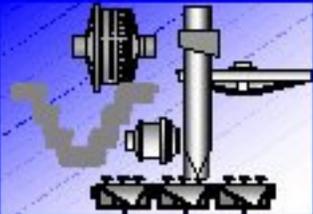




Fundamentos:

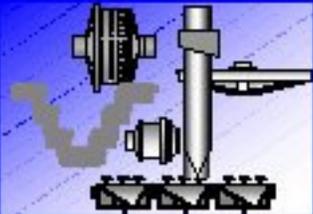
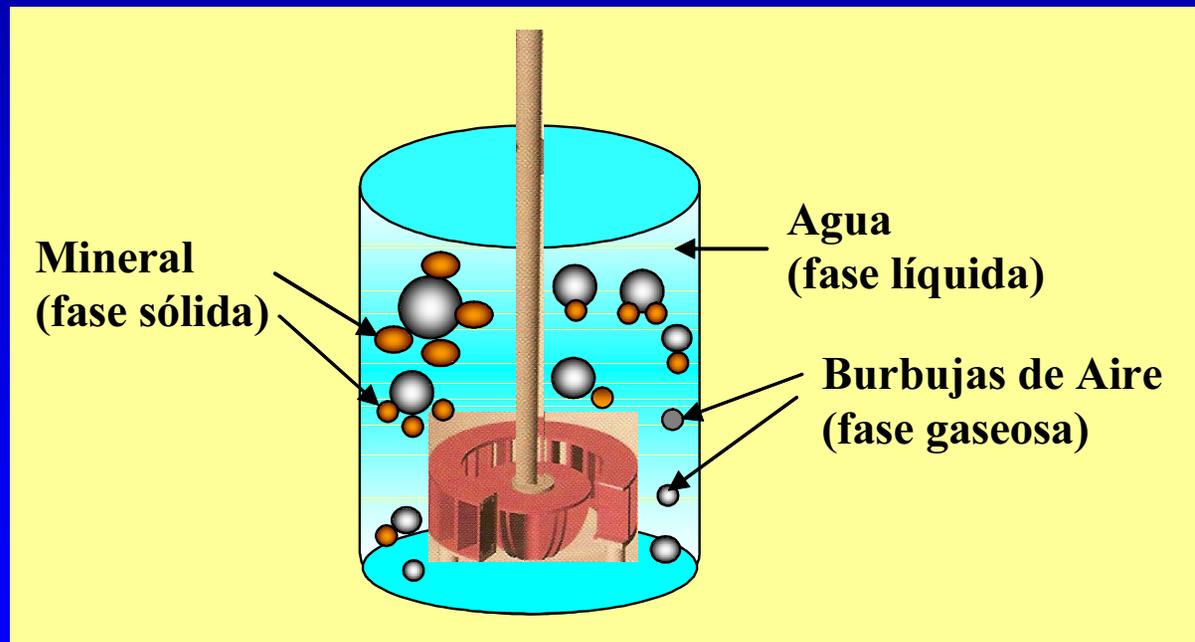
➤ Flotación de Minerales



Flotación

Para entender el proceso de flotación, es necesario estudiar las propiedades físicas y químicas de las superficies de los minerales, la relación entre las fases sólida, líquida y gaseosa, y sus interfases. También es básico comprender que la adsorción en la superficie de un mineral es controlada en gran medida por su naturaleza eléctrica.

❖ Fases:

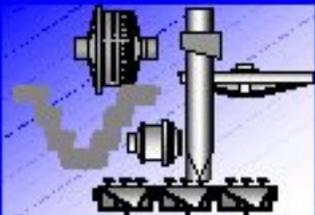


Flotación

➤ *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** (trizaduras, 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

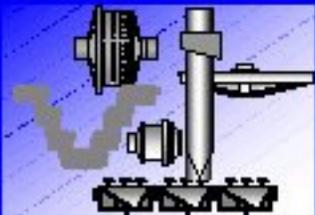
En relación con su afinidad con el agua, los minerales pueden presentar propiedades **hidrofóbicas** (sin afinidad) e **hidrofilicas** (con afinidad), que determinan su flotabilidad natural. Esto está directamente relacionado con su polaridad. Se tiene así:

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



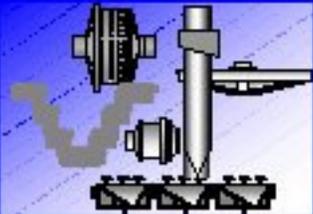
Flotación

➤ *Fase Líquida:*

Está constituida por agua con reactivos. El agua es polar, siendo ésta la causa de la hidratación de la superficie del mineral en soluciones acuosas. Contiene generalmente iones (Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , SO_4^- , etc.), impurezas y contaminantes naturales. La dureza del agua, o sea, la contaminación natural causada por sales de calcio, magnesio y sodio, puede cambiar completamente la respuesta de la flotación de algunos minerales, ya sea por consumo excesivo de reactivos, formación de sales insolubles, etc.

