

Según si son variables sobre las que se actúa para modificar el proceso o si son variables de salida que se miden para conocer el estado del proceso o sus productos, se clasifican en **variables manipuladas o controladas**. En el segundo caso, se incluye también parámetros del proceso, que son determinados por cálculo a partir de otras variables.

Variables más comunes e influyentes

Manipuladas	Controladas
<ul style="list-style-type: none">• Apertura de válvulas• Flujos de reactivos• Flujo de aire• Velocidad de agitación• Flujo de agua en el cajón de alimentación	<ul style="list-style-type: none">• Leyes de concentrados• Leyes de relaves• Recuperaciones• Cargas circulantes• Niveles de pulpa y espuma• % de sólidos de alimentación• pH

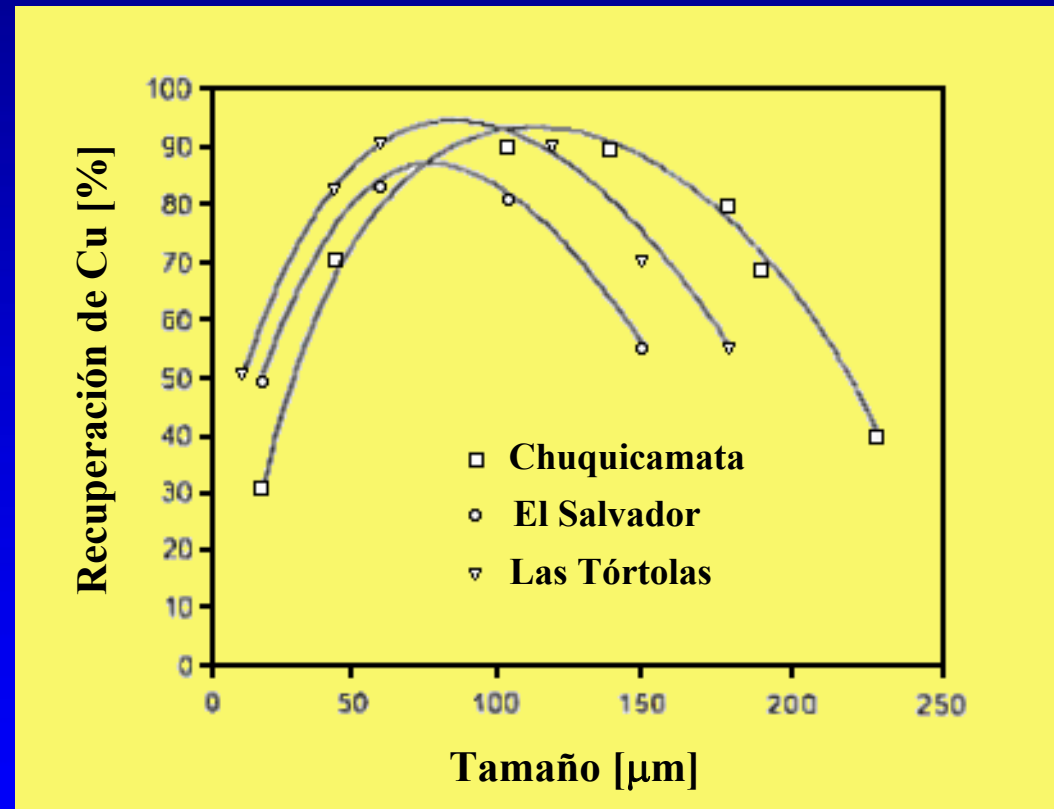


Flotación

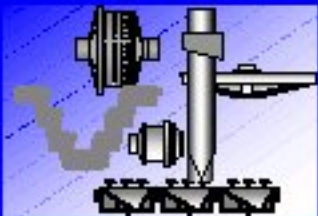
◆ Granulometría en la flotación

Aunque puede ser considerada una variable desde la perspectiva global de la planta, como su modificación radica en las etapas de molienda, para efectos de la flotación pasa a ser una perturbación (importante) del proceso.

Bulatovic te al.

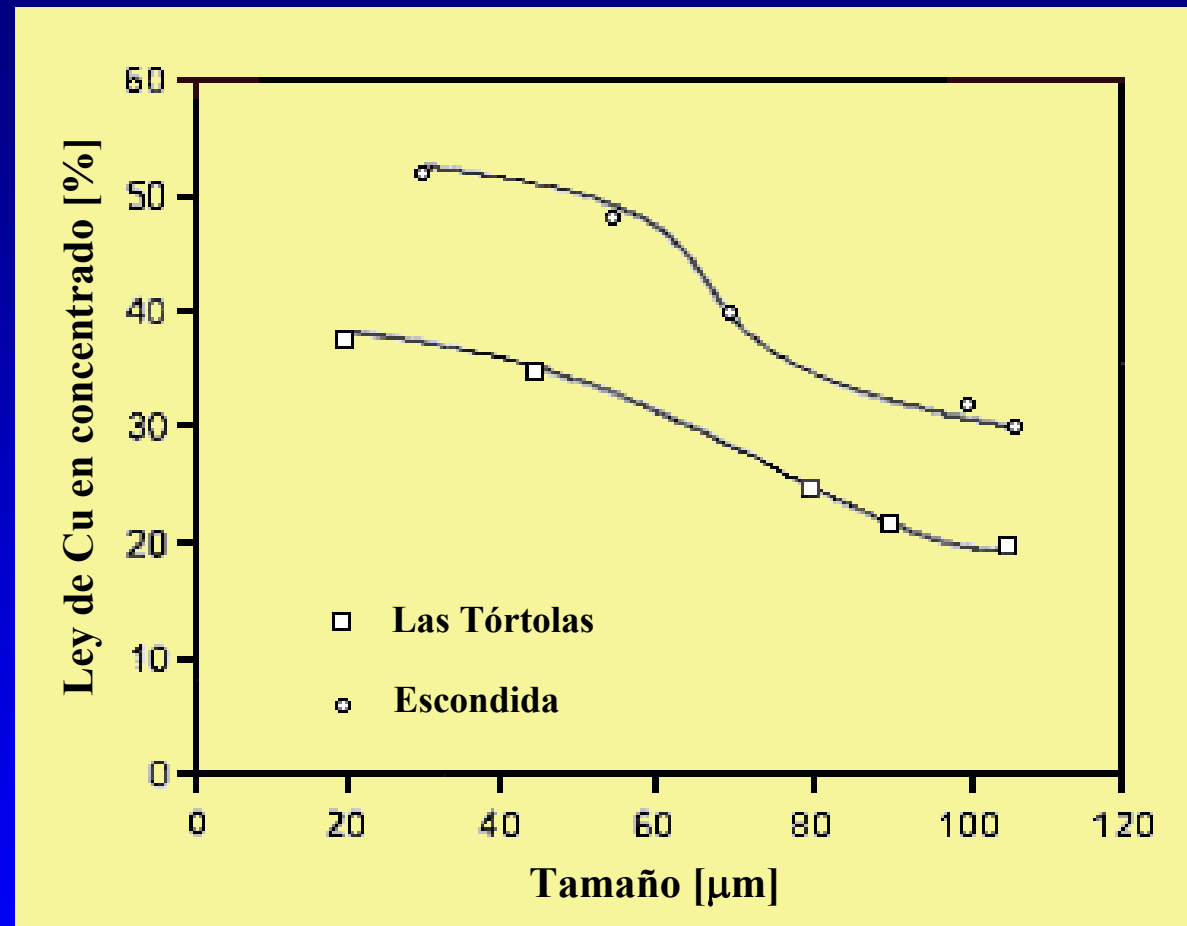


Recuperación de Cu por tamaños

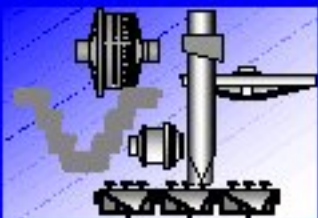


Flotación

Bulatovic et al.



Efecto de la remolienda de concentrados primarios en la ley de Cu del concentrado final.



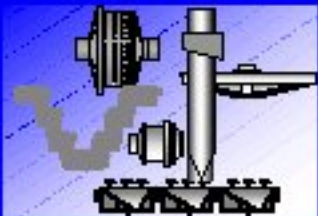
Flotación

Variables relativas a la dispersión de aire en flotación

Dispersión vs. distribución de aire:

- Dispersión de aire → Generación de burbujas a partir de una corriente de aire.
- Distribución de aire → Distribución **espacial** de burbujas en la celda de flotación.

Nota: el término “Distribución” se usa también para referirse a los tamaños de burbujas (como en distribución granulométrica)



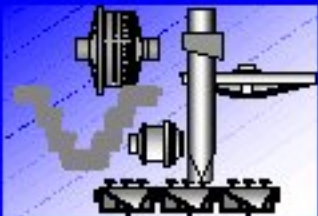
Flotación

Variables relativas a la dispersión de aire en flotación

La dispersión de aire en la celda de flotación afecta el desempeño de la operación.

Tanto la **ley** como la **recuperación** pueden verse afectadas si hay una dispersión pobre de aire.

Por ejemplo: no es lo mismo inyectar una burbuja de 10 cm³ (22 cm²) que 10 burbujas de 1 cm³ (48 cm²).

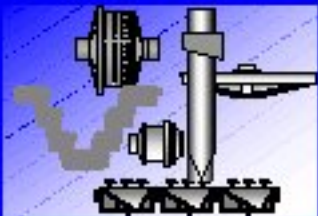


Flotación

Velocidad superficial de gas

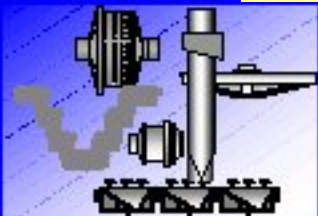
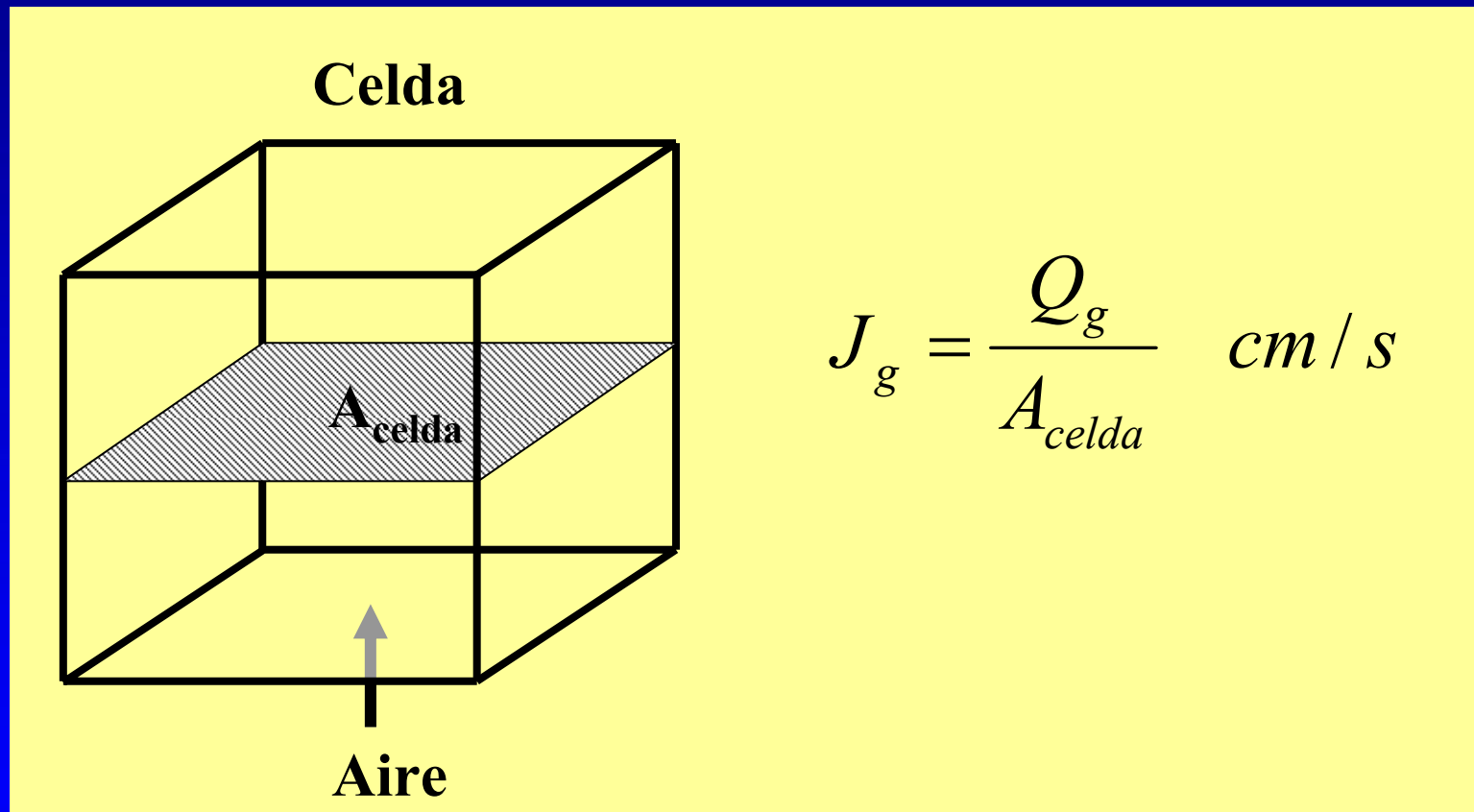
El flujo de aire (Q_g) inyectado a las celdas de flotación es la variable “obvia”, no obstante, no siempre se mide o controla.

Para poder comparar los flujos de aire entre celdas de distinto tamaño, es necesario **normalizar** dichos flujos por el área (sección transversal) de la celda, definiéndose así la velocidad superficial de gas (J_g).



Flotación

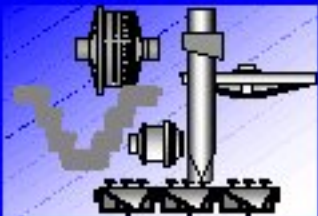
Velocidad superficial de gas



Distribución de tamaños de burbuja

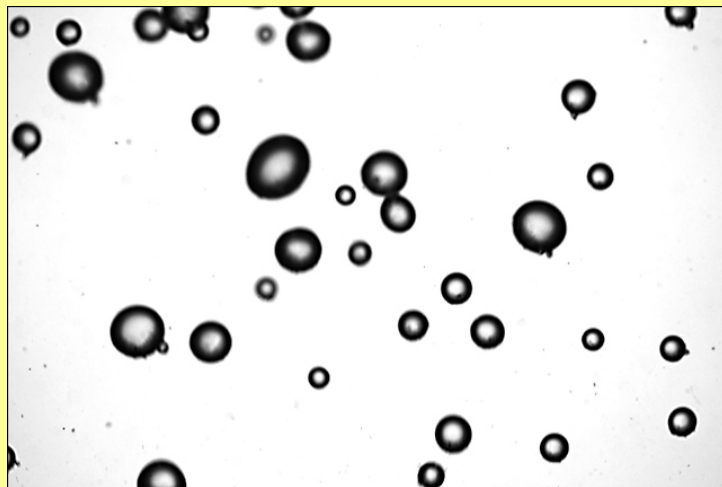
Al inyectar aire en una celda se generan burbujas de distintos tamaños.

Esos tamaños se pueden agrupar en distintas clases y así definir la “distribución de tamaños de burbuja”

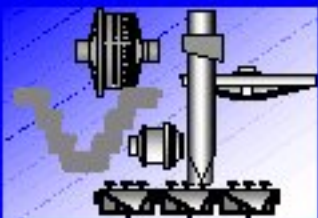
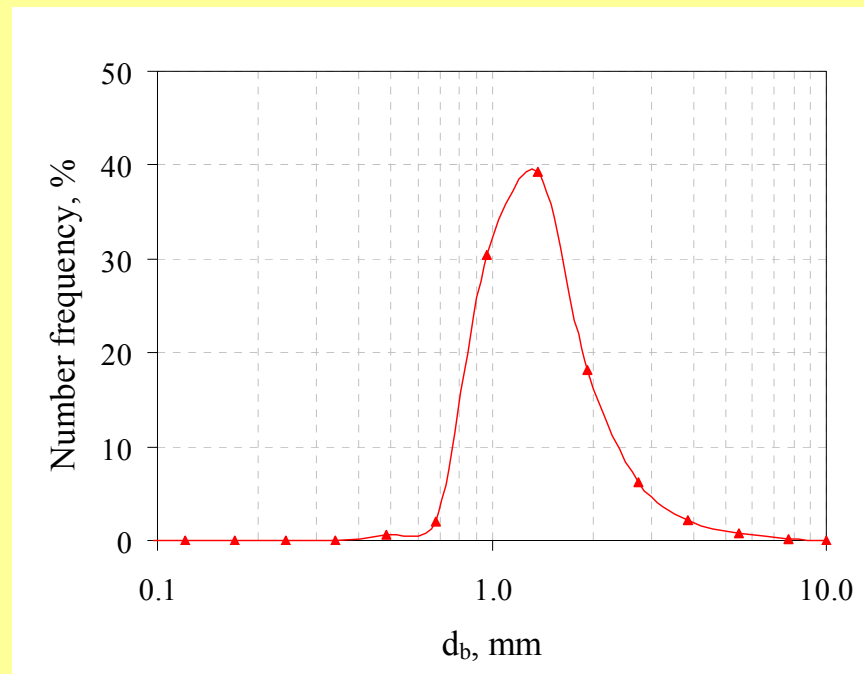


Flotación

Distribución de tamaños de burbuja

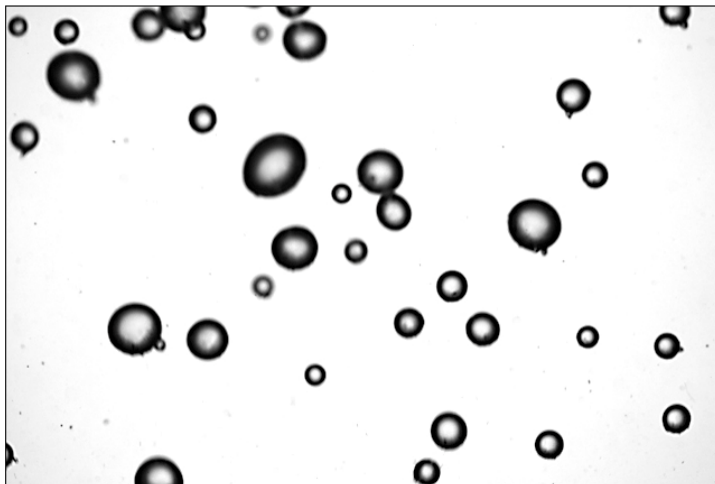


5 mm

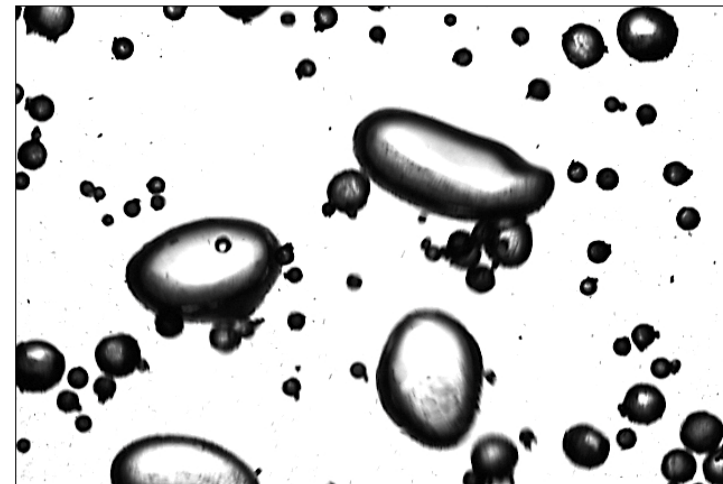


Flotación

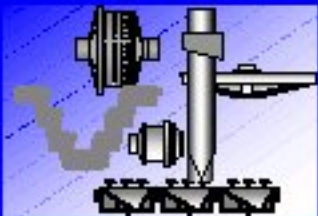
Distintos tipos de distribución de tamaños de burbuja



(a) Celda Mecánica

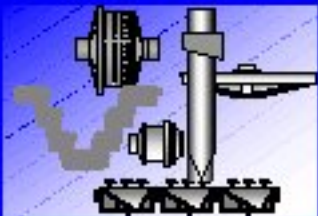
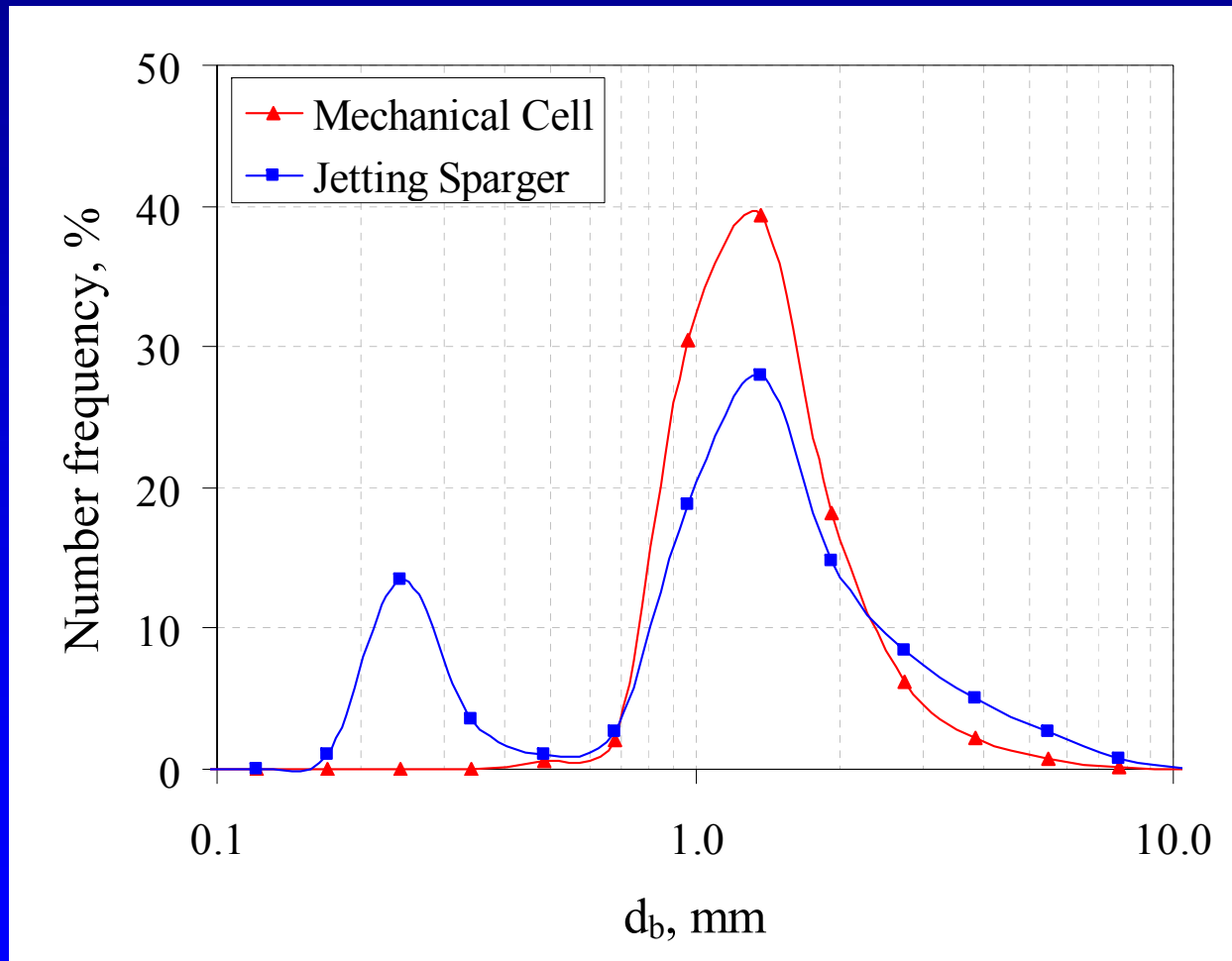