➤ *Fase Gaseosa:*

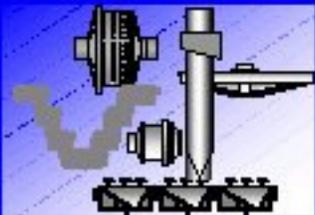
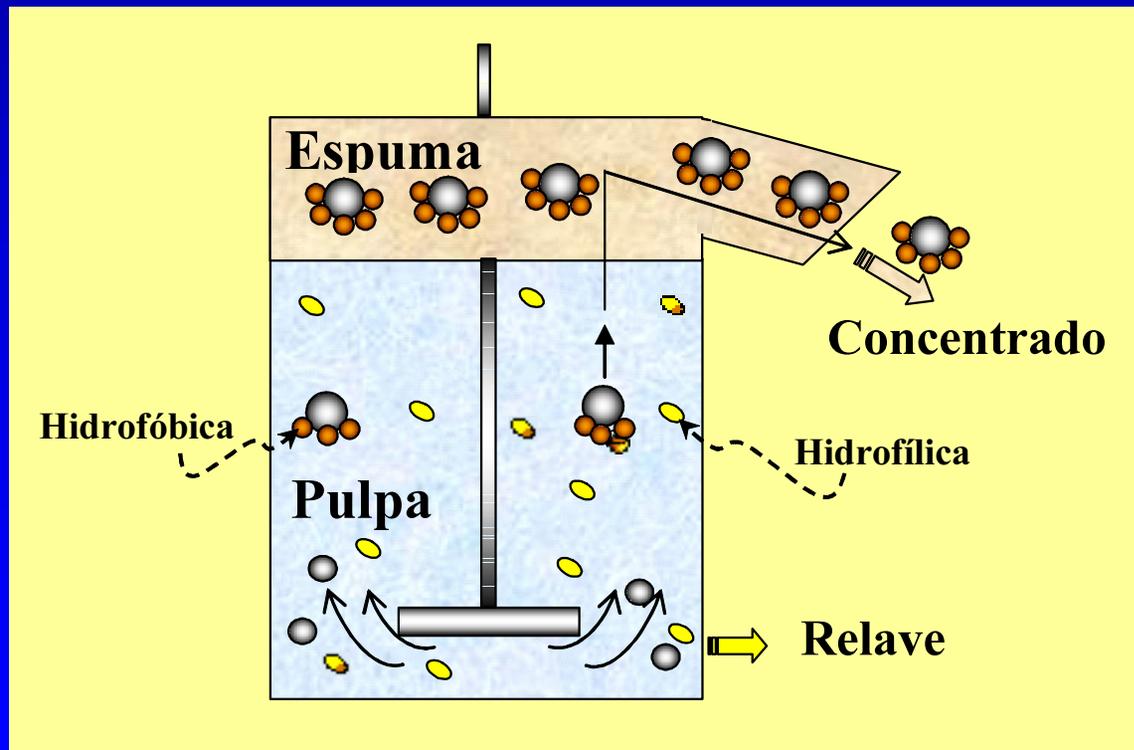
Constituida generalmente por aire (en algunos casos por otro gas, nitrógeno por ejm.), que se introduce y dispersa en la forma de pequeñas burbujas.



Flotación

❖ Separación selectiva de minerales

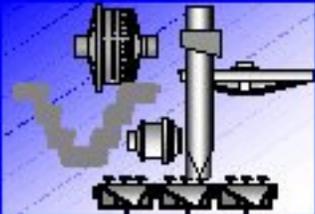
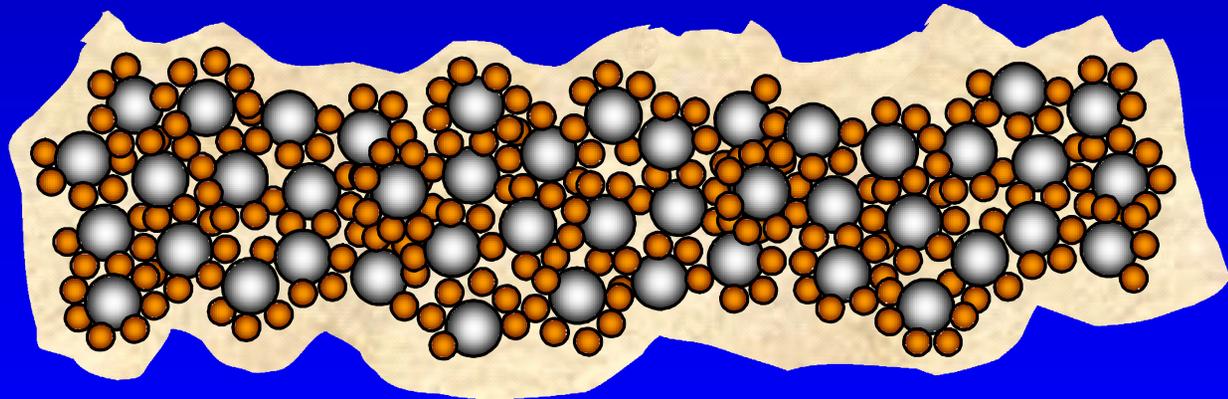
Se produce, al coexistir las fases líquida y gaseosa, ya que las partículas hidrofóbicas “preferirán” adherirse a la fase gaseosa en vez de la líquida, mientras que las demás permanecerán en la fase líquida. Las burbujas con partículas adheridas, con una densidad conjunta menor que la del líquido, ascenderán, pasando a la espuma.



Flotación

El agregado burbuja – partículas debe lograr mantenerse tras su paso a la superficie de la pulpa. Obstaculiza este paso la tensión superficial del líquido que debe por tanto ser disminuida. El conjunto de agregados burbuja – partículas, en la superficie, debe adquirir la forma de una espuma estable para posibilitar su remoción.

Espuma



Concentración de Minerales

Flotación

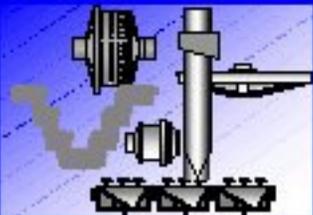
❖ Interfases

Los fenómenos que ocurren en flotación son interacciones físicas y químicas específicas entre los 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

Hay dos aspectos importantes de destacar:

- La termodinámica de adsorción en la superficie del mineral y en la interfase gas – agua.
- La termodinámica que controla la unión de las partículas de mineral a las burbujas de aire.



Flotación

La entalpía por unidad de área de cualquier superficie (**H**), la cual es igual al total de energía superficial, esta dada por:

$$\mathbf{H = G + T S}$$

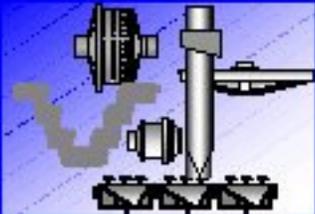
Donde:

G = Energía libre superficial por unidad de área.

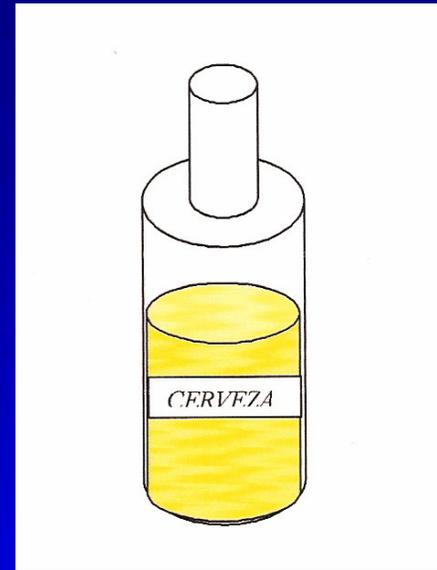
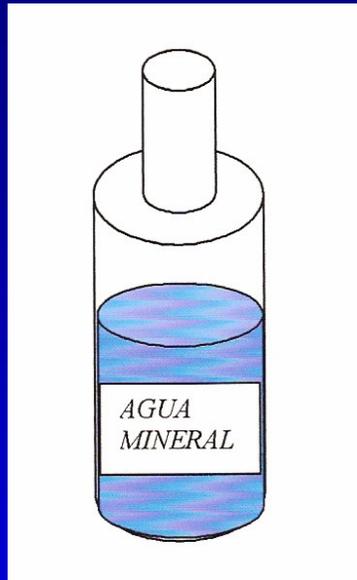
S = Entropía superficial por unidad de área (indica si un estado es alcanzable o no).
(entropía B > entropía A \Rightarrow el estado A puede alcanzar al estado B)

T = Temperatura absoluta.

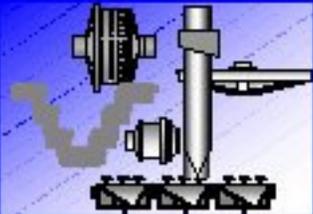
H = Entalpía es una función de estado e indica la cantidad de energía libre que se puede intercambiar con el ambiente, por ejemplo el calor absorbido o generado en una reacción química.