(b) Columna con Jetting Sparger 5 mm



Flotación

Distintos tipos de distribución de tamaños de burbuja



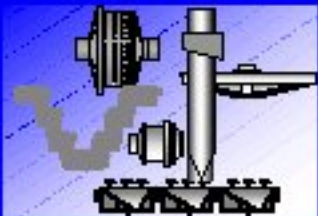
Flotación

Tamaños característicos

Las distribuciones de tamaños de burbujas se pueden representar por **diámetros característicos**, los más usuales son:

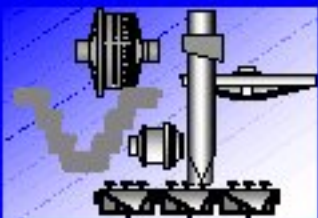
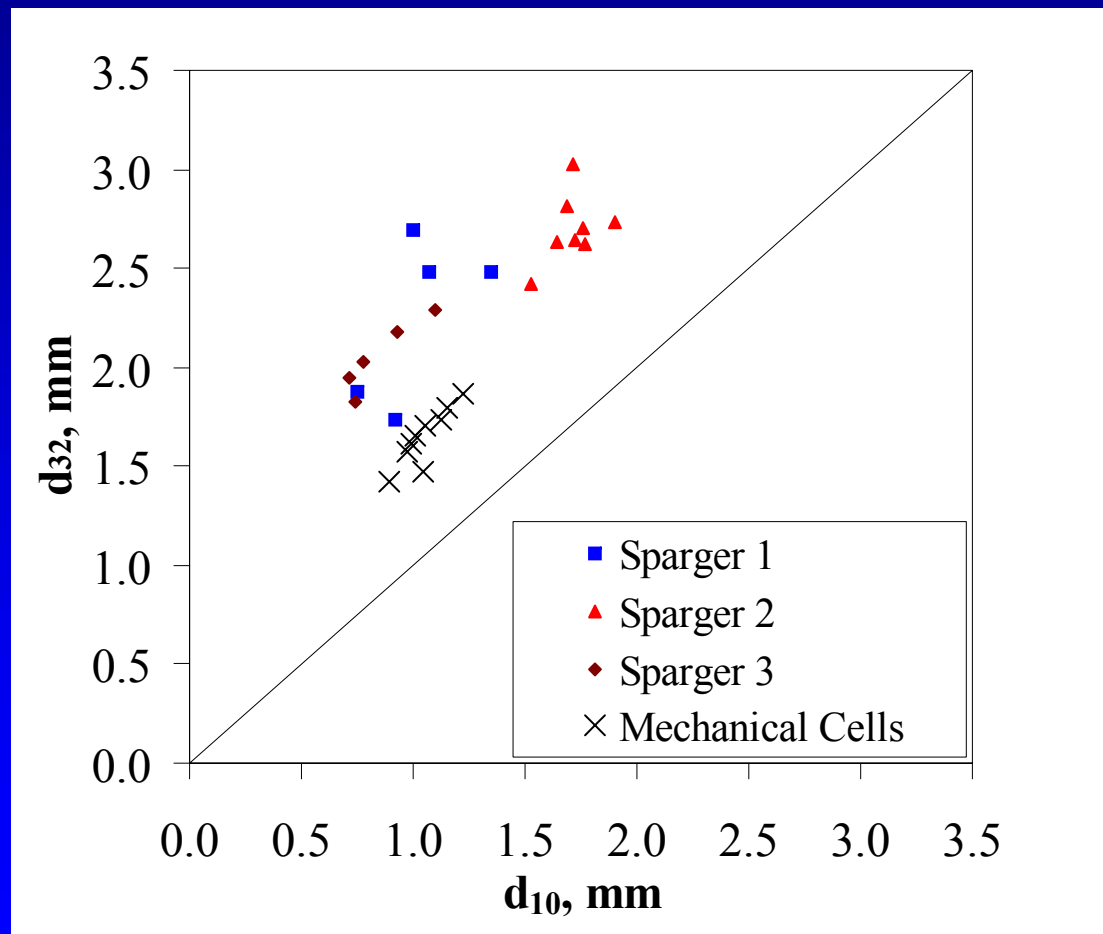
$$d_{10} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$$

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2}$$



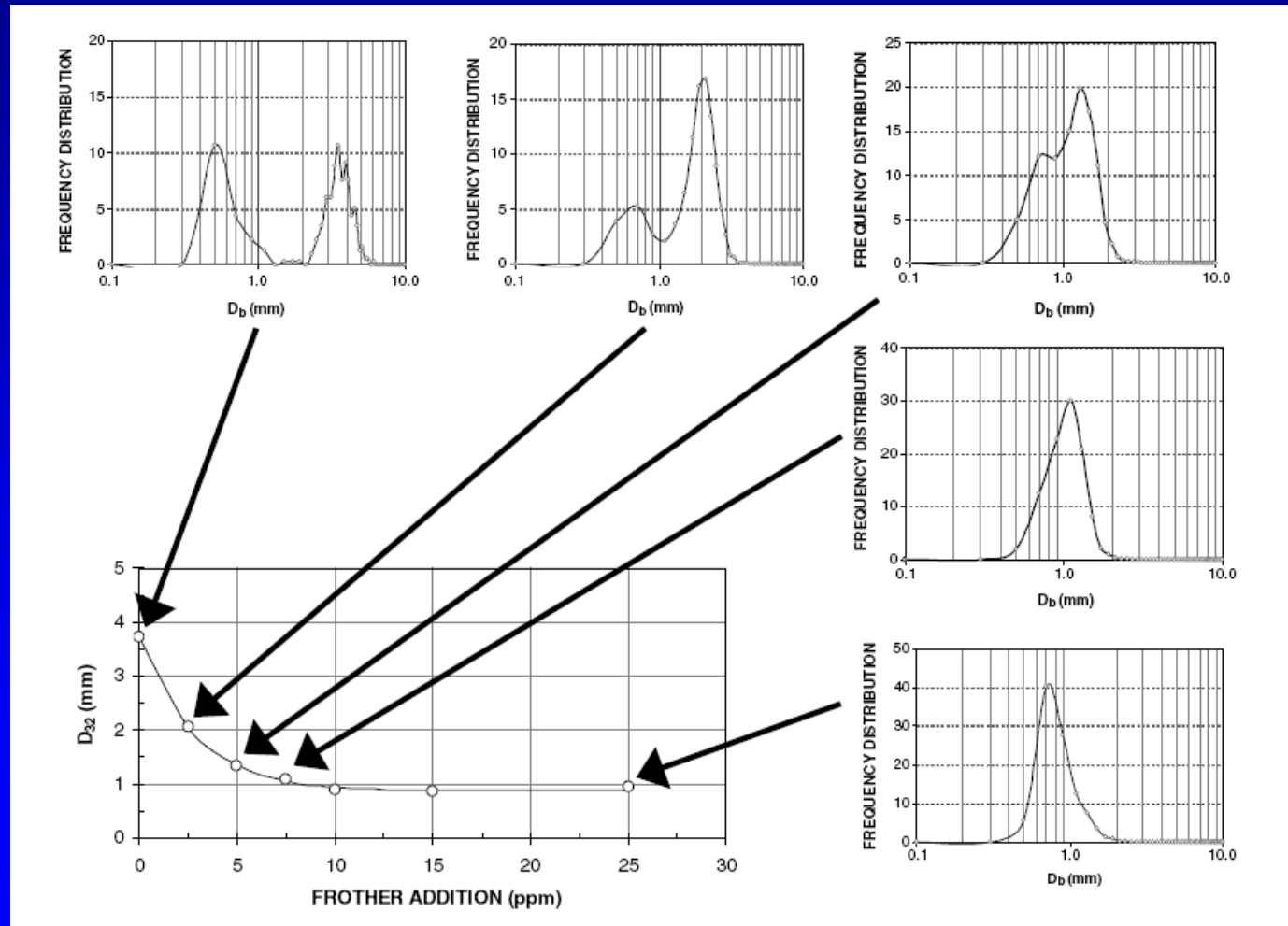
Flotación

Comparación de distribuciones a partir de diámetros característicos

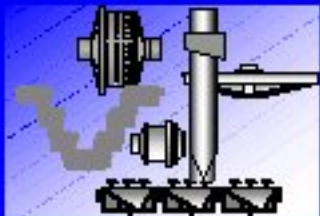


Flotación

Efecto de la concentración de espumante en la distribución de tamaños de burbuja y diámetro característico d_{32}

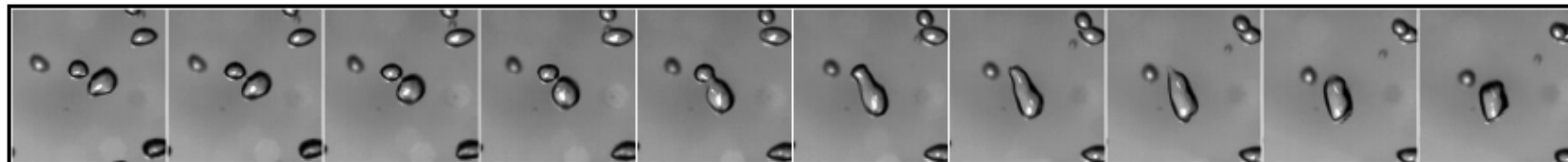


Dowfroth 250; $J_g = 0,5$ cm/s



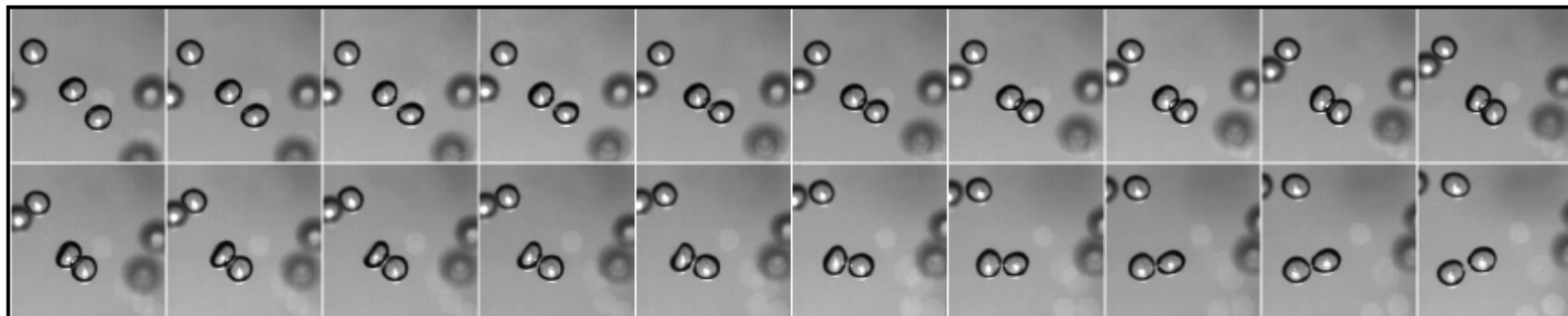
Flotación

Efecto del espumante en la prevención de coalescencia.



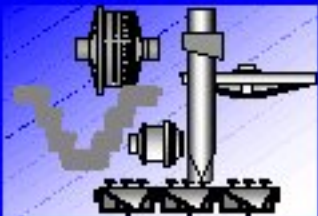
Coalescencia de burbujas en agua sin espumante. Imágenes cada 1 ms.

5 mm



Burbujas rebotando, sin coalescencia, en agua con espumante (DF 250). Imágenes cada 2 ms.

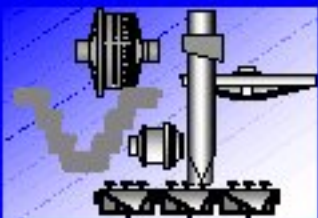
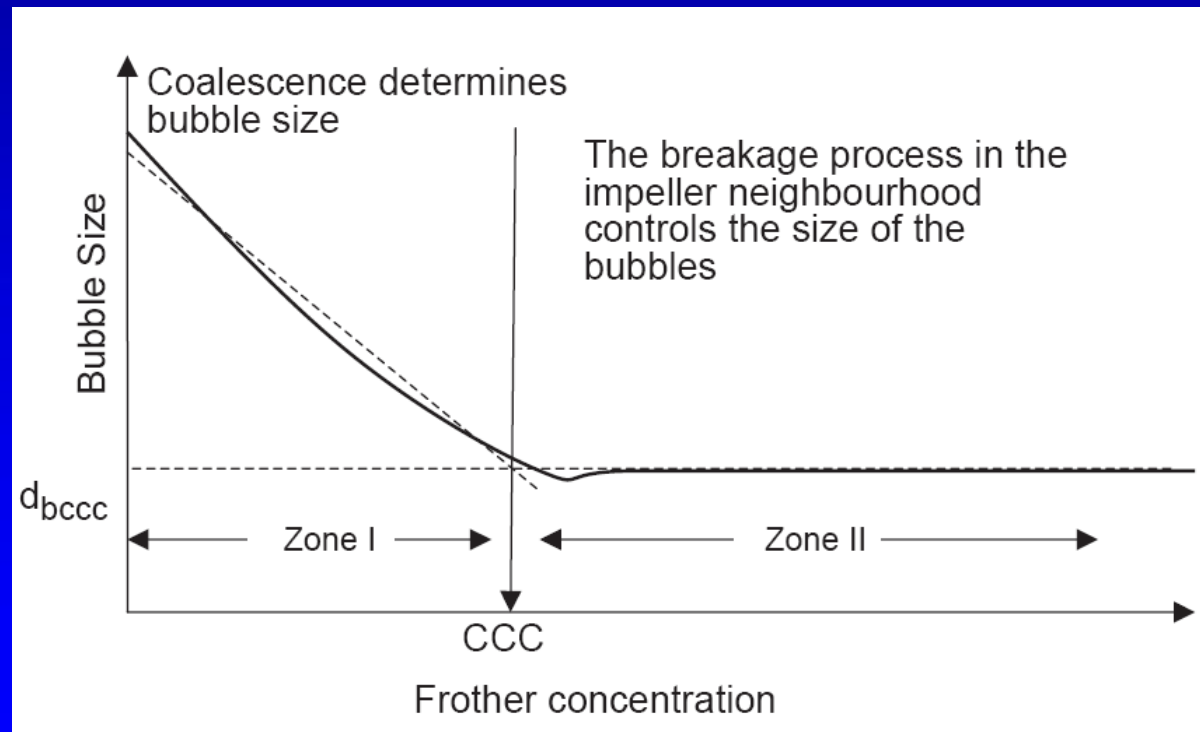
5 mm



Flotación

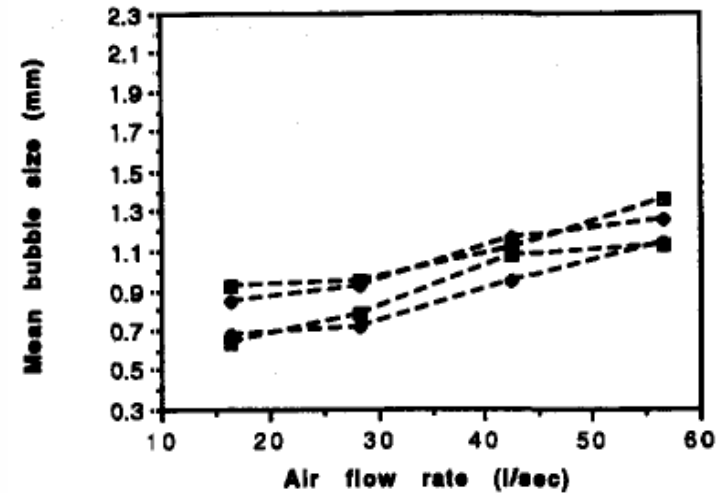
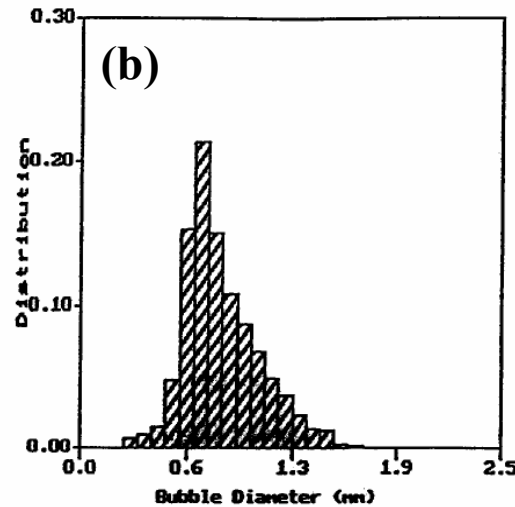
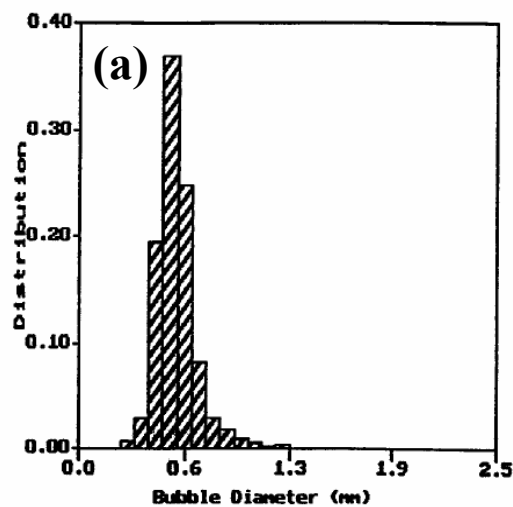
Concentración Crítica de Coalescencia (CCC)

Concentración de espumante a la cual la reducción de tamaño de burbuja se hace asintótica a un valor mínimo producto de la reducción de coalescencia en el sistema. Por sobre esta concentración las burbujas pueden reducir un poco más su tamaño debido a ruptura.



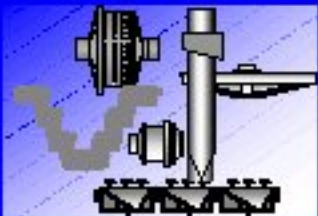
Flotación

Los **factores físicos** que afectan la dispersión del gas en la celda de flotación son, principalmente, la **velocidad del impulsor**, el tipo de impulsor y el **flujo de gas**.



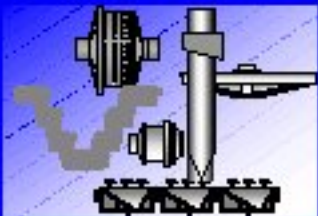
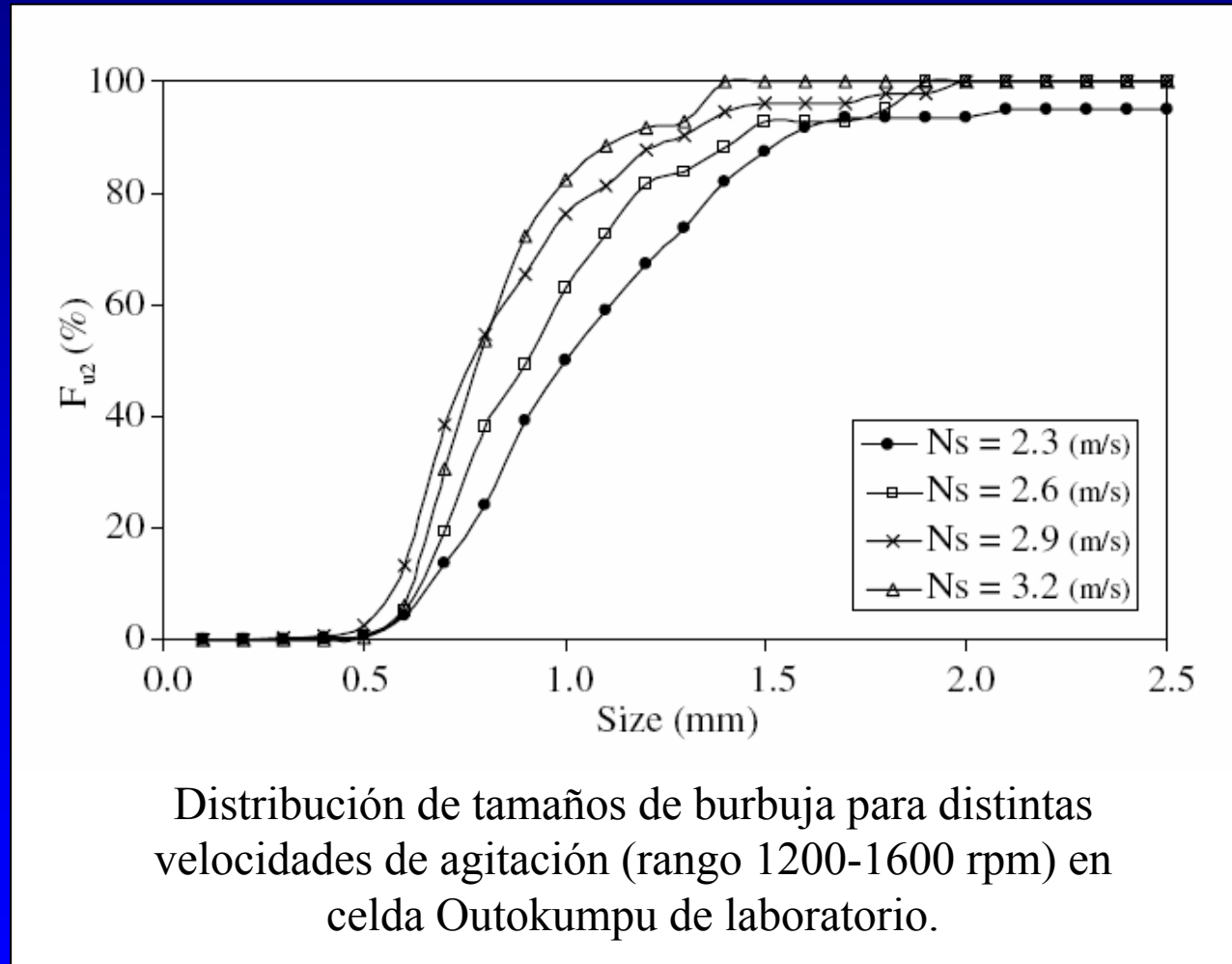
Distribución de tamaños de burbuja para (a) flujo bajo de aire (17 l/s) y (b) flujo alto de aire (57 l/s).
Impulsor Outokumpu, 225 rpm.