Flotación



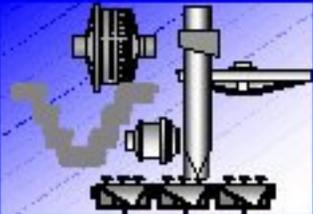
***¿SI AGITO AMBAS BOTELLAS QUÉ OCURRE?
¿PORQUÉ?***



Flotación

➤ **Termodinámica de Interfases**

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



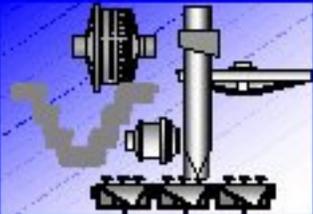
Flotación

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 cm^2 . La tensión superficial entonces es numéricamente igual a la energía libre de Gibbs por unidad de área y se puede expresar como sigue:

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

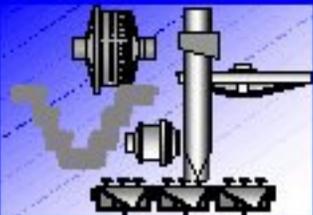
unidades: (dinas/cm), (ergs/cm²)



Flotación

Valores de Tensión Superficial (γ)

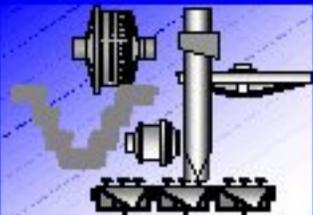
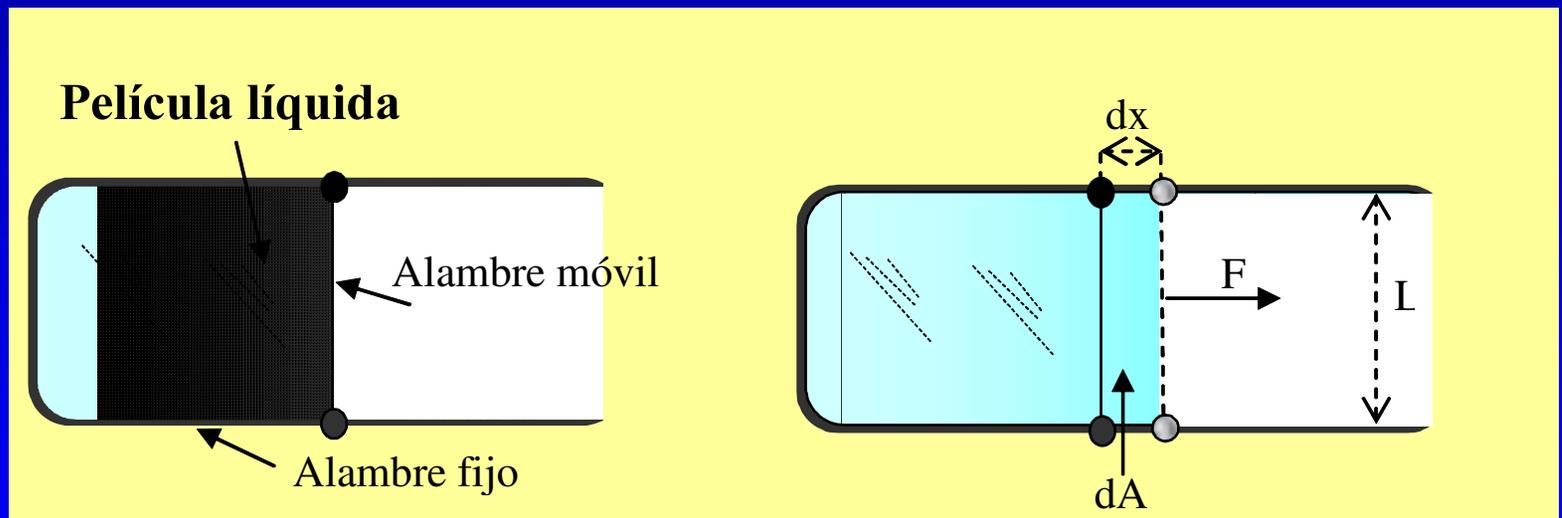
Material	Product	Surface tension (dynes/cm)	Temp. (deg. C)	Ref.
Blood		55.5-61.2		<u>85</u>
Mercury		483.5	25	<u>49</u>
Polymers				
Polyetherurethane	Pellethane 80A	24.0		<u>170</u>
	Pellethane 55D	24.8		<u>170</u>
	Pellethane 75D	32.3		<u>170</u>
Polyetherurethane urea	Biomer	33.9		<u>170</u>
Porcelain	Ceramco Undercoat A	366	1038	<u>47</u>
Saliva		53	37	<u>48</u>
Water		72.3	25	<u>50</u>