Variación del tamaño medio de burbuja (d_{10}) con el flujo de aire



Flotación

Efecto de la velocidad de agitación en la distribución de tamaño de burbujas.

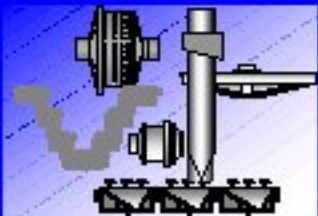


Flotación

Contenido de aire

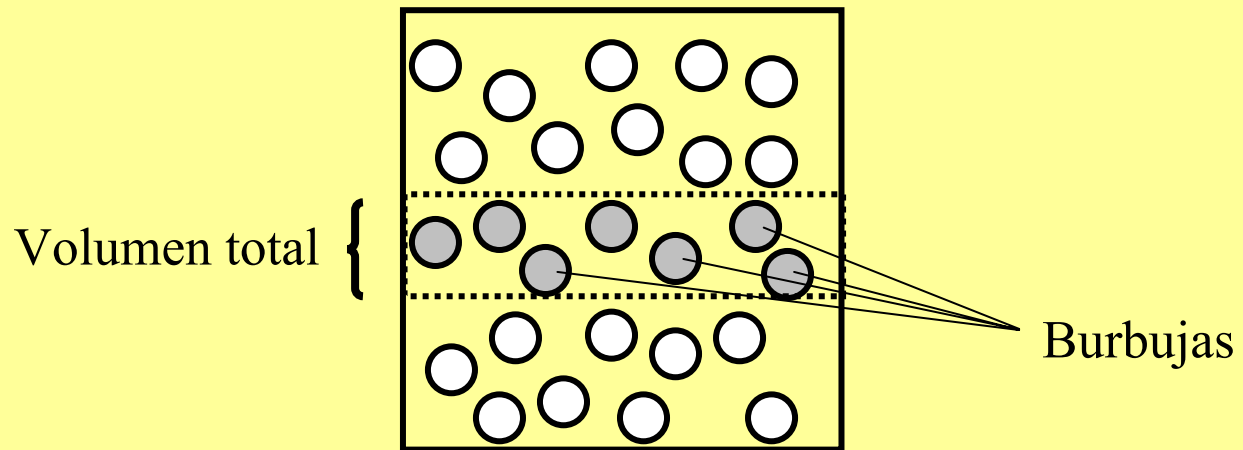
El contenido de aire (ϵ_g) (también conocido como holdup de gas) es la **fracción volumétrica** de la celda que está ocupada por aire y se expresa en %.

El contenido de aire se afecta por el tamaño y velocidad de las burbujas en la celda de flotación: mientras más pequeñas son las burbujas, más lento suben. Esto aumenta su tiempo de residencia en la pulpa y por lo tanto el gas holdup sube.

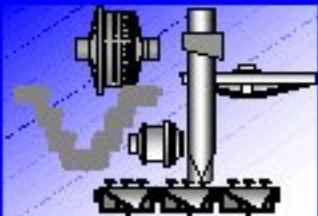


Flotación

Contenido de aire

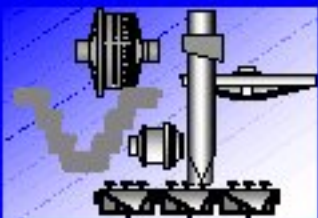
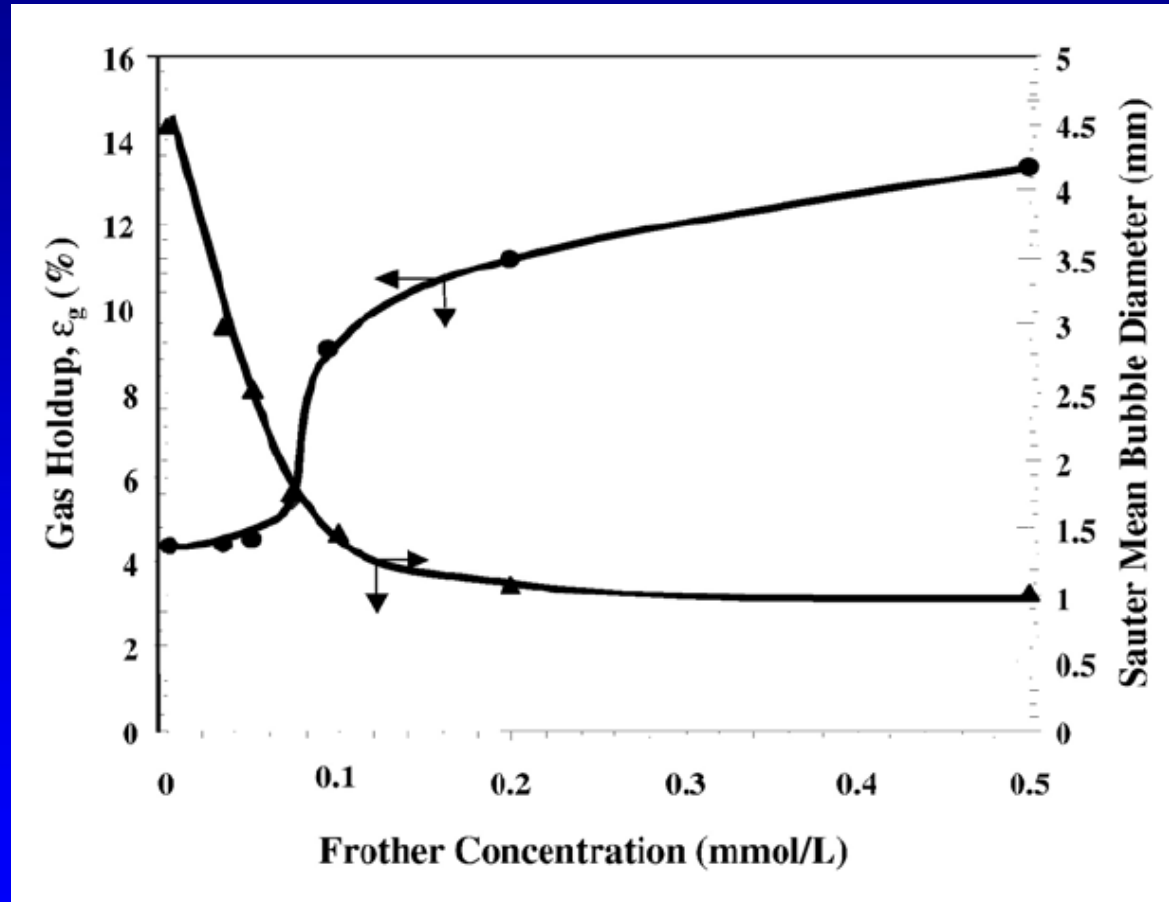


$$\varepsilon_g = \frac{\text{Volumen de aire}}{\text{Volumen total}} \cdot 100 \quad \%$$



Flotación

Efecto de la concentración de espumante en el contenido de gas y relación con el tamaño de burbuja.



Espumante: MIBC. Prueba realizada en columna de laboratorio con un inyector de aire poroso.

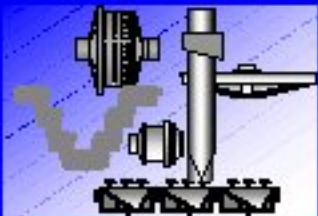
Flotación

Flujo areal superficial de gas

El flujo areal superficial de gas (S_b) se define como la superficie total de burbujas que atraviesan el área transversal de la celda en un instante de tiempo. Sus unidades son 1/s.

El flujo areal superficial de gas se puede calcular a partir de la velocidad superficial y el tamaño d_{32} .

$$S_b = \frac{6 J_g}{d_{32}}$$



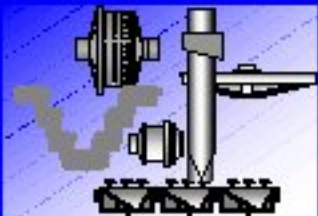
Flotación

Importancia del flujo areal superficial de gas

El flujo areal superficial de gas (S_b) ha sido asociado, por varios autores, a la cinética de flotación del siguiente modo:

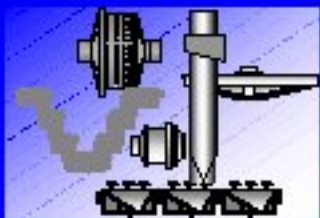
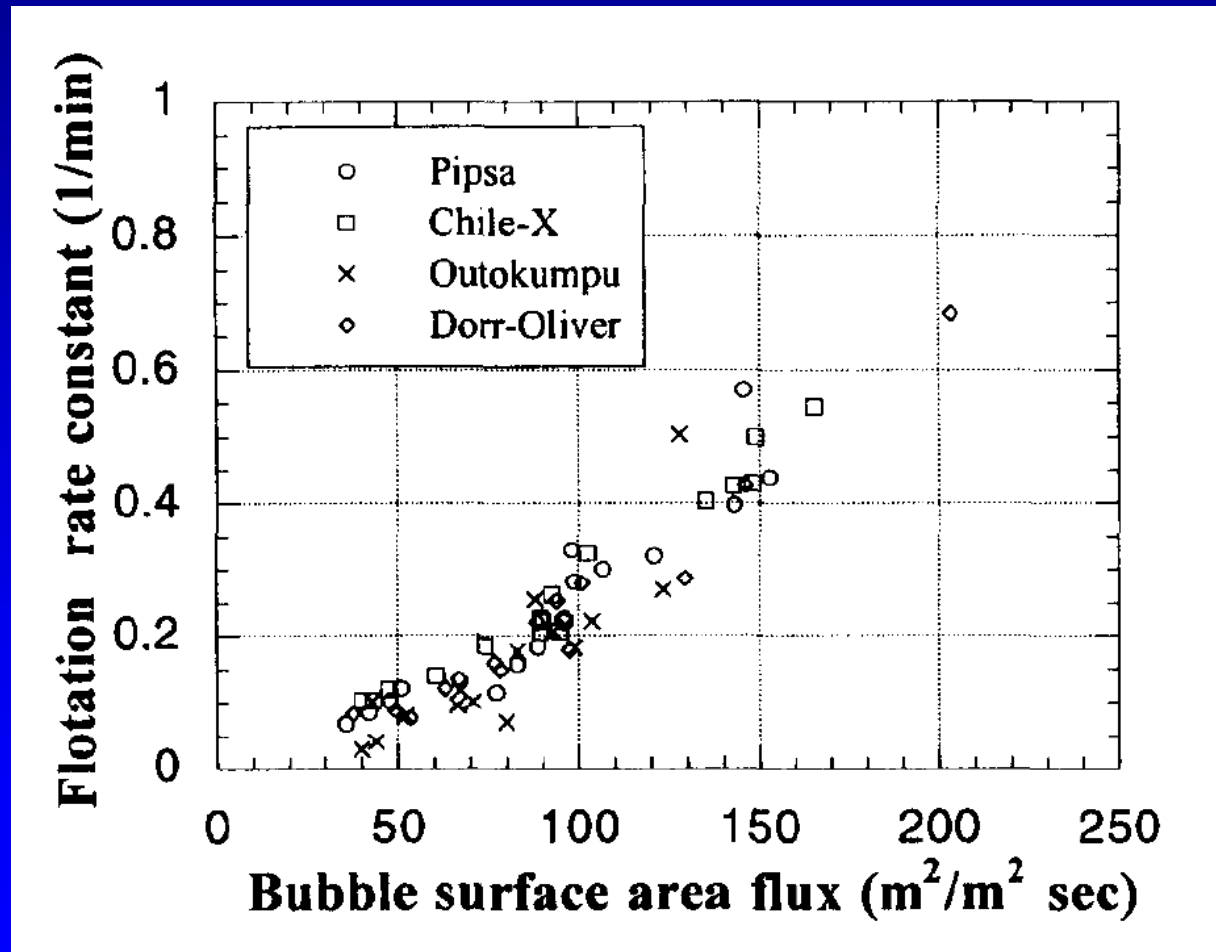
$$k = P S_b$$

donde P es la **flotabilidad** de la especie de interés.



Flotación

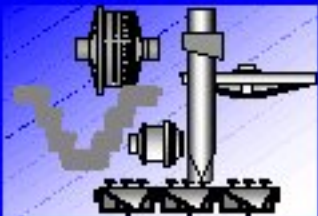
Relación entre el flujo areal superficial de gas (S_b) y la constante cinética de flotación



Flotación

Rangos típicos para las variables relativas al gas

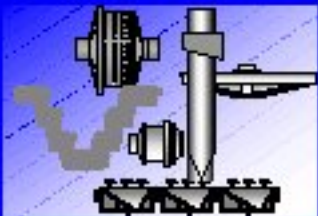
Variable	RANGO	
	Celdas mecánicas	Celdas columnares
S_b [s^{-1}]	50 – 120	20 – 60
J_g [cm/s]	0,9 – 2,5	0,8 – 1,9
d_{32} [mm]	0,7 – 1,8	1,4 – 3,0
ε_g [%]	7 - 22	10 - 30



Flotación

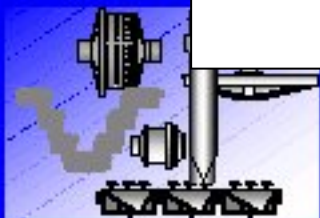
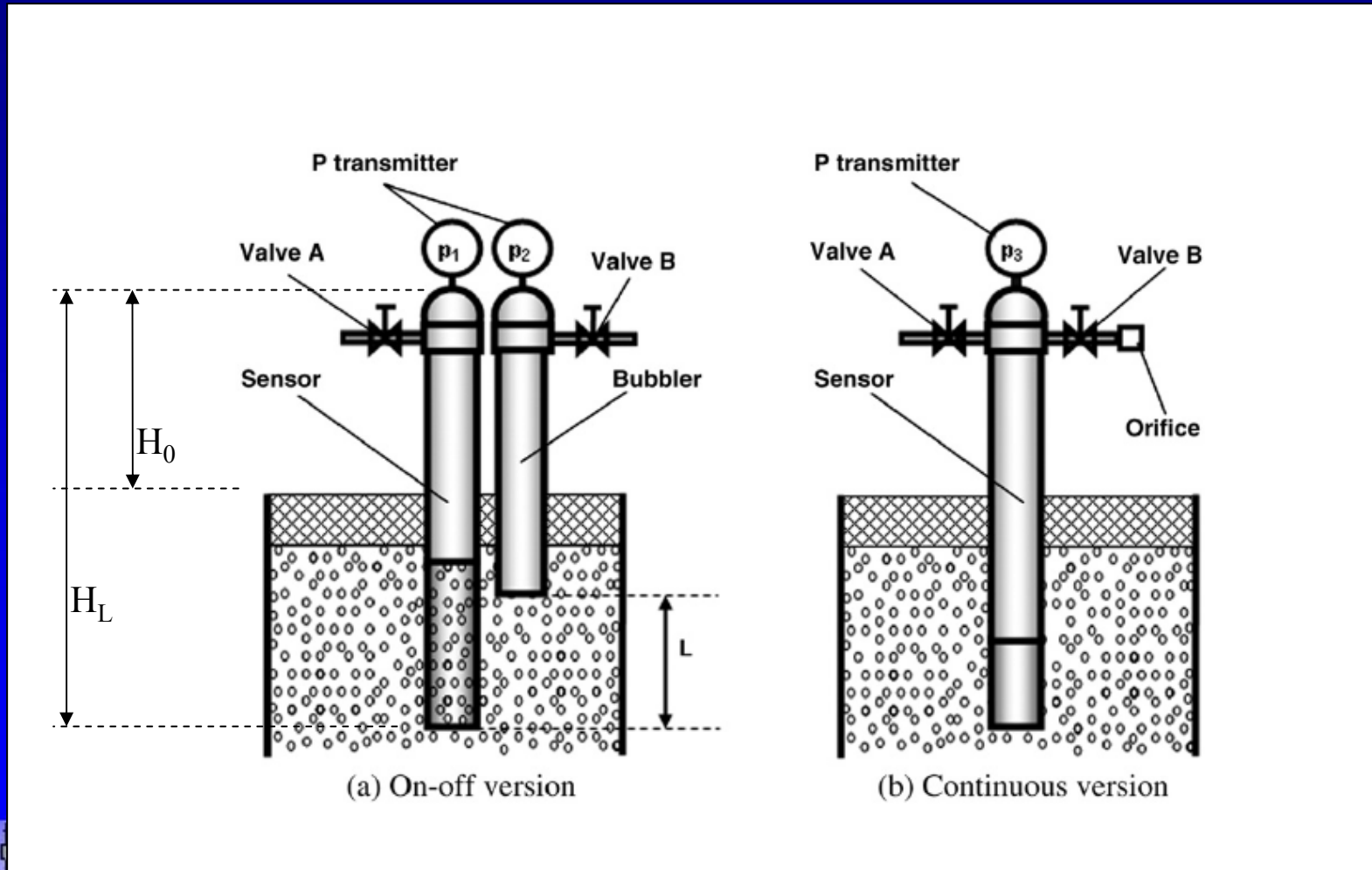
Medición de J_g

- Se puede **estimar** dividiendo el flujo de aire alimentado a la celda por la sección transversal de la misma.
 - La sección transversal **no siempre se conoce** ya que en celdas agitadas suele ser variable.
- Se puede medir (J_g) usando un método similar al de la ‘probeta invertida’.



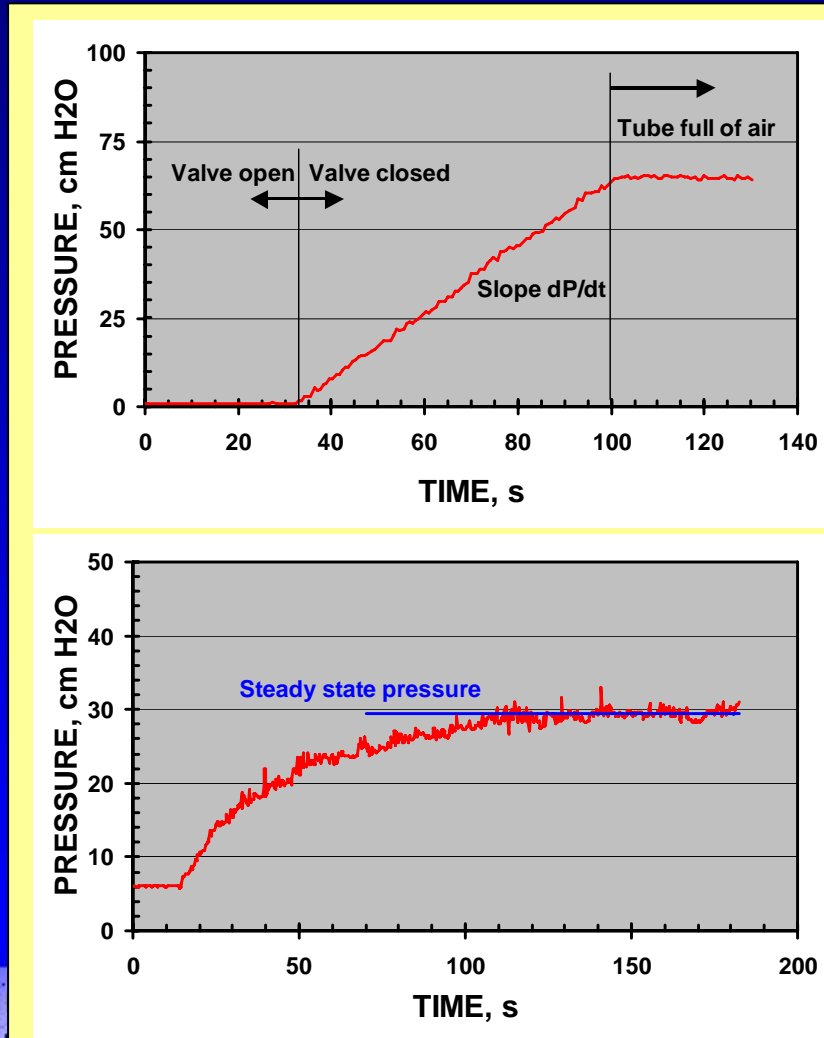
Flotación

Medición de J_g



Flotación

Curvas de J_g



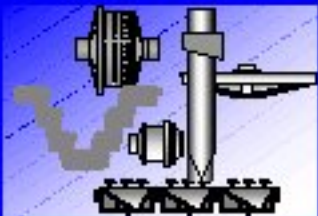
$$J_g = \frac{P_{atm} + \rho_b H_L}{\rho_p [P_{atm} + \rho_p (H_L - H_0)]} \frac{dP}{dt} \quad (cm/s)$$

$$J_g = \frac{\beta \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{gas}}}}{A_{tubo}} \quad (cm/s)$$

Flotación

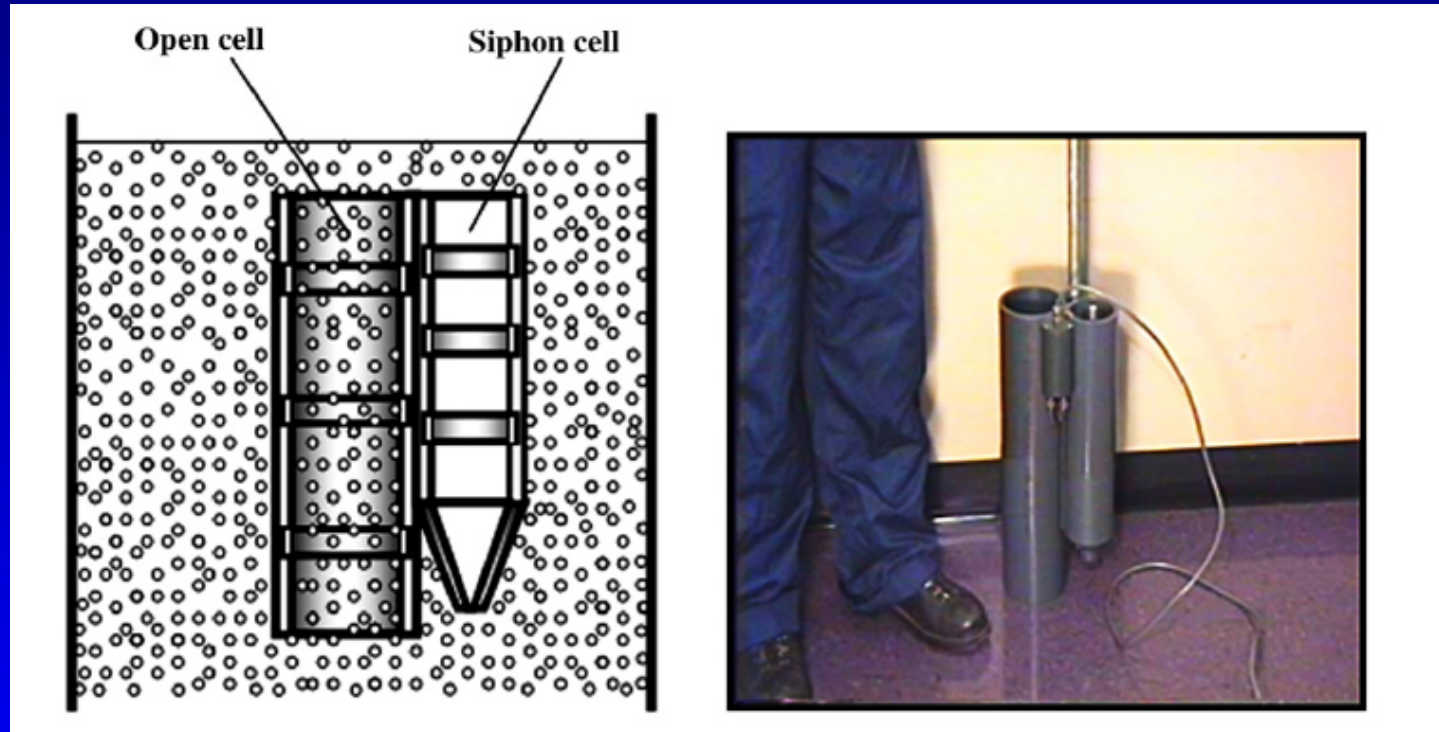
Medición de ε_g

- Se puede medir con **muestreadores** cilíndricos operados manualmente (diferencias de volumen causadas por el gas).
- Se puede estimar también a partir de mediciones de **presión**, si se sabe la densidad de pulpa (sin aire).
- Se puede medir usando diferencias en **conductividad** entre pulpa con y sin aire.