Flotación

Tensión Superficial, “ γ ”:

Ilustración del concepto



Concentración de Minerales

Flotación

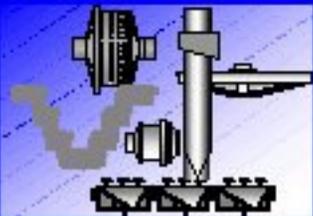
Para aumentar el área de la película de líquido en dA , debe realizarse una cantidad proporcional de trabajo. La energía de Gibbs de la película aumenta en γdA . El aumento en la energía de Gibbs implica que al movimiento del alambre móvil se opone una fuerza F . Si el alambre se mueve una distancia 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:

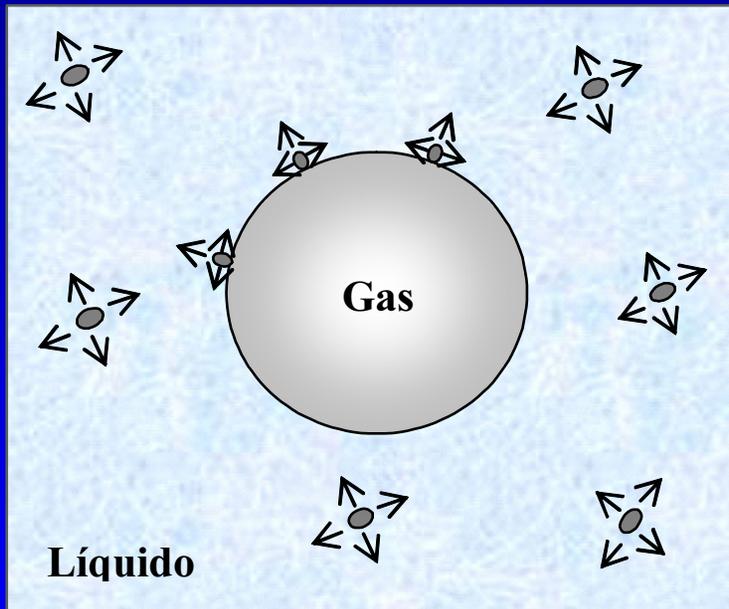
$$\gamma = \frac{F}{2L}$$

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

En una burbuja inmersa en un líquido, cada átomo o molécula en el interior de una fase tiene uniones semejantes con sus vecinos. En la interfase faltan aproximadamente la mitad de las uniones, lo que genera una fuerza resultante dirigida hacia el interior del gas y una cantidad de energía libre cuya magnitud se mide por la tensión superficial.

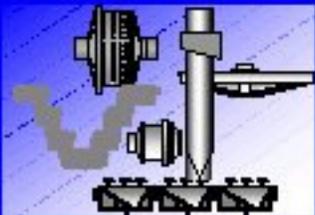


Un análisis del equilibrio de presiones en ambos lados de la interfase líquido – gas, permite determinar que la presión interna en una burbuja (P_B) es:



$$P_B = P_A + \rho g h + 4 \frac{\gamma}{r}$$

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

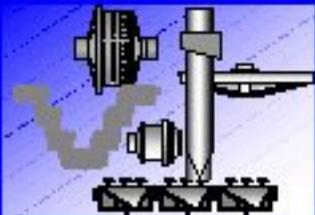


Flotación

Cuando se trata de la superficie de sólidos, es más apropiado referirse en términos 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.

➤ Fenómenos de Adsorción

Se denomina **Adsorción** al fenómeno de acumulación de materia en una interfase, en modo tal que su concentración sea mayor o menor que aquellas de las fases que forman la interfase. Cuando la concentración es mayor en la interfase se dice que la adsorción es positiva y es negativa en el caso contrario.



Flotación

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

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

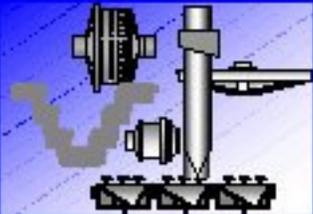
Γ_i = Adsorción relativa del componente i (densidad de adsorción).

C_i = Concentración del componente i

T = Temperatura absoluta

R = Constante de los gases

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

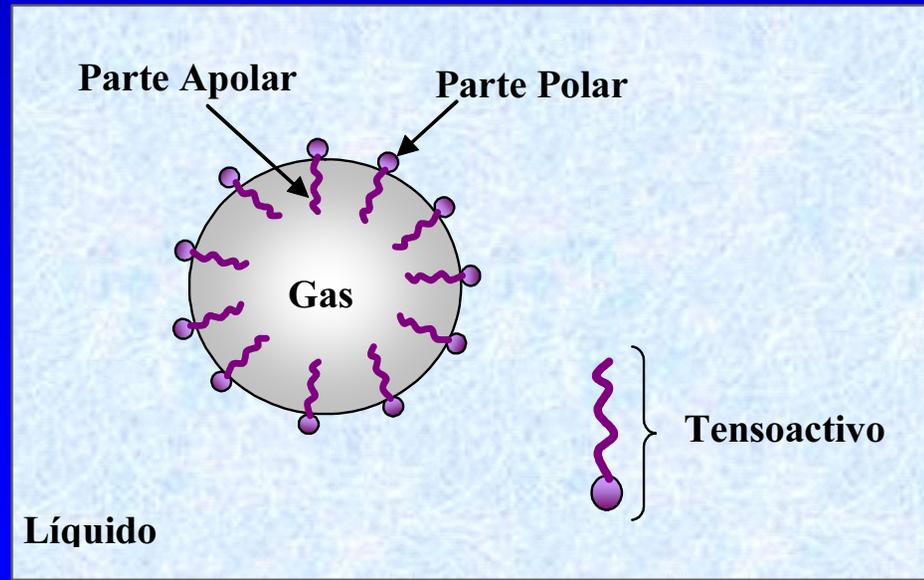
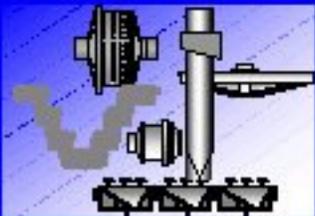


Flotación

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* se llaman **Tensoactivos** y hacen reducir la tensión superficial. Los reactivos llamados **espumantes**, generalmente alcoholes, cumplen con este rol.

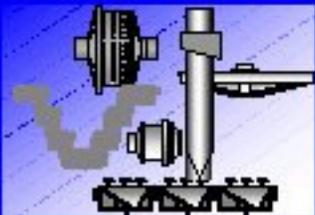
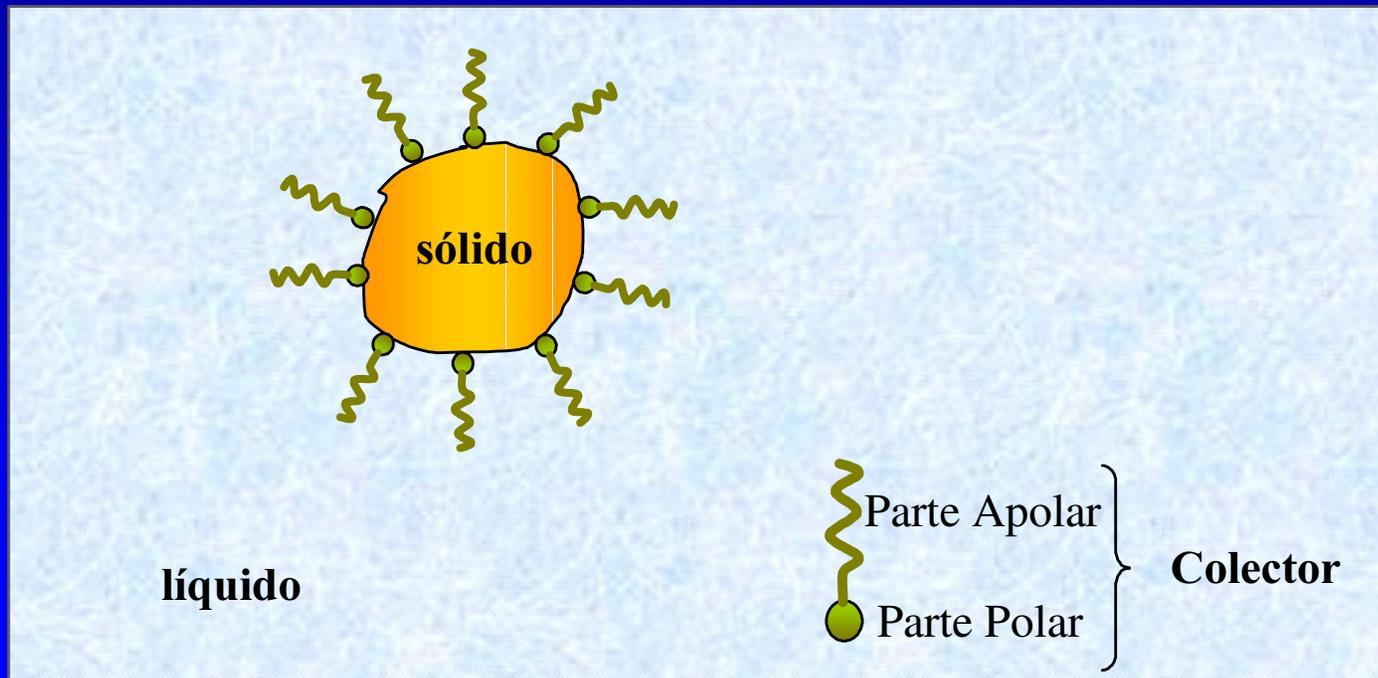