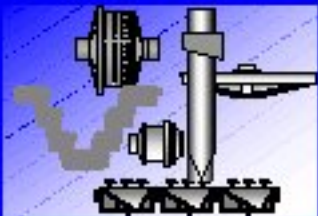


Flotación

Medición de ε_g por conductividad



En la **celda abierta** se mide la conductividad de la pulpa con aire (K_d), mientras que en la **celda sifón**, se mide la conductividad de la pulpa sin aire (K_c).

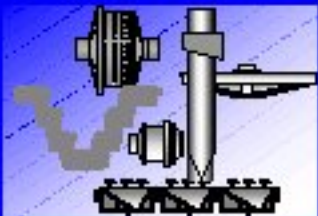


Flotación

Medición de ε_g por conductividad

Usando las ecuaciones de Maxwell se puede llegar a una expresión que relaciona las conductividades medidas con el contenido de gas.

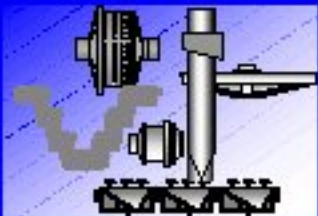
$$\varepsilon_g = 100 \frac{1 - \frac{K_d}{K_c}}{1 + 0,5 \frac{K_d}{K_c}} \quad (\%)$$



Flotación

Medición de distribución de tamaños de burbuja

- Tamaños característicos se pueden estimar a partir de ecuaciones empíricas. Ej: drift flux, Nasset et al., etc.
- Se pueden medir a partir de muestreo y análisis de burbujas.
 - UCT (University of Cape Town) bubble sizing system.
 - MBSA (McGill Bubble Size Analyzer)



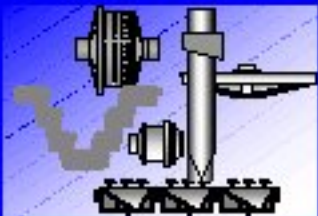
Flotación

Estimación de tamaño característico d_{32} mediante ecuaciones empíricas (Nesset et al., 2006)

$$d_{32} = d_0 + C J_g^n$$

d_0 : tamaño que se tiene cuando J_g tiende a cero (0,5-0,6 mm).

C, n : coeficientes que dependen del sistema (máquina y química).

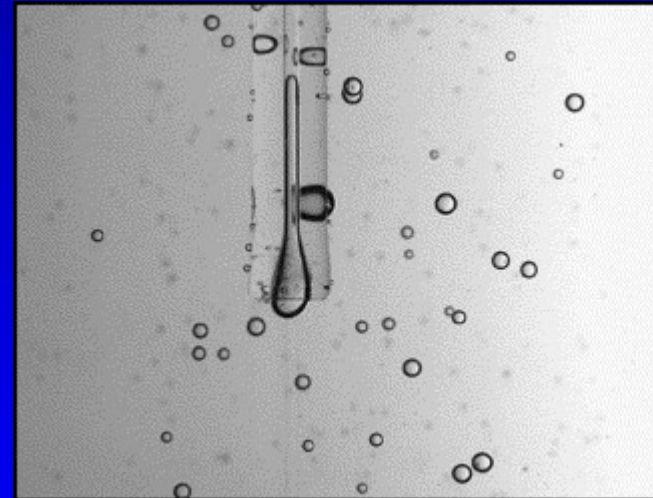


Requiere medir (alguna vez) la distribución de tamaños de burbuja y el ajuste de coeficientes

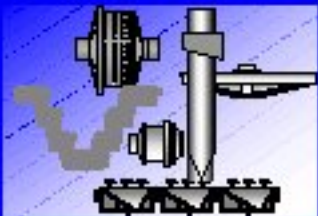
Flotación

Medición de la distribución de tamaños de burbuja: UCT (University of Cape Town)

Burbujas son succionadas con **capilar** de diámetro interno conocido. Dos sensores ópticos ubicados en el capilar miden el largo y velocidad del cilindro de aire generado a partir de cada burbuja.



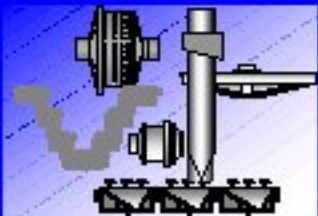
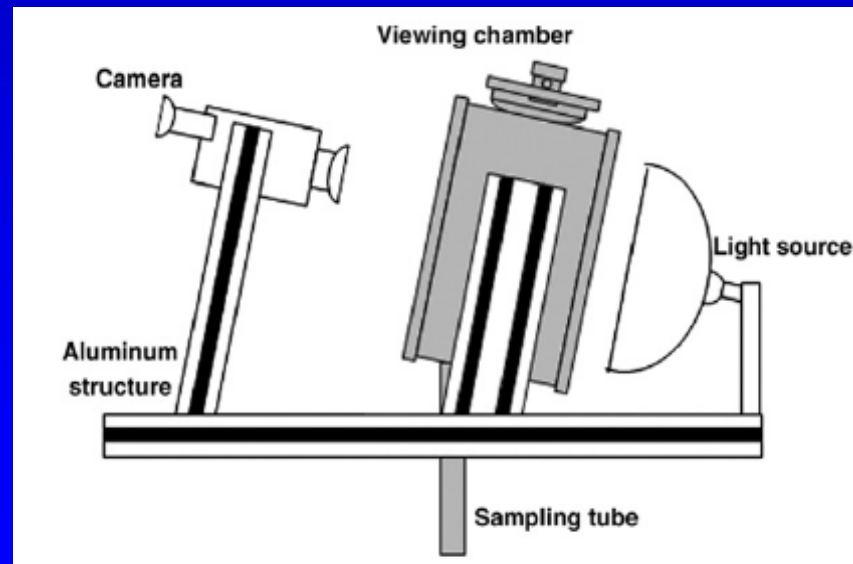
Grau, et al., 2004



Flotación

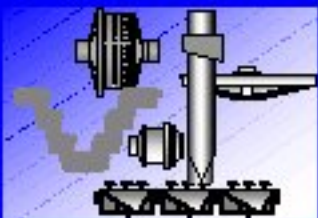
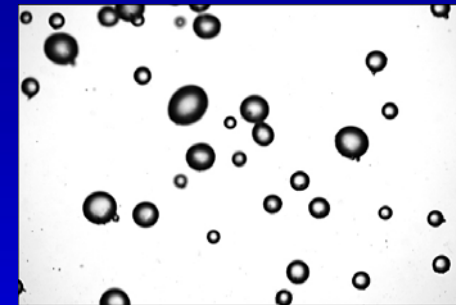
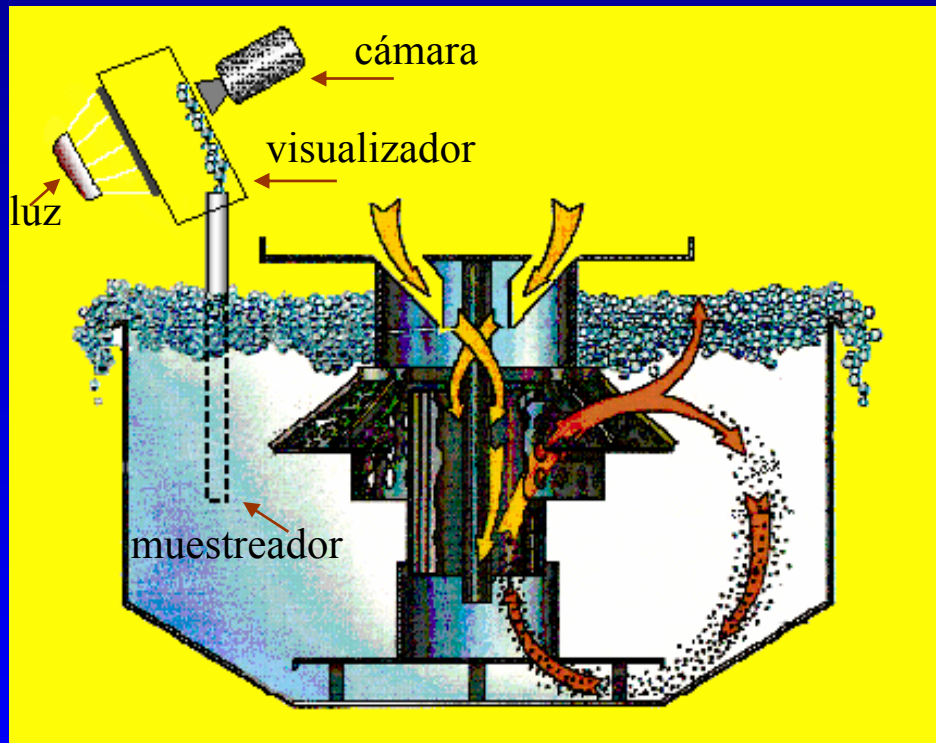
Medición de distribución de tamaños de burbuja (MBSA)

- Se basa en el muestreo (desde la celda) y **visualización** de burbujas. La distribución se determina a partir de análisis de imágenes. Los valores medidos corresponden a la cámara de visualización y deben ser corregidos – por presión – al punto de muestreo.



Flotación

Medición de la distribución de tamaños de burbuja por análisis de imagen: McGill University

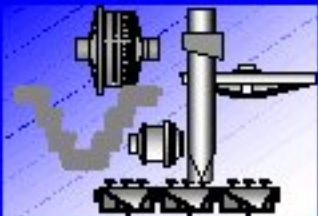


Flotación

Recuperación en la espuma

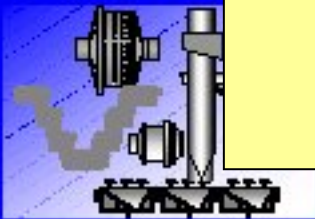
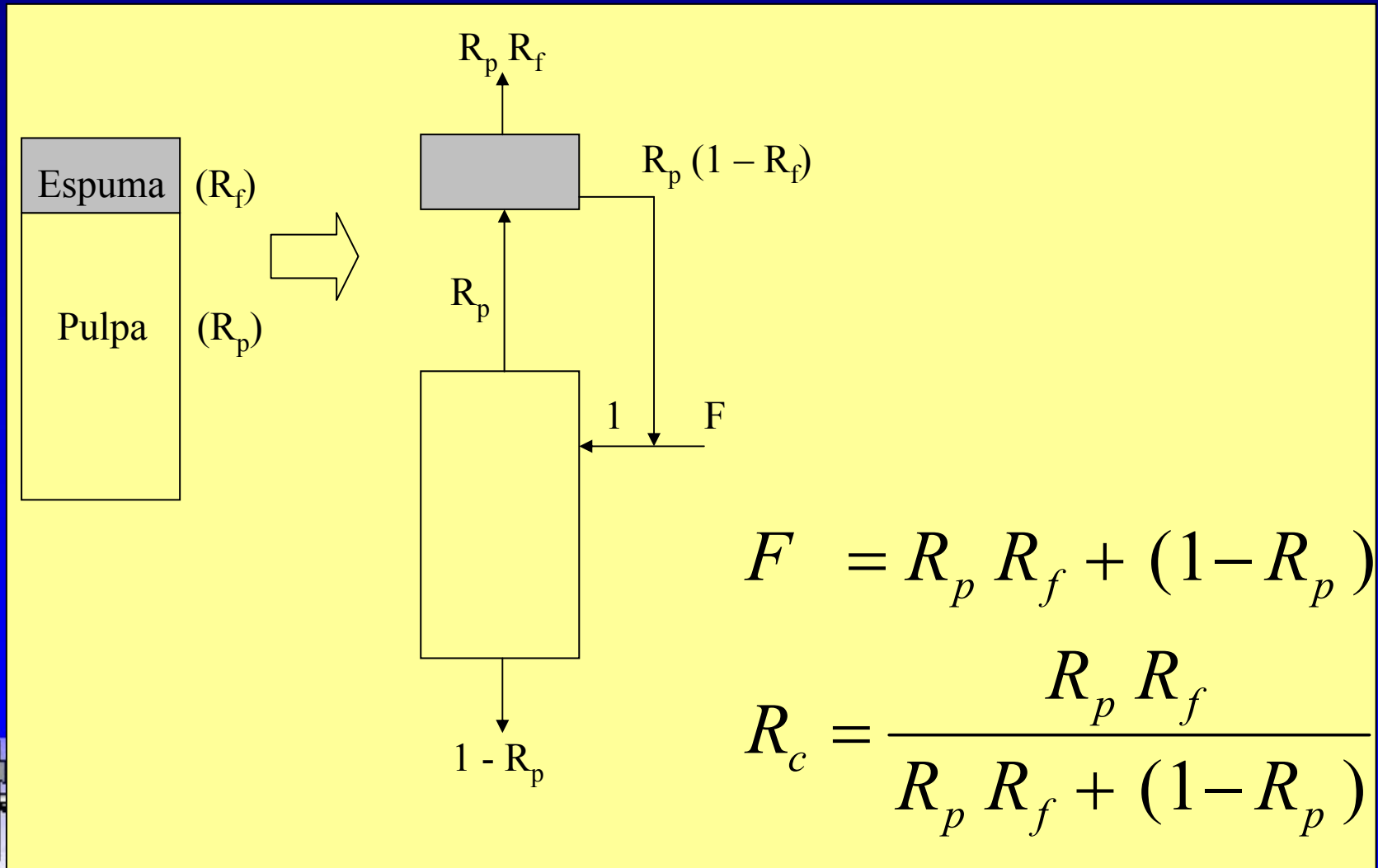
Una celda de flotación puede ser considerada como **dos sub-sistemas**: pulpa (o zona de colección) y espuma.

Ambos sub-sistemas tienen asociada una recuperación (R_p , R_f), sin embargo usualmente no se hace distinción y se reporta sólo una recuperación global (recuperación de celda, R_c).



Flotación

Recuperación global en la celda (R_c)



Flotación

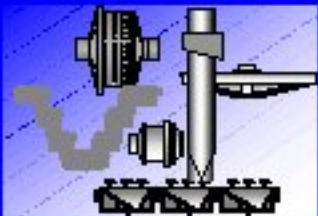
Recuperación global y cinética

Una celda se puede modelar como un tanque perfectamente agitado, luego la recuperación se podría escribir:

$$R_c = \frac{k_c \tau}{1 + k_c \tau}$$

Pero el modelo de tanque perfectamente agitado se aplica a la zona de colección (pulpa):

$$R_p = \frac{k_p \tau}{1 + k_p \tau}$$



Flotación

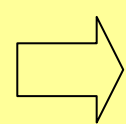
Cálculo de k_c :

Reemplazando esta última expresión para R_p en :

$$R_c = \frac{R_p R_f}{R_p R_f + (1 - R_p)}$$

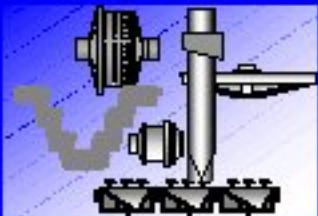
Se obtiene:

$$R_c = \frac{(k_p \tau)(1 + k_p \tau)^{-1} R_f}{(k_p \tau)(1 + k_p \tau)^{-1} R_f + 1 - (k_p \tau)(1 + k_p \tau)^{-1}} = \frac{k_c \tau}{1 + k_c \tau}$$



$$k_c = k_p R_f$$

$$k_c = P S_b R_f$$



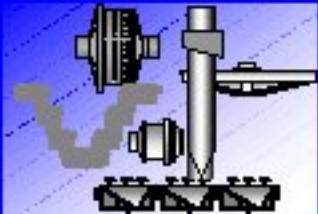
Flotación

Recuperación global

La recuperación global de la celda se puede escribir en función de k_p y R_f :

$$R_c = \frac{k_p R_f \tau}{1 + k_p R_f \tau}$$

¿Cómo es afectada la recuperación cuando cambia el nivel (profundidad de espuma)?

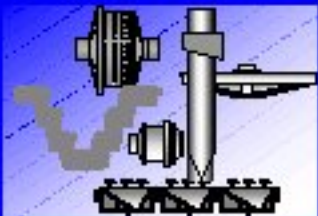


Flotación

Recuperación global vs. nivel (profundidad de espuma)

Incrementos en la profundidad de espuma producen una **disminución en la recuperación R_f** . Esto disminuye la recuperación global y produce un concentrado más rico (recordar curva ley-recuperación)

Cuando se aumenta la profundidad de espuma, se **disminuye el nivel de pulpa**, por lo tanto el **tiempo de residencia (τ) disminuye**, lo que contribuye a la disminución de R_c .

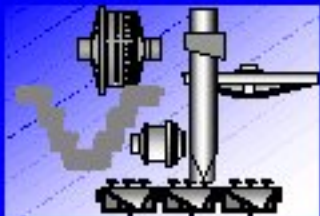
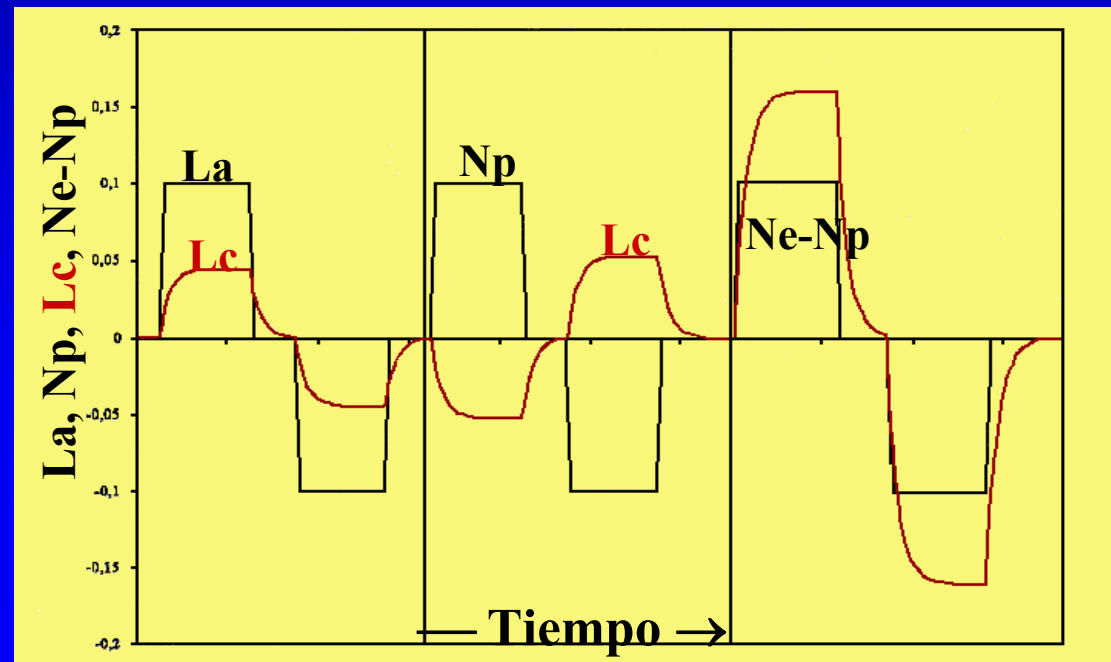


$$R_c = \frac{k_p R_f \tau}{1 + k_p R_f \tau}$$

Flotación

Uso del nivel como variable operacional

El nivel (profundidad de espuma) puede ser usado para compensar cambios en la ley de alimentación.



Flotación

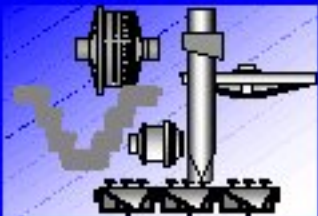
Flotación verdadera y flotación por arrastre

Flotación verdadera:

- Partículas hidrofóbicas se **adhieren** a las burbujas y suben a la fase espuma/concentrado.
- **Selectiva** (selectividad dada por la química del sistema).

Flotación por arrastre:

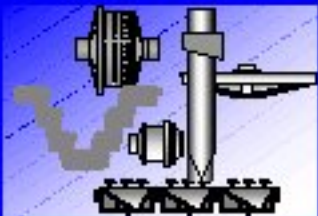
- Partículas no adheridas a burbujas son **arrastradas** a la fase espuma/concentrado.
- **No selectiva** (reduce la ley del concentrado)



Flotación

Arrastre hidráulico/mecánico

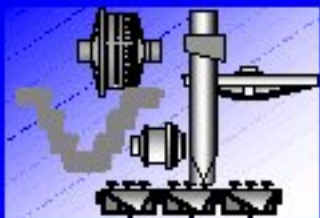
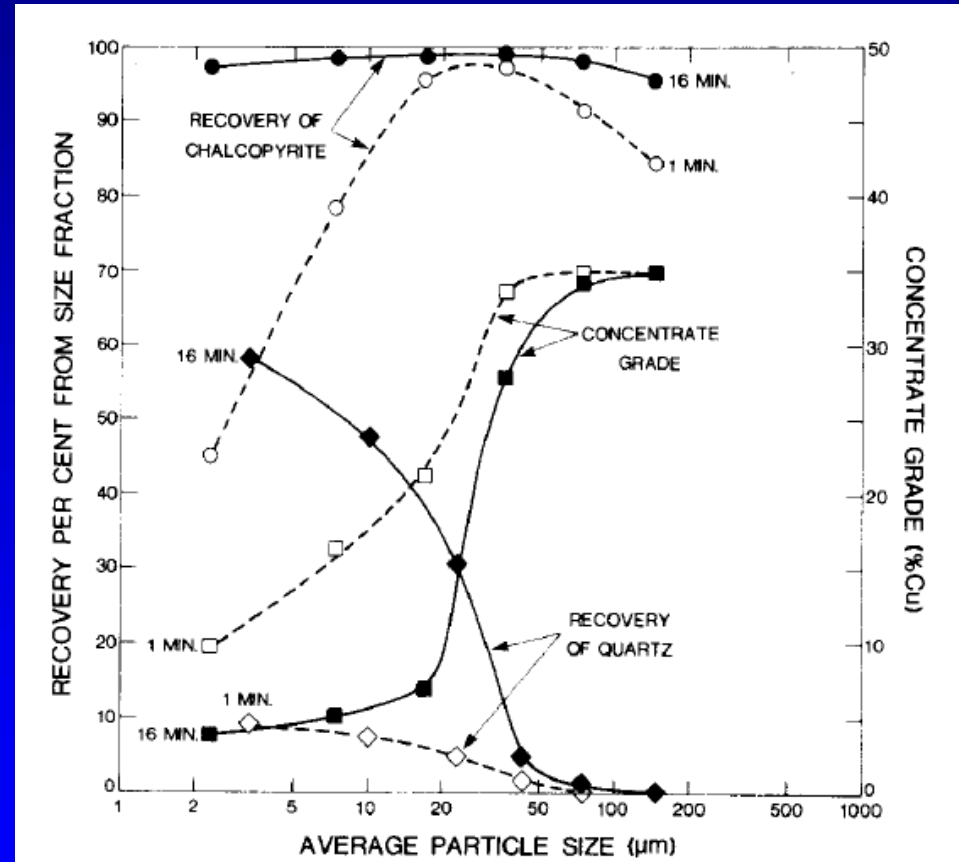
- Producido por turbulencia cerca de la interfase pulpa espuma (rougher).
- Agua asociada a las burbujas (film) es arrastrada hasta la espuma.
- Agua arrastrada con las burbujas cuando éstas se comienzan a juntar en la superficie de la pulpa antes de entrar a la fase espuma.



Flotación

Arrastre de ganga al concentrado

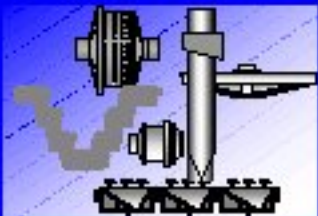
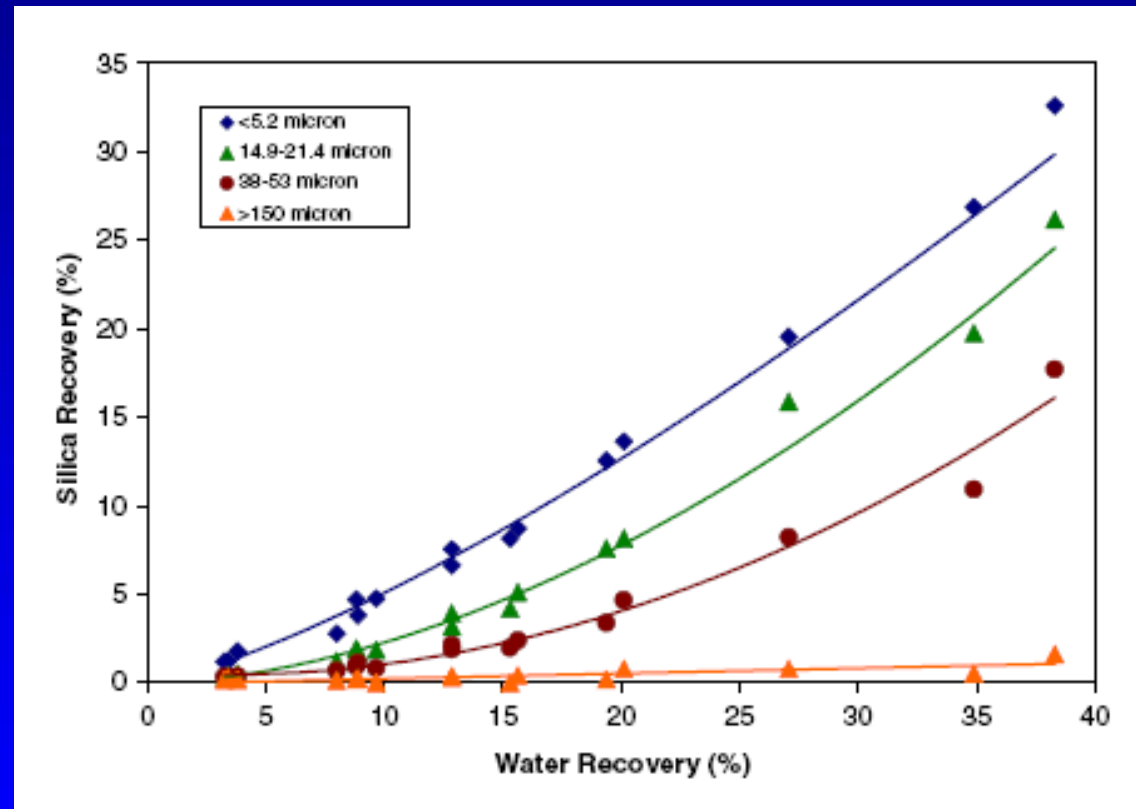
Arrastre de ganga produce disminución en la ley de calcopirita en el concentrado



Flotación

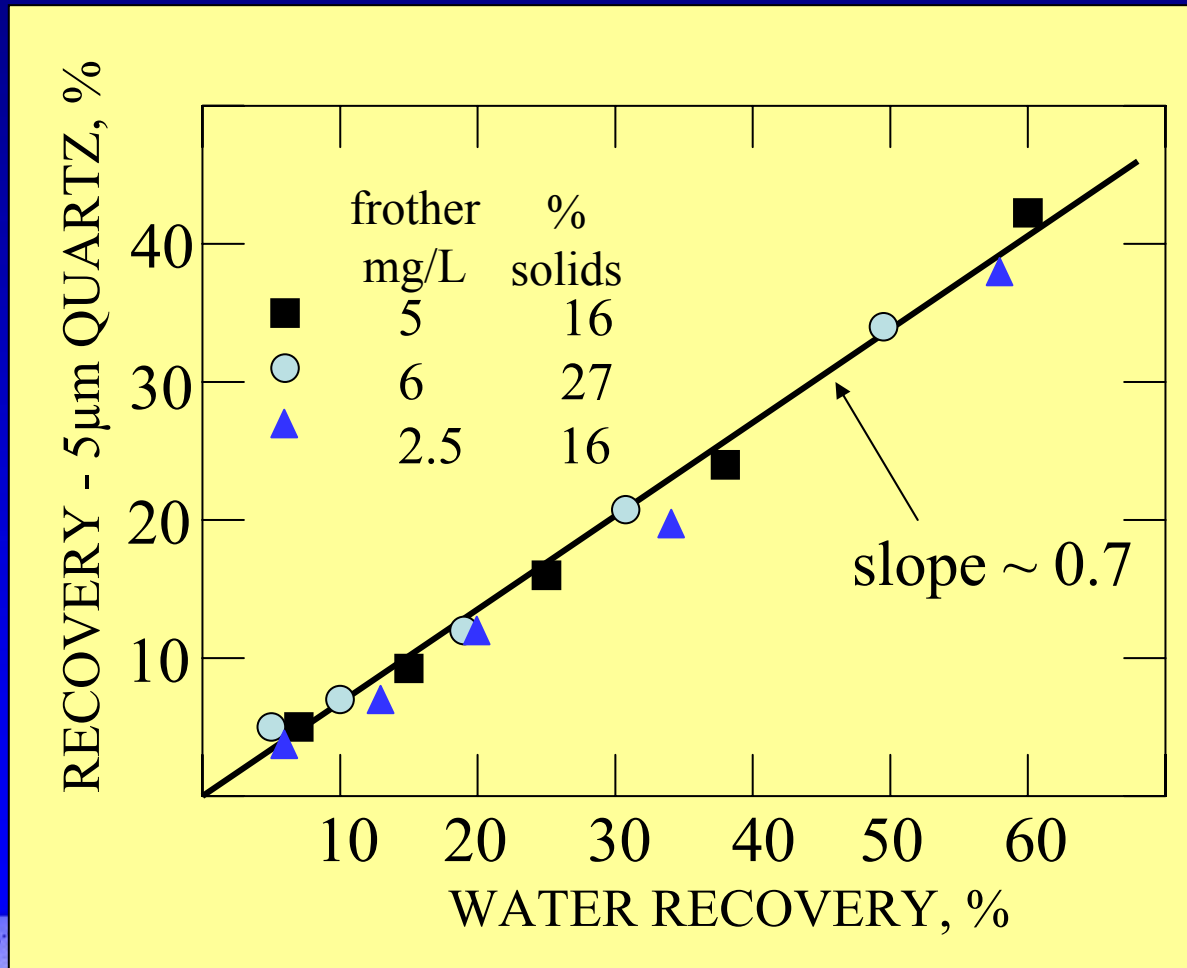
Arrastre y recuperación de agua

El arrastre de ganga (hidrofílica) está directamente relacionado a la recuperación de agua



Flotación

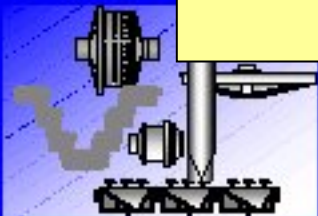
Arrastre y recuperación de agua



Modelo:

$$R_{i(A)} = ENT_i R_w$$

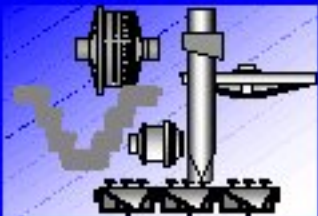
R_i es la recuperación por arrastre, ENT_i es la pendiente de la curva y R_w es la recuperación de agua



Flotación

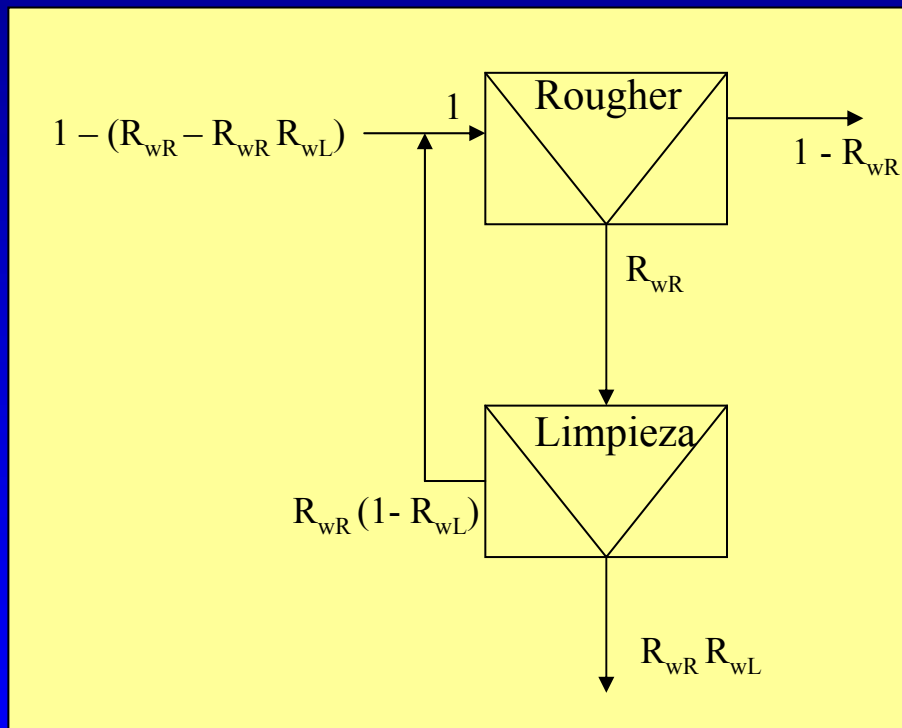
Control del arrastre

- Etapa de limpieza.
- Agua de lavado.
- Profundidad de espuma.
- Geometría de celda.
- Cp de pulpa.
- Tiempo de residencia.
- Flujo de aire.
- Otros.



Flotación

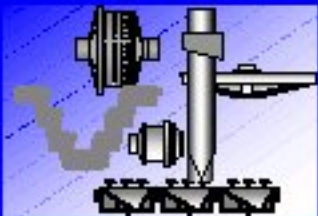
Control del arrastre: Etapa de limpieza



Recuperación total de agua:

$$R_w = \frac{R_{wR} R_{wL}}{1 - (R_{wR} - R_{wR} R_{wL})}$$

Si la recuperación de agua es igual a 10% en ambas etapas, entonces la recuperación total de agua en el circuito es 1,1%



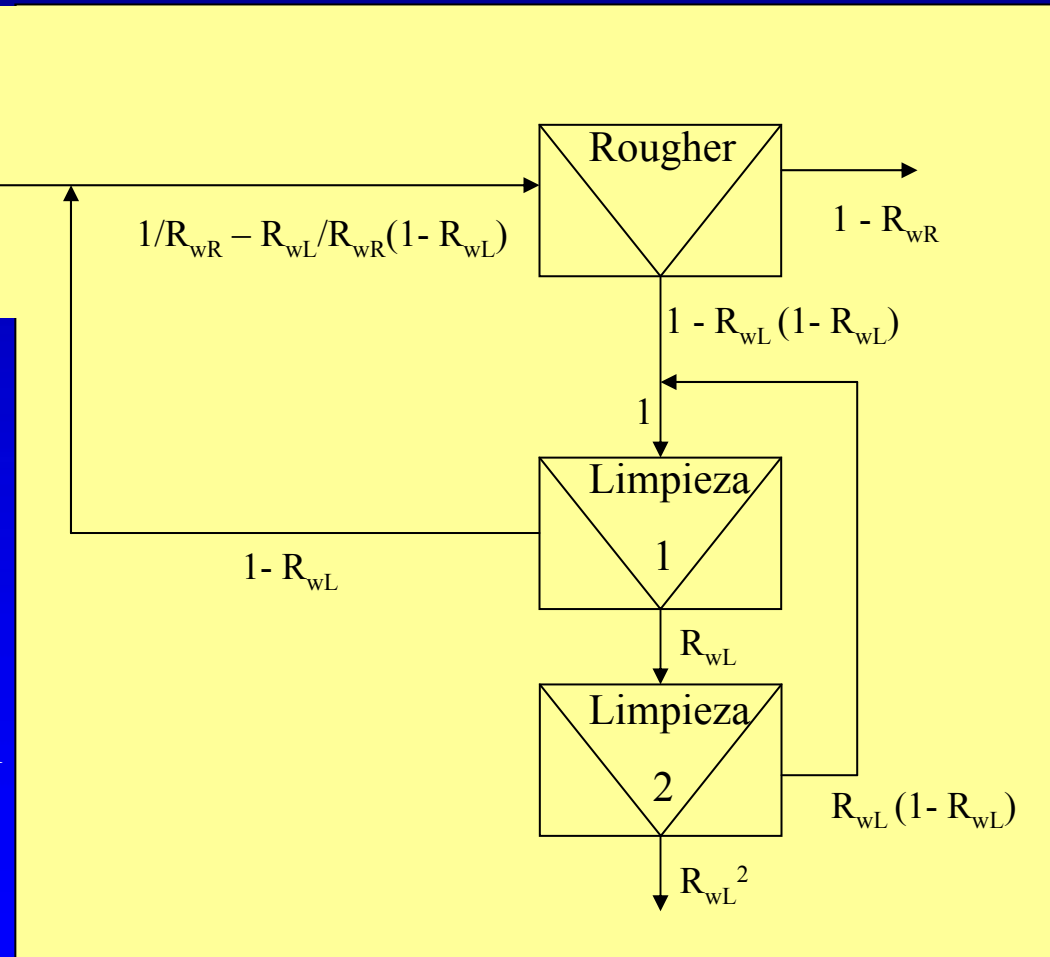
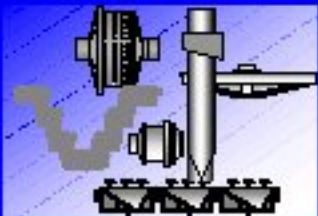
Flotación

Control del arrastre: Etapa de limpieza

$$1/R_{wR} - R_{wL}/R_{wR}(1 - R_{wL}) + R_{wL} - 1$$

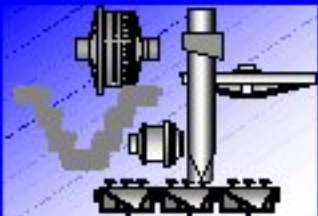
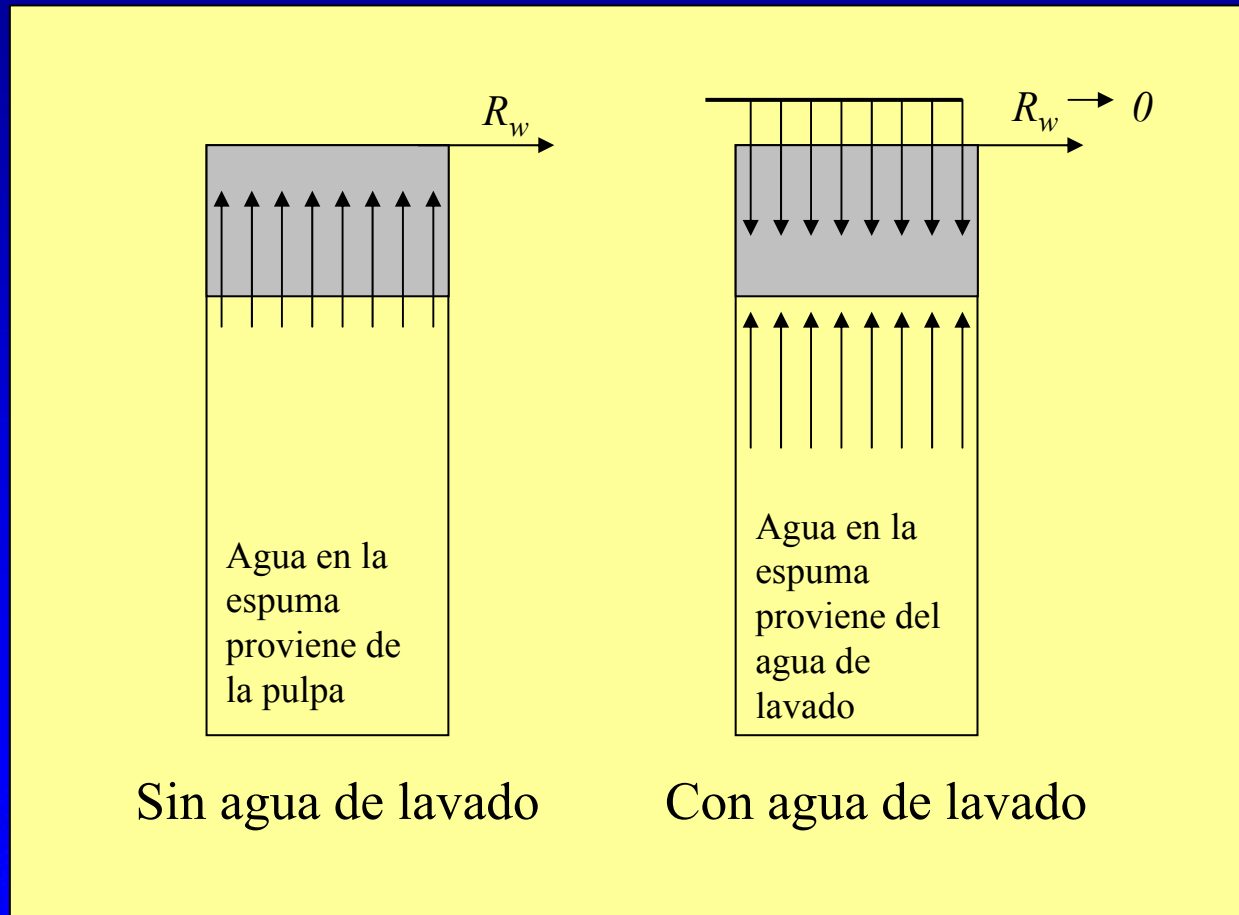
Recuperación total de agua:

Si la recuperación de agua es igual a 10% en todas las etapas, entonces la recuperación total de agua en el circuito es 0,12%



Flotación

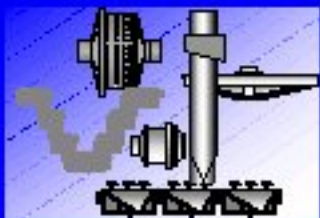
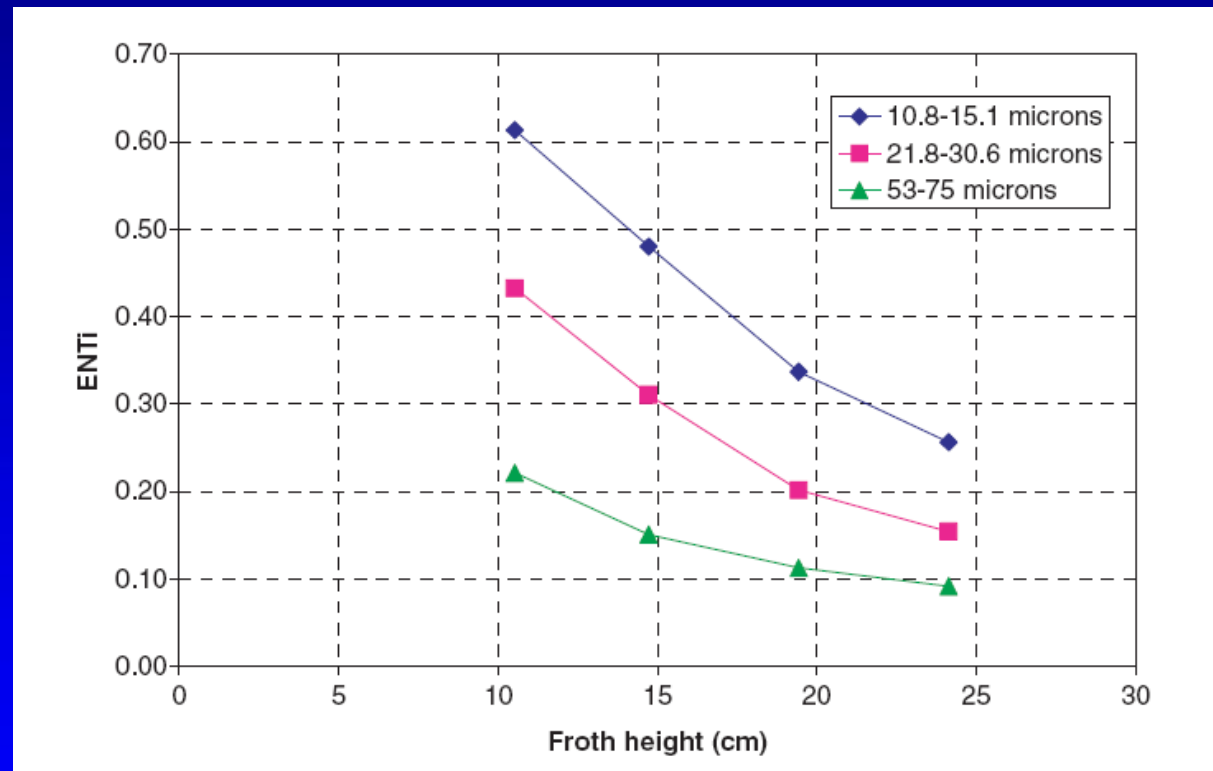
Control del arrastre: Agua de lavado