Concentración de Minerales

Flotación

Interfase Sólido – Líquido, S-L

Los compuestos que se adsorben en la superficie de los minerales se llaman colectores. Estos producen el fenómeno de hidrofobización artificial de los minerales y en general, el cambio de sus propiedades de mojabilidad.



Flotación

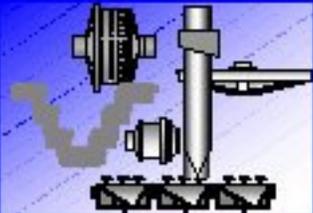
Tipos de Adsorción:

- **Física**

Adsorción de iones de signo contrario (contraiones) por atracción electrostática sin producir cambio químico.

- **Química**

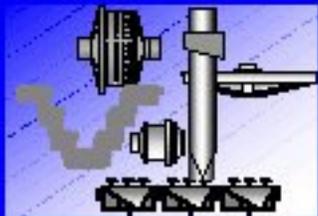
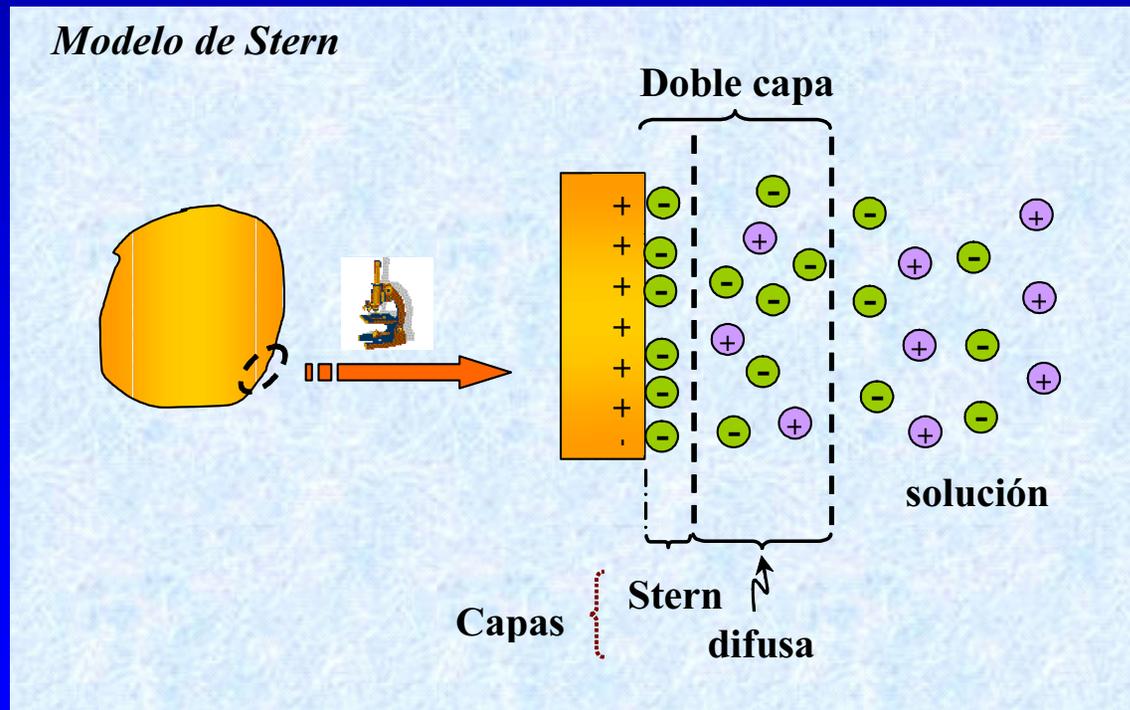
Los compuestos adsorbidos pierden su individualidad química y forman nuevos compuestos superficiales. Se distinguen por el intercambio de iones y formación de compuestos insolubles.