Flotación

Control del arrastre:
Profundidad de espuma

Aumentos en la profundidad de espuma reducen la flotación por arrastre

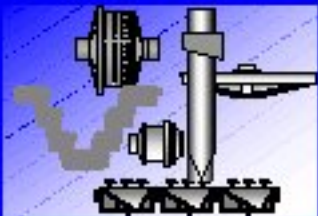


Flotación

Modelo de recuperación de agua

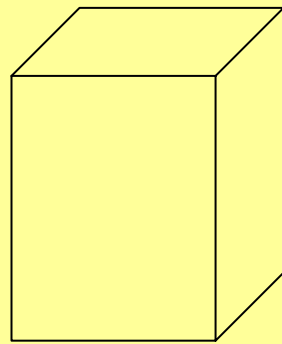
El agua que sale en el concentrado es proporcional al área de burbujas que llegan a la espuma por unidad de tiempo y al espesor del film de agua que cubre dichas burbujas (δ). Si el flujo de agua alimentado es Q_l y el área transversal de la celda es A , entonces la recuperación de agua se puede escribir:

$$R_w \propto \frac{6 J_g A \delta}{d_b Q_l}$$



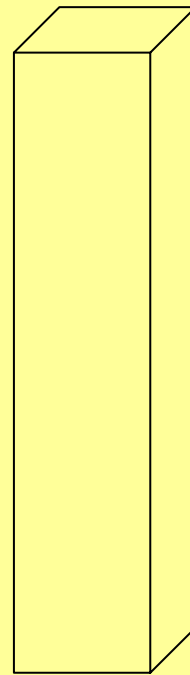
Flotación

Control del arrastre: Geometría de celda



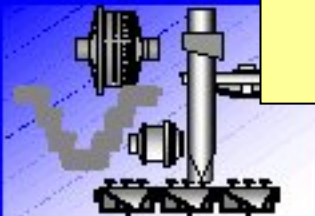
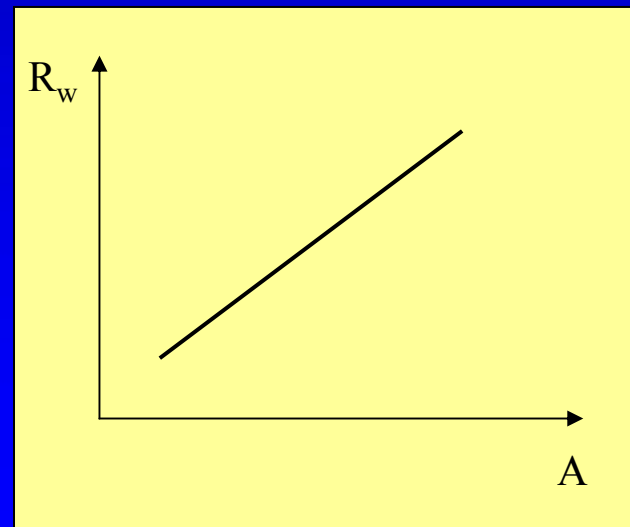
J_g

$$R_w \propto \frac{6J_g A \delta}{d_b Q_l}$$



J_g

Observación: J_g se mantiene en un rango similar a pesar de las diferentes geometrías.

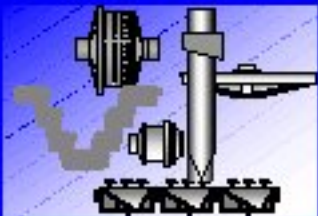
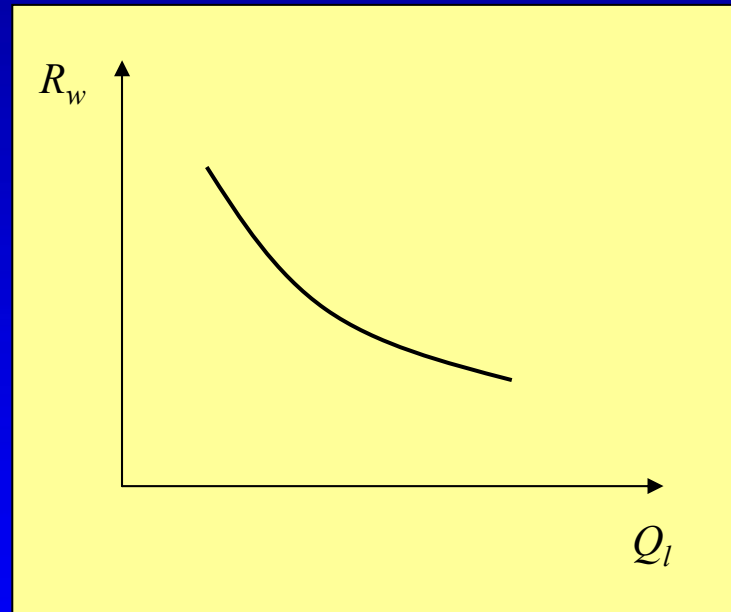


Flotación

Control del arrastre:
Variación del C_p de pulpa

Equivale a variar el
flujo de agua en la
alimentación.

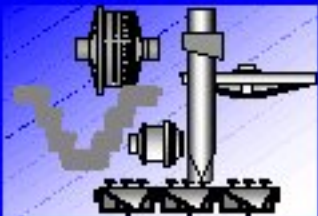
$$R_w \propto \frac{6 J_g A \delta}{d_b Q_l}$$



Flotación

Control del arrastre: Tiempo de residencia

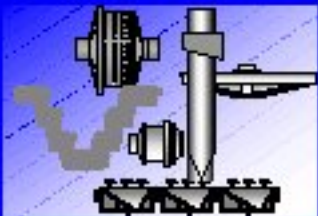
- La recuperación de mineral y agua aumentan con el tiempo de residencia.
- En las últimas celdas de un banco rougher se produce una espuma pobre en mineral y rica en agua.



Flotación

Control del arrastre: Flujo de aire

- La recuperación de agua (y el arrastre) aumentan con el flujo de aire.
- Reducciones en el flujo de aire afectarían la capacidad de la operación.
- Se puede distribuir de una manera inteligente (rougher).



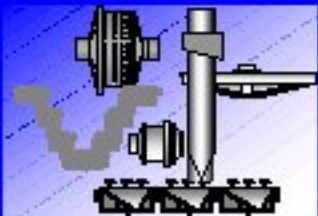
$$R_w \propto \frac{6 J_g A \delta}{d_b Q_l}$$

Flotación

Control del arrastre:
Otros – tipo de espumante

La **dosis y tipo de espumante** afectan la recuperación de agua.

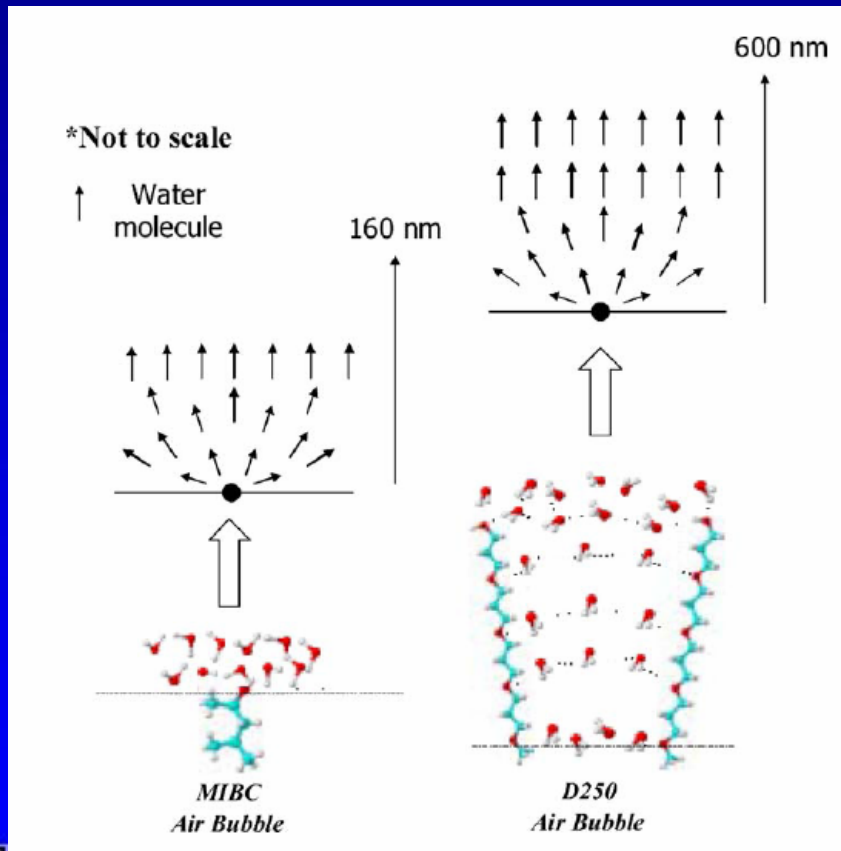
El espesor del film de agua que rodea a la burbuja (δ) varía con el tipo y concentración de espumante.



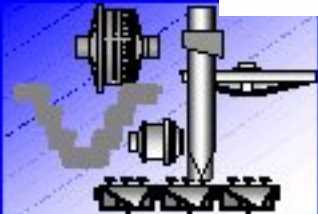
$$R_w \propto \frac{6 J_g A \delta}{d_b Q_l}$$

Flotación

Control del arrastre: Otros – tipo de espumante

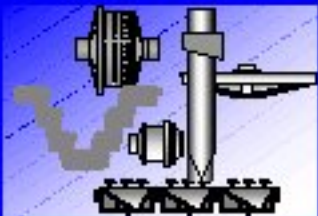
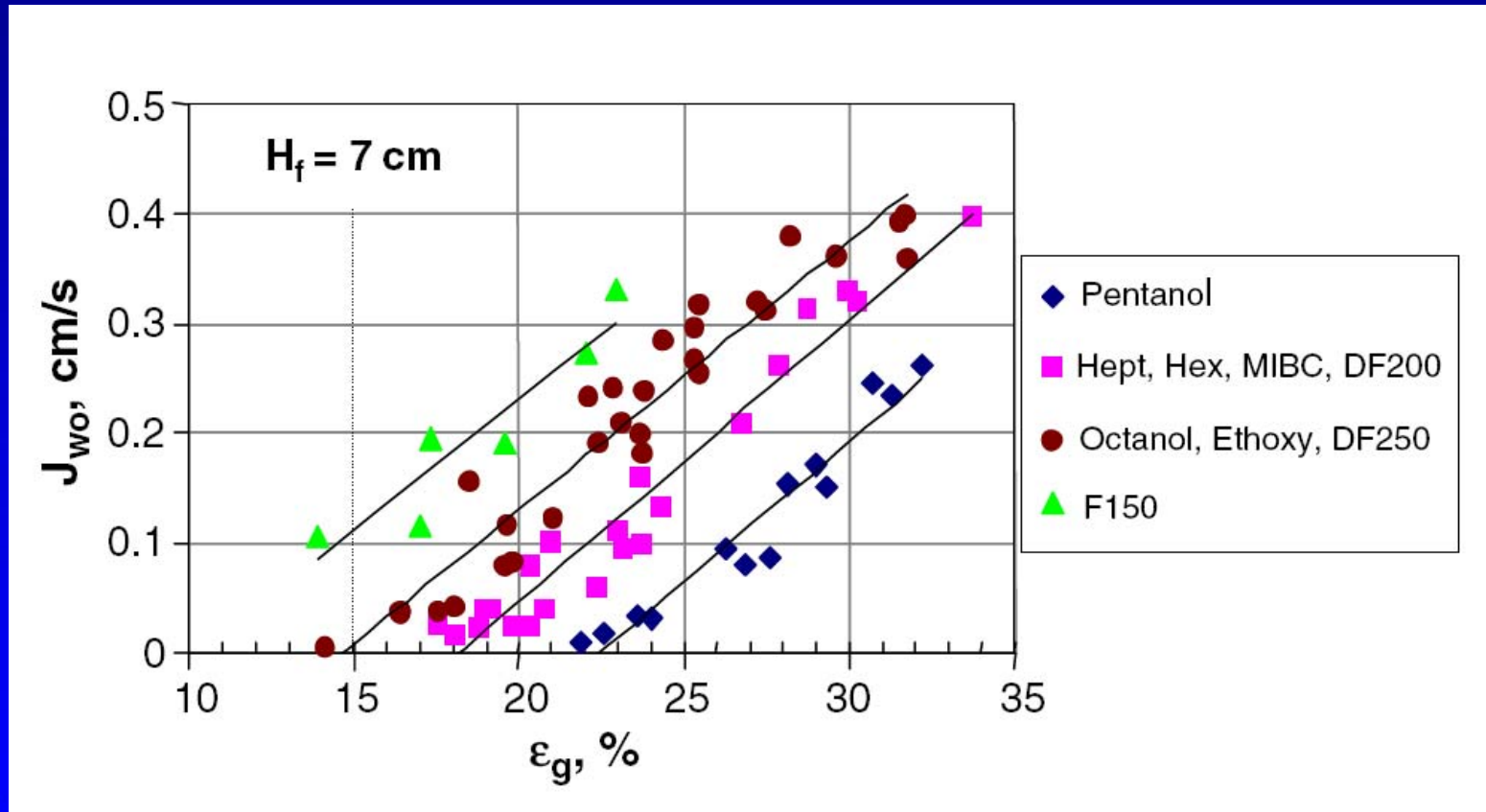


Esp.	J_w (cm/s)	δ (nm)
MIBC:	0.18	<160
D250:	0.25	600



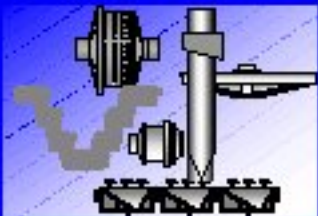
Flotación

Control del arrastre:
Otros – tipo de espumante



Tests de laboratorio

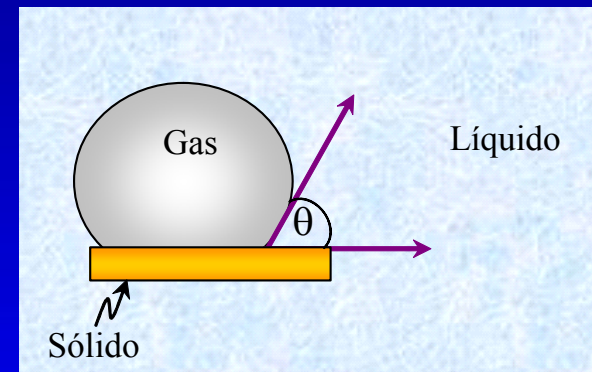
- ◆ Se ha dicho a menudo que la flotación es más un arte que una ciencia y de hecho mucho de su conocimiento es empírico. Como muchos otros procesos la flotación es ‘amigable’ a los métodos experimentales sistemáticos y entre ellos las **pruebas de laboratorio**. También se realiza pruebas de flotación en plantas en operación con objetivos de optimización y de prueba de reactivos.
- ◆ Para las pruebas de laboratorio, las muestras deben ser **representativas**, tanto en composición química como en composición mineralógica y en grado de disseminación. Los yacimientos son variables y una muestra no representa igualmente bien a todas sus partes; luego, la constante cinética determinada hoy puede no mantenerse en el tiempo.



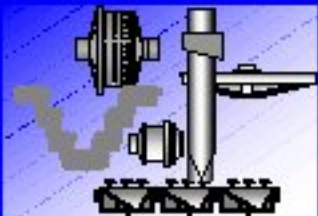
Tests de laboratorio

Existen muchos tests para determinar flotabilidad y caracterizar la flotación. Entre ellos destacan las mediciones de ángulo de contacto, la flotación en tubo Hallimond, pruebas en celdas de flotación batch y los test de ciclo cerrado.

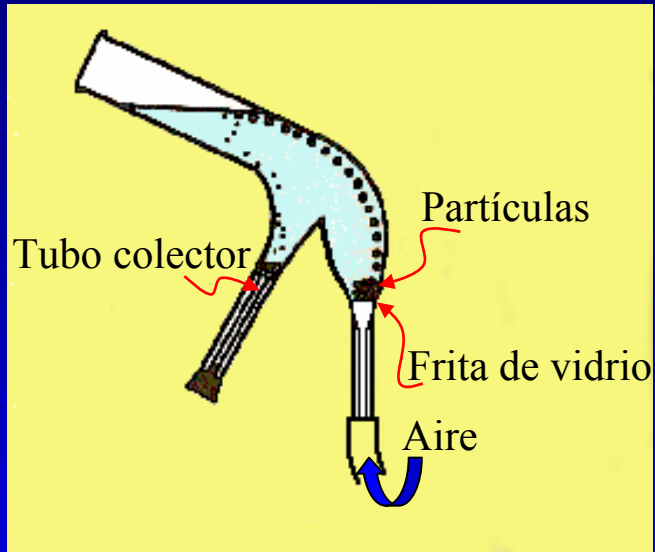
Para medir **ángulo de contacto**, a una superficie limpia y suave de mineral en agua destilada con colector, se contacta una burbuja de aire sujeta al extremo de un tubo capilar. El ángulo de contacto se mide al adherirse la burbuja a la superficie del mineral.



Estas mediciones dan una buena medida de la **hidrofobicidad**, pero no representan las condiciones en una celda. La superficie pulida dista de la superficie natural del mineral y el método es estático mientras que la flotación es dinámica.

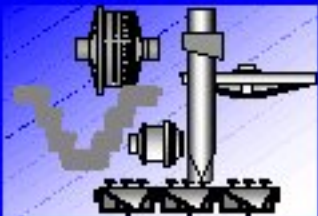


Tests de laboratorio



En el **tubo Hallimond** las partículas de mineral se mantienen sobre un soporte de vidrio sinterizado (frita) que contiene agua destilada y el colector en estudio. Las burbujas de aire se introducen a través de la frita y las partículas hidrofóbicas son levantada por las burbujas, las revientan en la superficie del agua. Las partículas flotadas caen entonces en el tubo de colección. Su peso está relacionado con la flotabilidad.

El test con tubo Hallimond **no se considera representativo** de la operación de flotación. Las partículas están restringidas en su movimiento por lo que es más fácil para las burbujas adherirse y partículas que probablemente no flotarían en condiciones industriales, pueden flotar en este test.



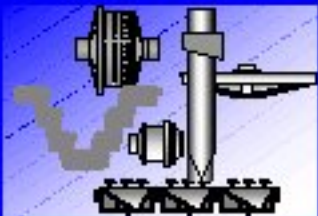
Otras desventajas: en general se utiliza una química de flotación incompleta (sin espumante), no se puede generar datos reales de ley – recuperación y las condiciones de flujo son irreales.

Tests de laboratorio

La mayor parte de las pruebas de laboratorio se desarrollan en **celdas de flotación batch**, usualmente con muestras de entre 0,5 a 2 kg de mineral.

Las celdas son agitadas mecánicamente, con velocidad variable y el aire se introduce normalmente vía una tubería hueca que rodea al impeler.

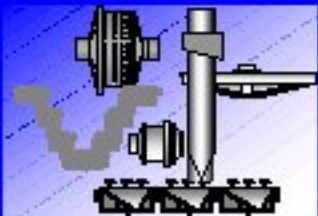
Algunas son del tipo auto **aspirante**, en que la acción del impeler aspira el aire de la atmósfera en un volumen controlado por una válvula y por la velocidad del impeler. Otras operan con aire forzado (fuente externa a baja presión). El flujo debe ser controlado por ejemplo con un rotámetro.



Tests de laboratorio

Condiciones requeridas para las pruebas de laboratorio:

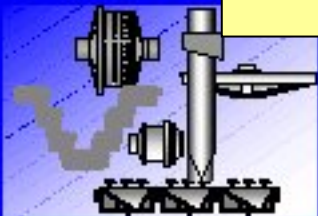
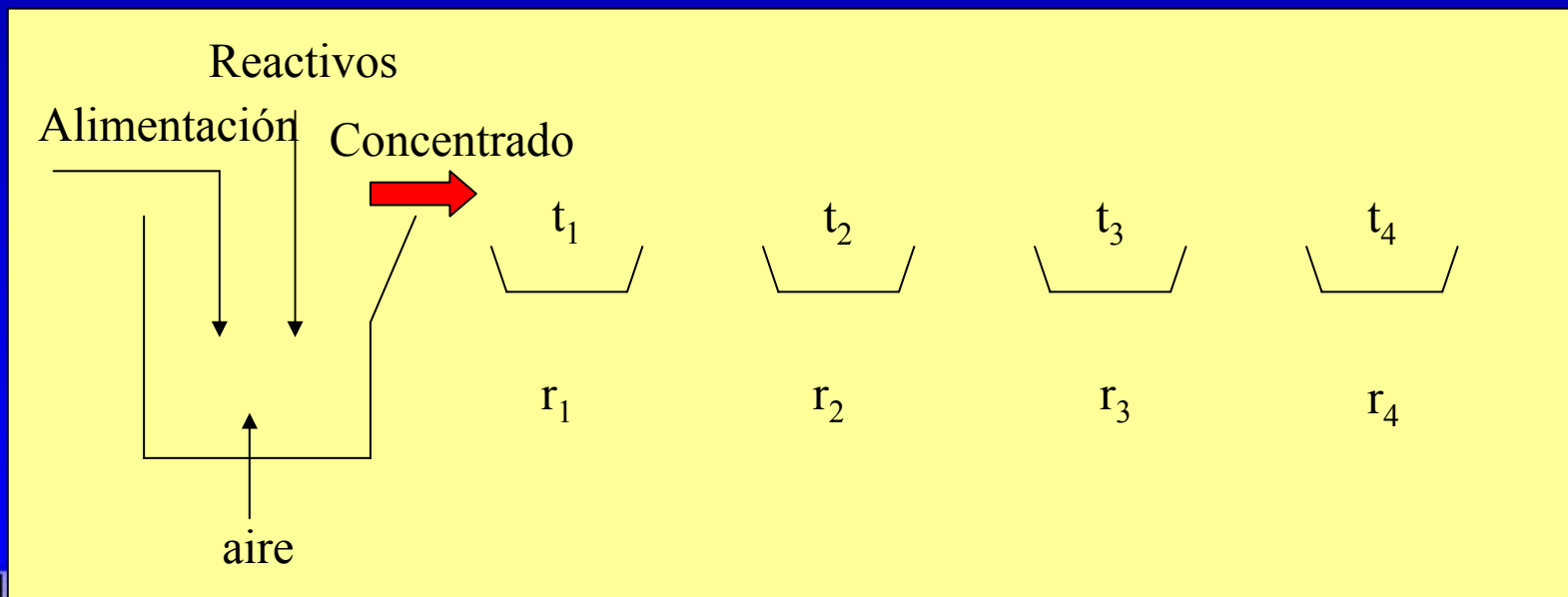
- Agitación intensa para mantener las partículas en suspensión.
- Tiempo de acondicionamiento de 1 – 5 min, con agitación, con reactivos en la pulpa y con/sin aire.
- Patrón de remoción de espuma estandarizado, a intervalos predefinidos, para garantizar reproducibilidad de los resultados.
- El agua a emplear debe ser la que será utilizada industrialmente.
- Se debe controlar el pH y medir la temperatura a la que se realizan las pruebas.
- El tiempo de flotación (3 a 15 min), debe ser determinado en pruebas cinéticas.
- Control del nivel de pulpa, agregando agua de reposición a igual pH y concentración de espumante que la celda.



Tests de laboratorio

Pruebas cinéticas

El tiempo de flotación en pruebas batch puede variar desde 1 min a 1 h, pero generalmente está en el rango de 3 a 15 min. El tiempo de flotación requerido se determina en pruebas donde se colecta concentrados en incrementos separados en función del tiempo, pesando y analizando cada incremento.

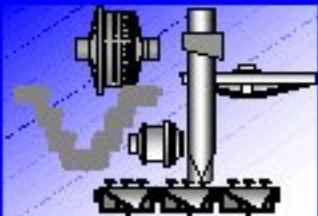


Tests de laboratorio

La mayoría de las operaciones industriales de flotación incluyen al menos una etapa de limpieza, en la que el concentrado es retratado para incrementar su ley y los relaves de esta etapa son reciclados o retratados nuevamente en otra etapa, siendo **reciclado** su concentrado.

Para estudiar el efecto de los **reciclos** se realizan **pruebas de ciclos**, cuyos objetivos principales son simular en el laboratorio, a partir de pruebas batch, la operación en continuo de la planta.

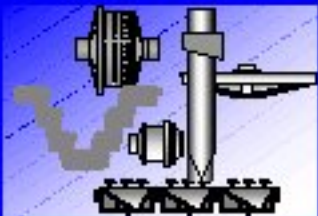
Usualmente se requiere al menos 6 ciclos para que se alcance el equilibrio. Al estar los reactivos en solución, es esencial que los líquidos también se recirculen y que cualquier líquido que se emplee, sea obtenido por decantación o de las etapas de filtrado.



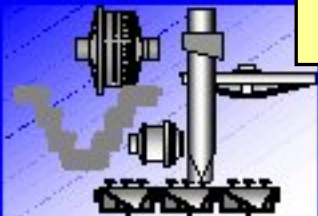
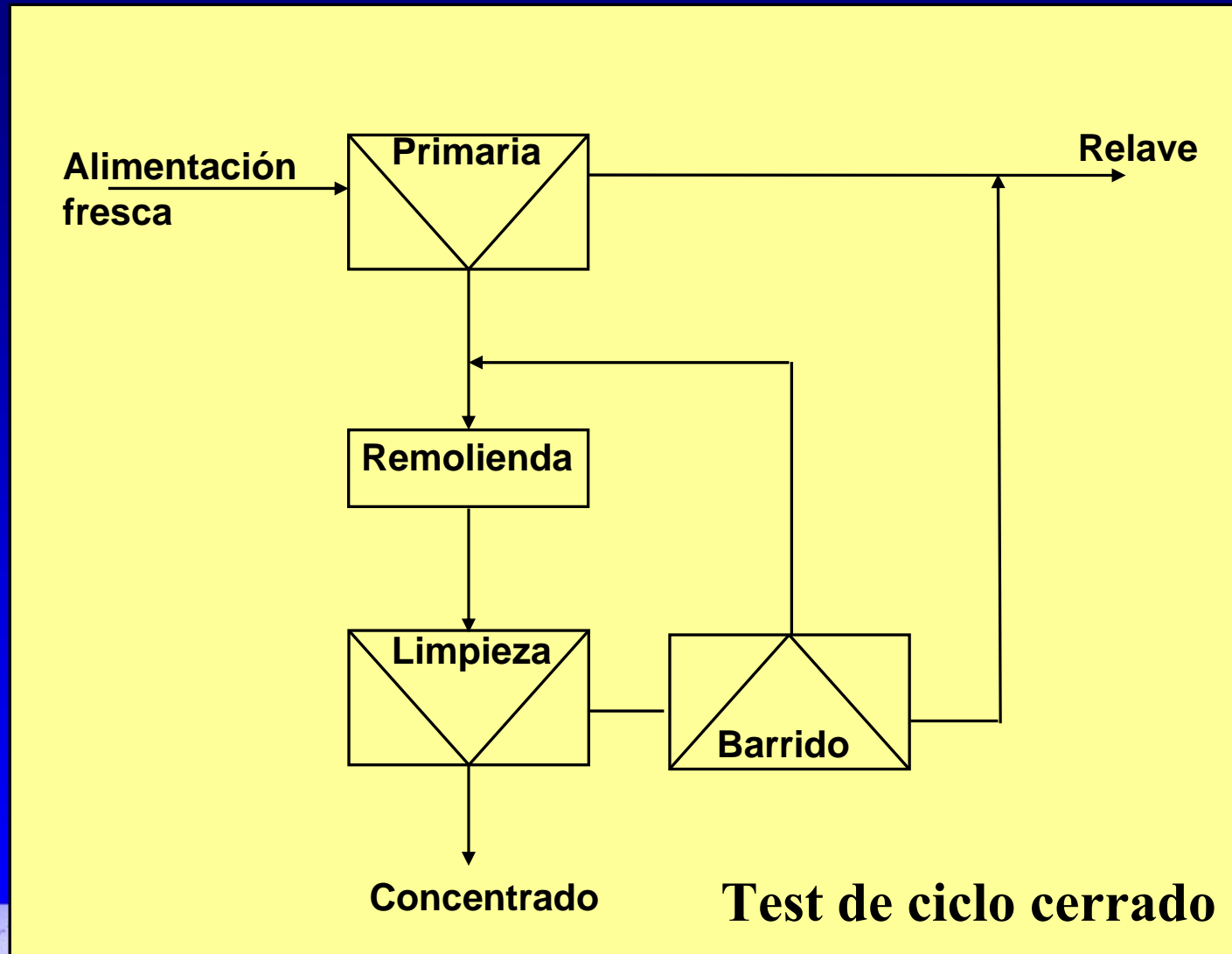
Tests de laboratorio

La prueba de **flotación en ciclo cerrado** es uno de los mejores procedimientos disponibles ya que es capaz de entregar mucha información con respecto a un circuito de flotación en continuo y en muchos casos es un efectivo sustituto para una prueba en continuo a pequeña escala (piloto). El test consiste en una **serie de pruebas batch** realizadas con un equipo de laboratorio, donde los productos generados en una prueba (ciclo n) son agregados a la prueba siguiente (ciclo n + 1).

El test se programa según el circuito a representar. Usualmente incluyen una flotación primaria, una o dos de limpieza y una de barrido. Para obtener información aceptable de una prueba en ciclo cerrado, es fundamental alcanzar el equilibrio, el que se detecta, si no hay análisis en línea, mediante el peso húmedo del queque filtrado de algún producto (concentrado final por ejemplo).

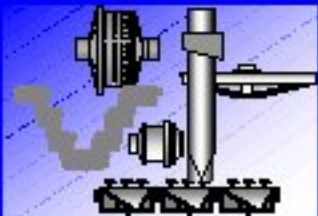
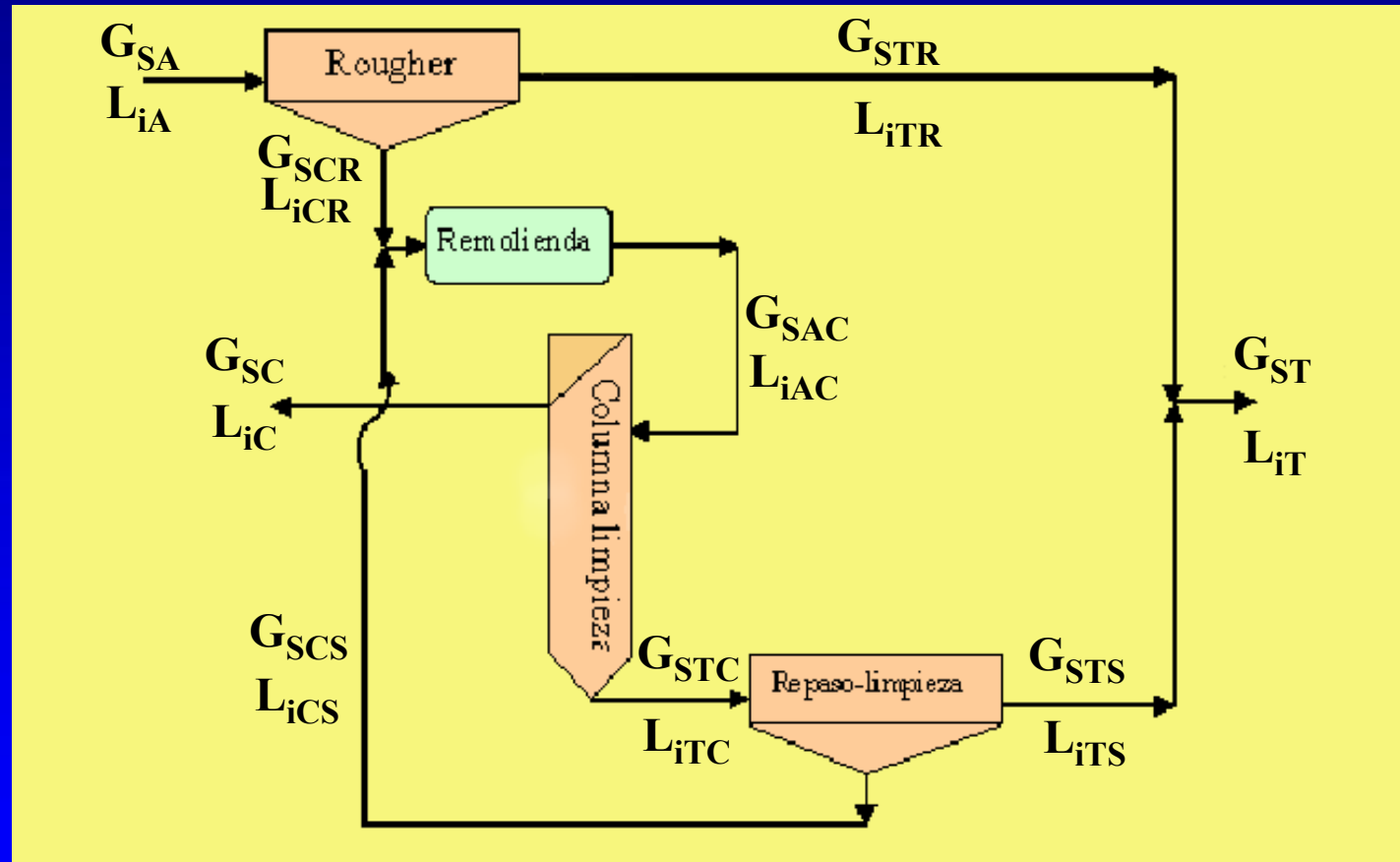


Tests de laboratorio



Flotación

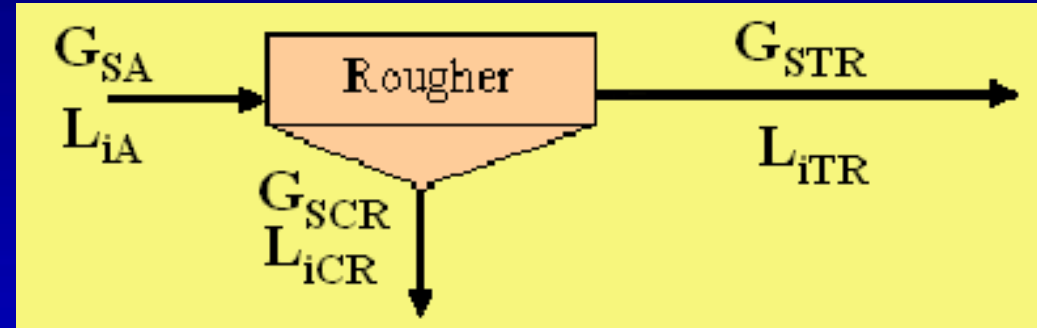
❖ Balances en la flotación



Balances

Balances en la flotación primaria:

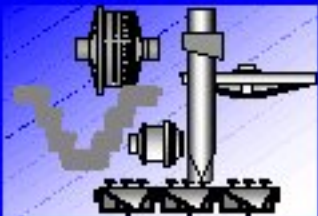
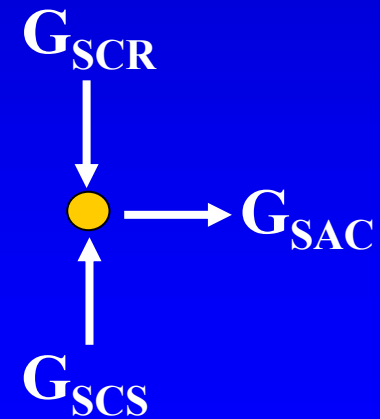
$$G_{SA} = G_{SCR} + G_{STR}$$



$$G_{SA} L_{iA} = G_{SCR} L_{iCR} + G_{STR} L_{iTR}$$

$$G_{SAC} = G_{SCR} + G_{SCS}$$

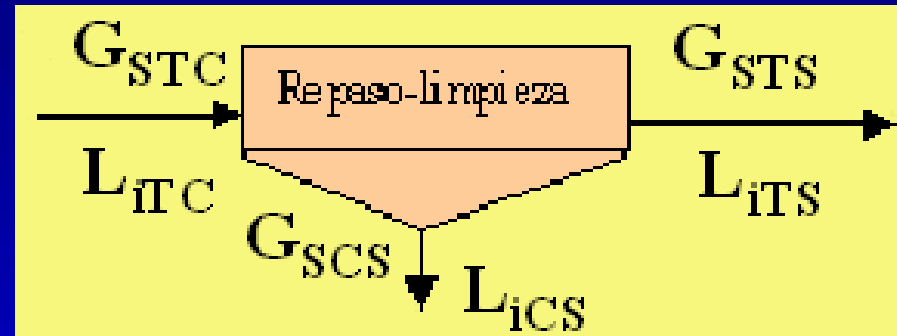
$$G_{SAC} L_{iAC} = G_{SCR} L_{iCR} + G_{SCS} L_{iCS}$$



Balances

Balances en la flotación de barrido:

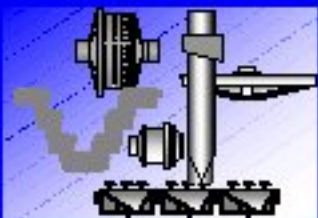
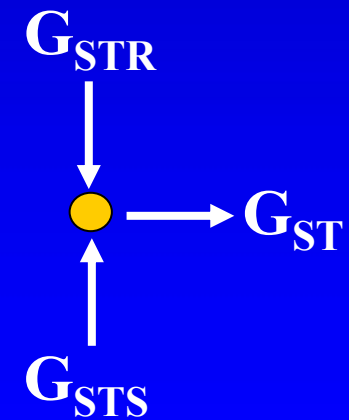
$$G_{STC} = G_{SCS} + G_{STS}$$



$$G_{STC} L_{iTC} = G_{SCS} L_{iCS} + G_{STS} L_{iTS}$$

$$G_{ST} = G_{STS} + G_{STR}$$

$$G_{ST} L_{iT} = G_{STS} L_{iTS} + G_{STR} L_{iTR}$$

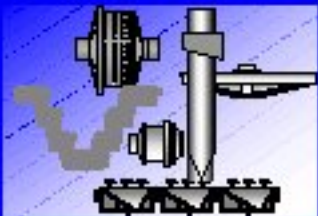
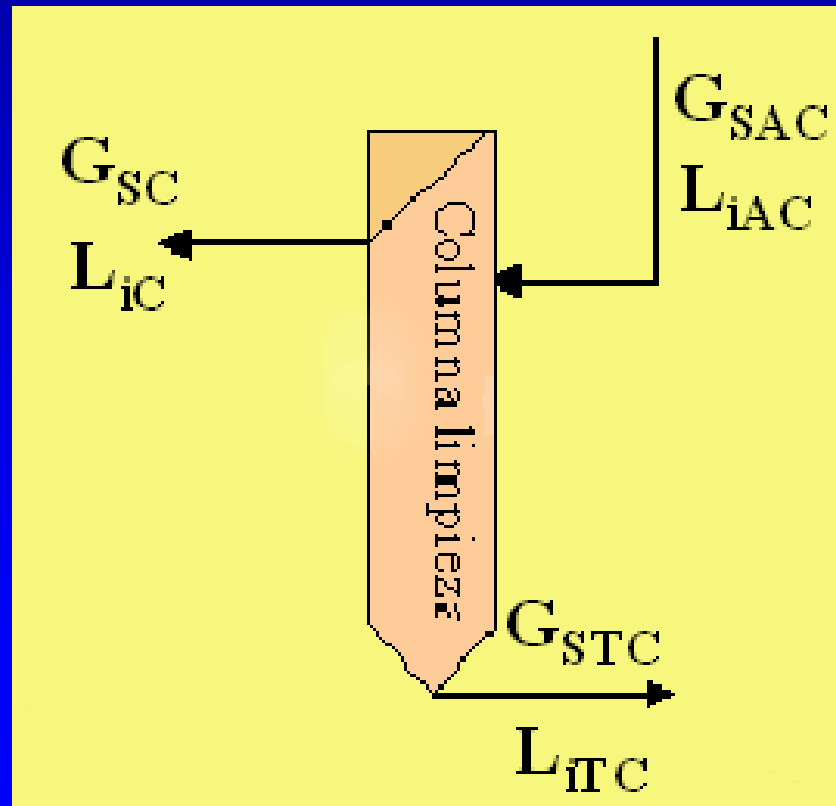


Balances

Balances en la flotación de limpieza:

$$G_{SAC} = G_{SC} + G_{STC}$$

$$G_{SAC} L_{iAC} = G_{SC} L_{iC} + G_{STC} L_{iTC}$$



Indicadores del proceso

Recuperación metalúrgica del elemento o especie “i”:

$$R_i [\%] = \frac{G_{SC} L_{iC}}{G_{SA} L_{iA}} 100 = \frac{(L_{iA} - L_{iR}) L_{iC}}{(L_{iC} - L_{iR}) L_{iA}} 100$$

Valores normales en Cu: 85 – 93 %

Valores normales en Mo (subproducto): 45 – 65 %

Se comparan contra sí mismas en estudios de tendencia

Leyes de productos finales:

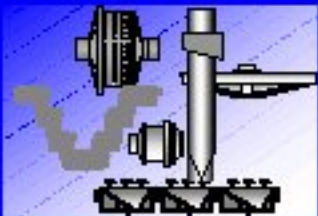
$$L_{Cu,C}, L_{Mo,C}, L_{Cu,R}$$

Valores normales:

$L_{Cu,C}$: 30 – 55 % Cu (depende de la especie),

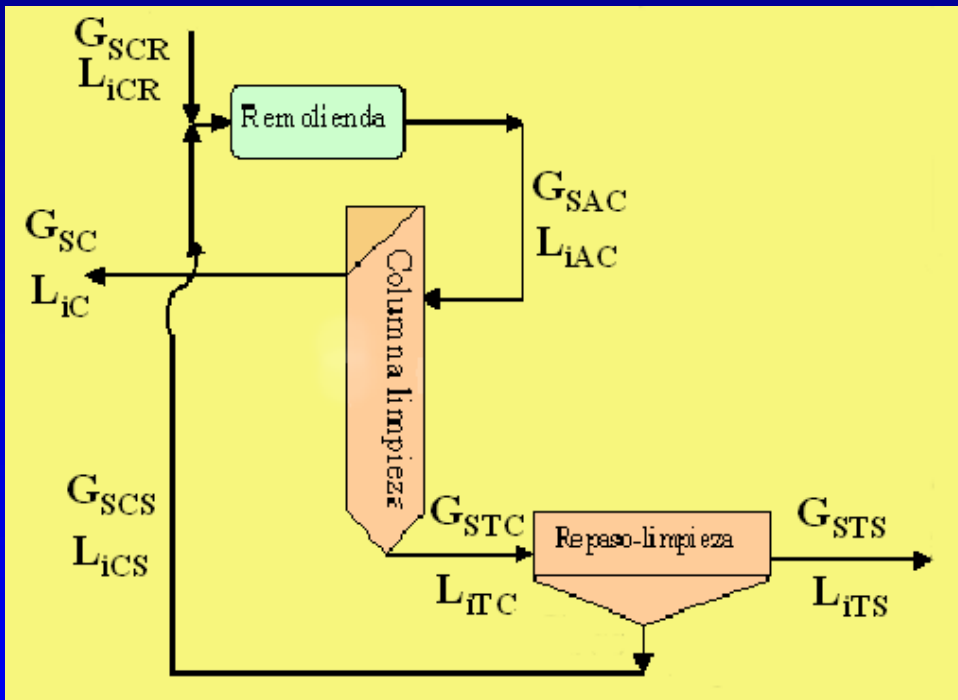
$L_{Mo,C}$: 50 – 58 % Mo, $L_{Cu,R}$: 0,1 – 0,3 % Cu.

Se comparan contra sí mismas en tendencias



Indicadores de proceso

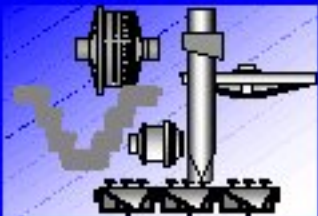
Carga circulante del circuito barrido - limpieza:



$$CC = \frac{G_{SCS}}{G_{SCR}} \cdot 100$$

$$CC_{finos} = \frac{G_{SCS} L_{iCS}}{G_{SCR} L_{iCR}} \cdot 100$$

Se comparan contra sí mismas en tendencias



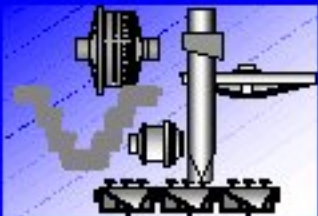
Ajustes de balances

En un circuito de flotación, al existir múltiples líneas de flujos, cada una caracterizada por tonelaje, porcentaje de sólidos y diversas leyes de elementos, se puede configurar muchos balances.

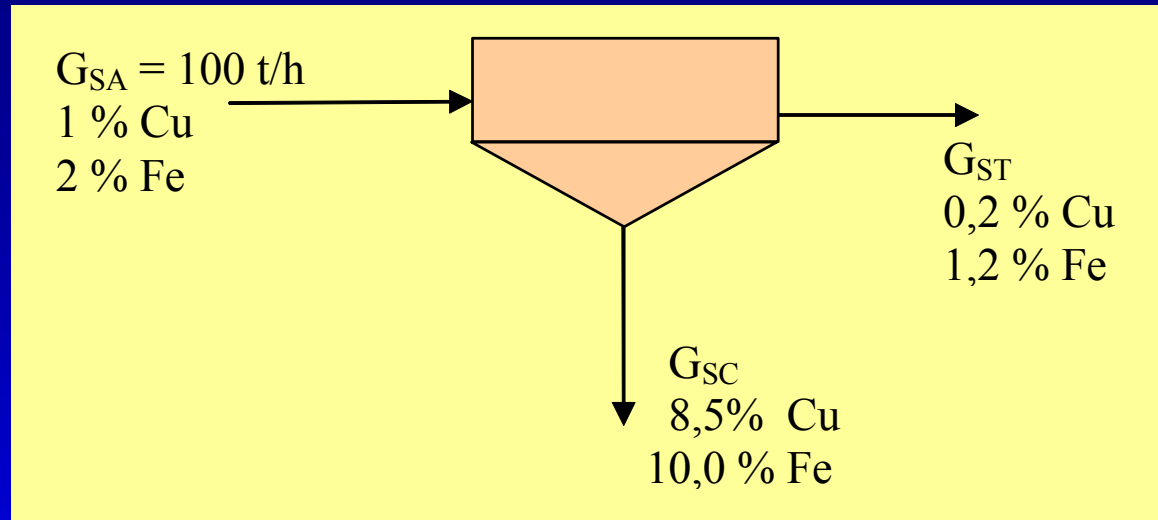
El equilibrio se debe satisfacer **todas** las ecuaciones de balance. Como los datos que adolecen de errores (muestreo, análisis), si no se utiliza alguna forma de ajuste de balances con conciliación de datos, se incurre en sobre simplificaciones y determinaciones inexactas de parámetros operacionales.

➤ **Ejemplo:**

Se considera un circuito simple de flotación primaria de mineral de cobre, del que es posible medir el flujo de alimentación y donde se conoce, previo muestreo y análisis químico, las leyes de cobre y hierro:

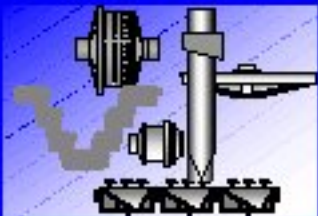


Ajustes de balances



Ecuaciones de balance:

1. Global	:	100	=	$G_{SC} + G_{ST}$
2. Finos Cu	:	100	=	$8,5 G_{SC} + 0,2 G_{ST}$
3. Finos Fe	:	200	=	$10,0 G_{SC} + 1,2 G_{ST}$

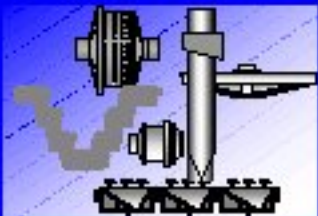


Ajustes de balances

Se tiene una situación de 3 ecuaciones con 2 incógnitas, por lo que bastaría con tomar 2 ecuaciones para resolver el sistema.

El problema es que se pueden hacer 3 combinaciones diferentes de 2 ecuaciones cada una. Se puede ver qué efectos acarrea esta situación, tanto en el valor de las incógnitas como en el valor de un importante parámetro metalúrgico como es la recuperación de cobre de la etapa. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Ecuaciones usadas	Valores calculados		
	G_{SC} [t/h]	G_{ST} [t/h]	R_{Cu} [%]
(1) y (2)	9,6	90,4	81,6
(1) y (3)	9,1	90,9	77,4
(2) y (3)	9,8	85,4	83,3



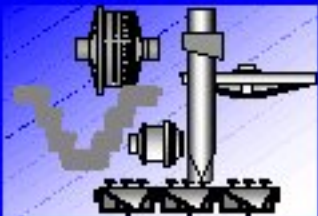
¿Cuál es la Recuperación correcta?

Ajustes de balances

Cualquier combinación da una **apreciación subjetiva e incorrecta** del rendimiento metalúrgico de la etapa. Incluso el promedio entre todos los valores calculados tiene una incerteza considerable. Por otro lado, aún no se sabe a cuales son los valores de los flujos de concentrado y relave.

El mejor camino es **utilizar toda la información posible**, aunque sea redundante, y mediante estrategias de minimización de errores, conciliar los datos, asegurando que cumplan las ecuaciones de balance.

De esta manera, se obtienen datos que, siendo lo más parecidos posibles a los originales, permiten cerrar todos los balances y entregan valores únicos a cada parámetro.

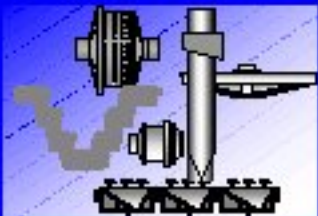


Ajustes de balances

Técnicas de Ajuste con Minimización de Función Objetivo

Los mejores procedimientos para el ajuste de balance son aquellos basados en la minimización de una función objetivo (Φ) que consiste en una sumatoria de los cuadrados de las diferencias entre datos medidos y calculados, ponderados por algún **factor de peso relativo** (k_i), a la que se agrega otra sumatoria, esta vez con las ecuaciones de balance del sistema, planteadas como una resta entre el lado izquierdo y derecho de cada igualdad (deberían dar cero si el balance cierra).

$$\Phi = \sum_{i=1}^N k_i (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{j=1}^M \lambda_j \{Ec. Balance(\hat{y}_i)\}_j^2$$



Ajustes de balances

La primera sumatoria busca garantizar el que se mantengan los N datos calculados (\hat{y}_i) cercanos a los originales, mientras que la segunda sumatoria busca el cierre de las M ecuaciones de balance.

Si consideramos el ejemplo anterior, los y_i serían todos los flujos (G_{SA} , G_{SC} y G_{ST}) y todas las leyes de Cu y Fe en los tres flujos, vale decir, $N = 9$. Las tres ($M = 3$) ecuaciones de balance que existen en el ejemplo se incorporarían en la segunda sumatoria de la siguiente manera:

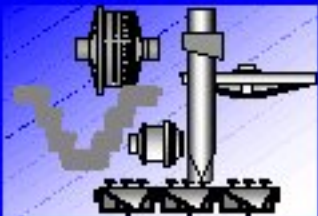
$$\hat{G}_{SA} - \hat{G}_{SC} - \hat{G}_{ST}$$

+

$$\hat{G}_{SA} \hat{L}_{Cu,A} - \hat{G}_{SC} \hat{L}_{Cu,C} - \hat{G}_{ST} \hat{L}_{Cu,T}$$

+

$$\hat{G}_{SA} \hat{L}_{Fe,A} - \hat{G}_{SC} \hat{L}_{Fe,C} - \hat{G}_{ST} \hat{L}_{Fe,T}$$



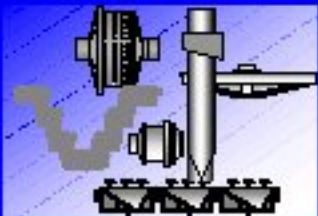
Ajustes de balances

Para resolver la minimización de la función objetivo, existen dos alternativas principales:

- Con utilización de multiplicadores de Lagrange y derivadas parciales.
- Con utilización de métodos numéricos de búsqueda de soluciones.

En el primer caso se postula la ecuación de Lagrange (siendo λ_j los multiplicadores de Lagrange) como sigue:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N k_i (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{j=1}^M \lambda_j \{Ec. Balance(\hat{y}_i)\}_j$$



Ajustes de balances

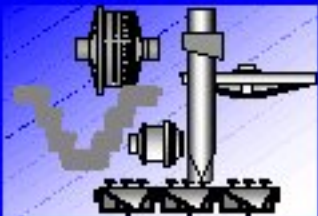
Para resolver la ecuación se calculan las derivadas parciales con respecto a cada \hat{y}_i y a cada λ_j y se igualan a cero en búsqueda de la minimización de la función. Se tiene así un sistema de **(N+M) ecuaciones y (N+M) incógnitas**: los N valores por calcular (flujos y leyes) y los M multiplicadores de Lagrange (uno por cada ecuación de balance).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \hat{y}_i} = 0, \forall i$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_j} = 0, \forall j$$

La solución de este sistema de ecuaciones entrega los valores ajustados requeridos.

En el caso de emplear métodos numéricos para resolver la minimización, es posible utilizar los múltiples algoritmos disponibles en la literatura especializada e incluso los incorporados en las planillas de cálculo más usadas.

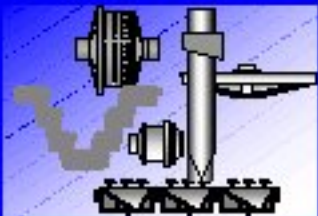


Existen softwares especializados (JKSimFloat, Bilmat) que realizan conciliación de datos. La eficacia de estos programas radica en la **correcta elección del modelo de error** (que definen los factores de peso relativos k_i)



Flotación de Minerales:

- **Separación selectiva**



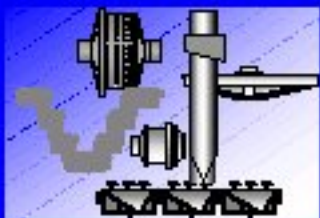
Separación selectiva

La separación selectiva de especies de interés más común en minerales sulfurados de cobre corresponde a aquella que se realiza para separar calcopirita de molibdenita.

Esta separación se lleva a cabo en una etapa de **flotación selectiva** a la cual entra como alimentación el **concentrado** generado en la etapa de **flotación colectiva** (Cu-Mo).

En la flotación selectiva se **deprime la calcopirita** para flotar sólo la molibdenita. Esto porque su mayor flotabilidad (flotabilidad natural) y porque se encuentra en menor cantidad.

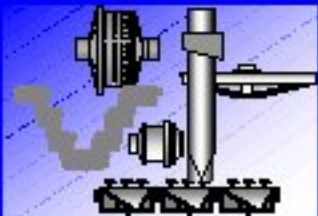
En este caso tanto el concentrado como el relave de la planta de flotación están constituidos por especies de interés.



Flotación

Depresión de calcopirita (flotación selectiva Cu-Mo):

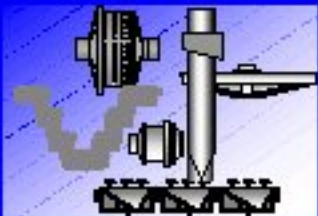
- En flotación selectiva se deprime el cobre (calcopirita) y se flota la molibdenita.
- Calcopirita no es muy sensible a la adición de cianuro como depresante comparado con la pirita.
- Se deprime con la adición de sulfuro de sodio o sulfhidrato de sodio (NaSH).
- La flotabilidad de la calcopirita se puede reducir al disminuir el potencial electroquímico de la pulpa (se inhibe la adsorción de colector).
- Flotación con nitrógeno para controlar el potencial.
- Flotabilidad natural de molibdenita se acentúa agregando fuel oil.



Separación selectiva

Existen especies mineralógicas que afectan negativamente las etapas de separación selectivas. Dentro de éstas destacan:

- Arcillas (Montmorillonita, Chamosita, Caolinita, Ilita, etc.)
- Enargita
- Pirita
- Arsenopirita
- Minerales de Plomo
- Selenio
- Magnetita



Separación selectiva

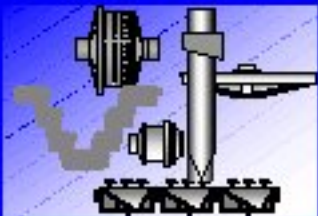
- Pirita

La pirita (FeS_2) se encuentra típicamente acompañando a minerales sulfurados de cobre, plomo y cinc, al oro y a la plata y constituye una de las **principales impurezas**.

La presencia de sulfuros de hierro convierte a la mena en acídica (disminuye el pH) con la producción de sulfatos e hidróxidos de hierro, plomo y cinc, los cuales afectan la superficie de los minerales de plomo y cinc.

Las sales disueltas tales como sulfato ferroso generan un consumo mayor de reactivos (xantato, cianuro).

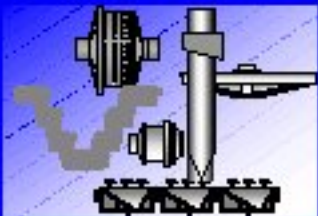
Por otra parte concentrados de oro con pirita retardan o inhiben la transformación del oro metálico a solución.



Flotación

Depresión de pirita:

- pH alcalino (9-12) deprime la pirita (regulado con cal por razones económicas).
- pH alto previene la oxidación del xantato a dixantógeno.
- A estos pH la superficie de la pirita estará cubierta de hidróxido férrico.
- La adición de cianuro (NaCN) ayuda en la depresión de pirita.
- Formación de un complejo Fe-CN insoluble por medio de un mecanismo electroquímico.
- Cianuro además desplaza xantato ya adsorbido en pirita.



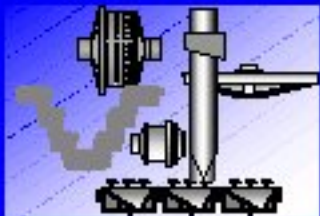
Separación selectiva

- Arcillas

La presencia de arcillas en los minerales afectan nocivamente las distintas etapas del procesamiento de minerales (conminución, flotación y separación sólido – líquido). Dentro de las arcillas que se encuentran asociadas a los minerales de cobre destacan la Montmorillonita, la Chamosita, la Caolinita y la Illita.

Presencia de arcillas en minerales de cobre

Ore Source/Mine	Origin	Ore Type	Rock Type	Clay Type and Amount
Escondida (Benc 1906)	Chile	A	Porphyry/Andesite	Kaolinite 12% Illite 18%
Disputada (high clay)	Chile	B	Porphyry/Quartz	Montmorillonite 10% Illite 4%
Mansa Mina (Veta 3)	Chile	C	Andesite/Quartz	Kaolinite 8% Illite 4%
Escondida (Andesite)	Chile	D	Andesite	Montmorillonite 4% Brammollite 2%
Minas Conga	Peru	E	Porphyry/Andesite/Quartz	Kaolinite 22% Illite 18%
Batu Hijau	Indonesia	F	Andesite	Chamosite 11.5% Kaolinite 7% Illite 5%



Bulatovic et al.

Separación selectiva

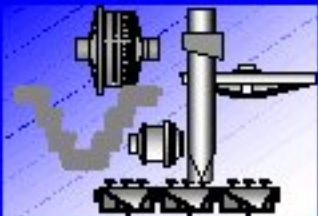
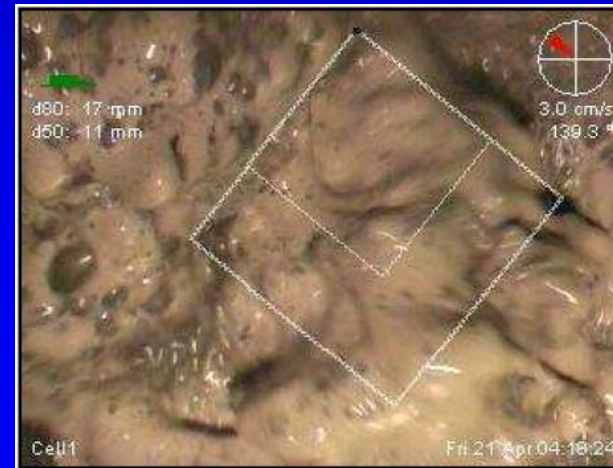
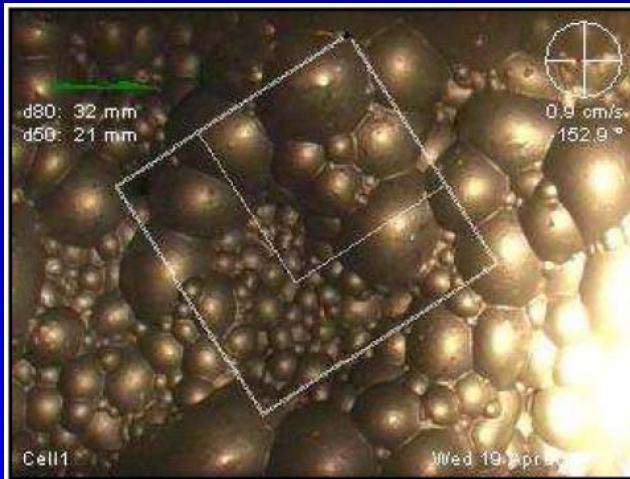
La presencia de minerales arcillosos afecta la flotación de minerales de **Cu/Mo** en diversas formas:

- **Reduce la selectividad y recuperación**, esta última debido a la formación de una capa de lamas arcillosas que recubre las partículas y a las burbujas de aire impidiendo la unión partícula - burbuja.
- Aumenta el **consumo de reactivos** de flotación por afinidad de estos con las arcillas y el consumo de otros reactivos, para contrarrestar los efectos perjudiciales de los minerales arcillosos.
- Generación de **espumas de mala calidad** que afectan la recuperación. El tipo de espuma formada depende del tipo de arcilla; la montmorillonita y chamosita produce espuma fina, muy **inestable** que colapsa constantemente y desaparece rápidamente, aún con dosis alta de espumante. La caolinita y la illita producen en un comienzo una espuma seca sin la textura de burbujas. Luego de remover esta espuma inicial, las burbujas crecen y transportan gran cantidad de lama al concentrado. Arcillas de tipo hidróxido de fierro destruyen completamente la



Separación selectiva

Espumas de buena y mala calidad:



Separación selectiva

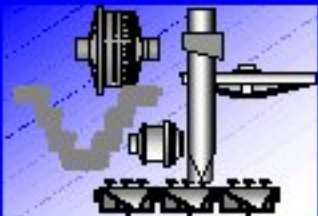
- Producción de gran cantidad de lamas que son transferidas al concentrado afectando la ley (calidad) de éste.

En presencia de minerales arcillosos se pueden buscar efectos compensatorios:

- La densidad de pulpa o porcentaje de sólido en la flotación
- El uso de dispersantes
- El deslame antes de flotación
- El tipo de espumante

Densidad de pulpa o porcentaje de sólido en la flotación

La disminución del porcentaje de sólido tiene un efecto positivo en la recuperación de cobre, en especial en rocas porfíricas y andesíticas, y presencia de arcilla tipo illita - caolinita, montmorillonita, y chamosita.

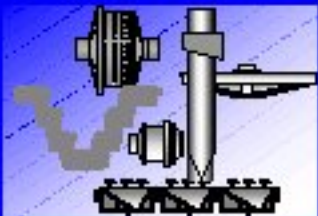


Separación selectiva

Uso de dispersantes

La adición de dispersantes mejoraría la flotación de minerales con contenido de arcillas, dentro de estos encontramos:

- ✓ Quebracho (ácido tánico)
- ✓ Daxad 19 (compuesto orgánico: sal de sodio de ácido alquilnaftaleno sulfónico)
- ✓ SHQ (mezcla de Silicato de sodio Na_2SiO_3 : Calgon glass: Quebracho a razón 40 : 40 : 20).
- ✓ El sulfuro de sodio ($\text{Na}_2\text{S}\cdot\text{H}_2\text{O}$) es de particular interés pues reduce el consumo de colector al adsorberse en la superficie de las arcillas y actúa como dispersante. Su uso además minimiza el efecto negativo del aumento de pH sobre la recuperación.



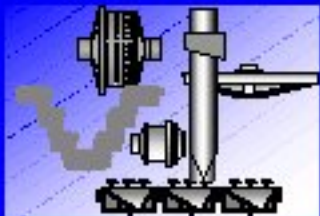
Separación selectiva

Deslame antes de la flotación

La eliminación de las arcillas antes de la flotación mediante **lavado y deslame** del mineral produciría un aumento en la recuperación, particularmente para aquellos casos donde hay presencia de arcillas del tipo montmorillonita y chamosita.

Tipo de espumante

La selección del espumante juega un rol importante en la flotación con presencia de minerales arcillosos. La recuperación de cobre aumentaría al utilizar la mezcla de espumantes MIBC/aceite de pino. La mejora más significativa en la recuperación se alcanzaría utilizando **espumantes que se comporten bien sobre un amplio rango de pH.**



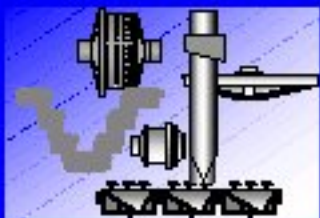
Separación selectiva

- Enargita

El arsénico es una de las impurezas frecuente de encontrar en concentrados de cobre en algunas plantas chilenas. Típicamente el arsénico se presenta en los concentrados de cobre como enargita (Cu_3AsS_4), que contiene un 50% de Cu, 20% As y 30% S, también es posible encontrarlo, pero en menor cantidad, como tenantina $(\text{Cu, Ag, Fe, Zn})_{12} \text{As}_4\text{S}_{13}$.

Los concentrados de cobre que se producen y contienen enargita o tenantita pasan a la etapa de fundición llevando altos contenidos de arsénico, el cual durante el tratamiento pirometalúrgico se pierde en la etapa de limpieza de gases y purificación electrolítica ocasionando graves daños ambientales.

Controlar la enargita es complicado, se sugiere el uso de colectores tipo **ditiofosfatos** y el **control del potencial electroquímico** en la celda de flotación.



Separación selectiva

- Magnetita

La presencia de magnetita en los concentrados de cobre se considera indeseable pues en forma sólida origina perturbaciones en el proceso de fundición de concentrados, causando principalmente una reacción con el CuS de la mata originando la flotación de partículas de la misma.

Su punto de carga cero (PCC) es a pH 6,5, por lo tanto si se está trabajando con reactivos del tipo xantato, se debe operar a pH por sobre este valor para evitar la adsorción de colector sobre este óxido (Fe_3O_4)