Flotación

❖ 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

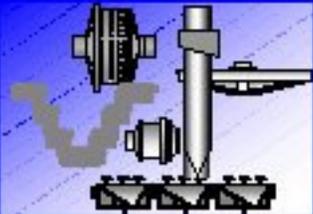
Aquellos iones que son quimioadsorbidos sobre la superficie del mineral establecen la carga superficial y son llamados *iones determinantes del potencial*. Estos pueden ser iones del mineral, iones hidrógeno (H⁺) o hidroxilo (OH⁻), iones colectores que forman sales insolubles con iones en la superficie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



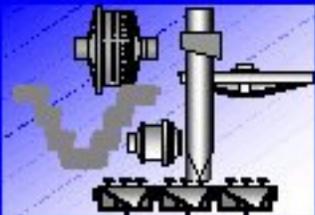
Flotación

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, 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**, “ 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

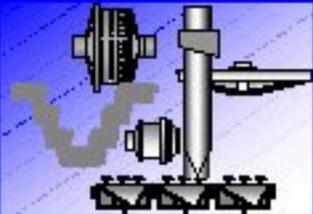
El potencial superficial se puede expresar como:

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

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:

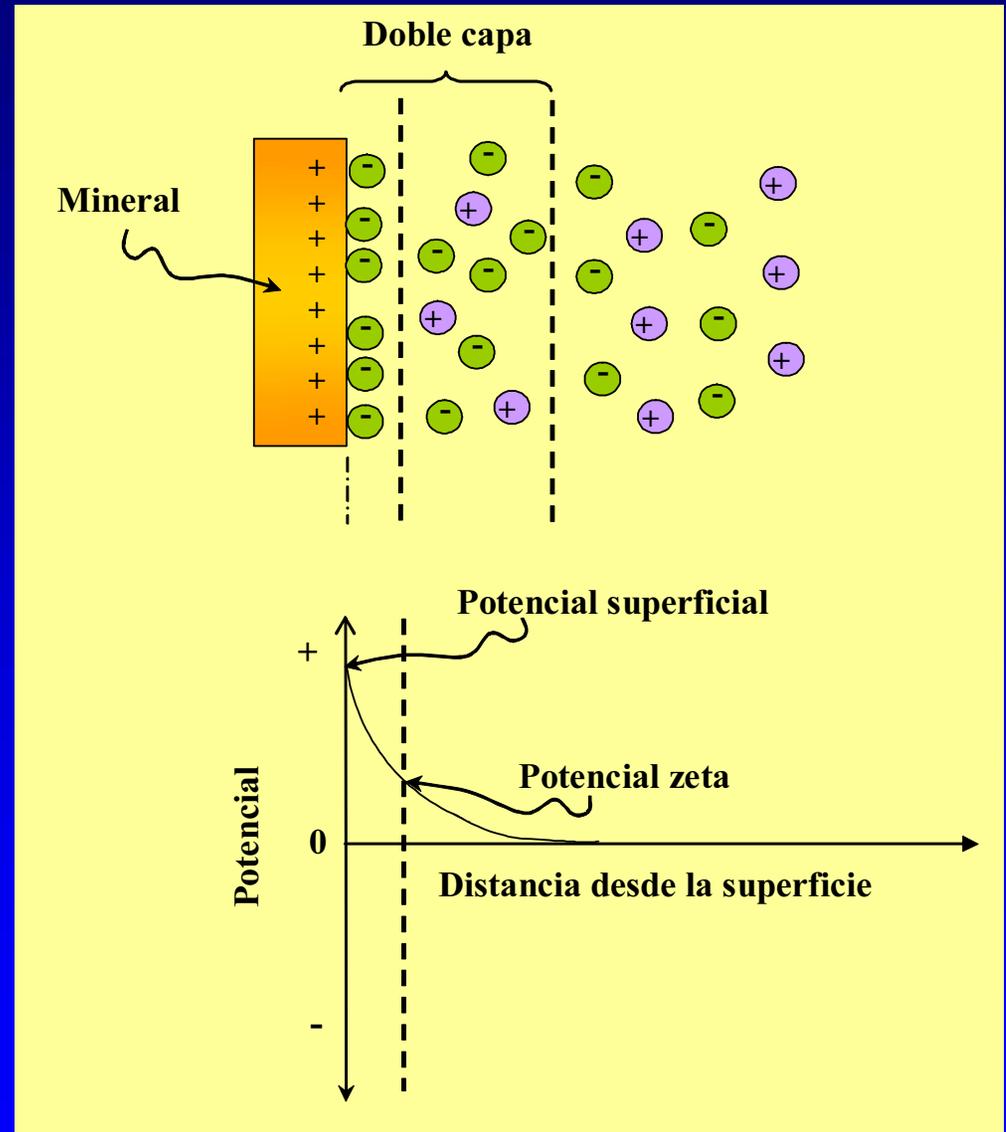
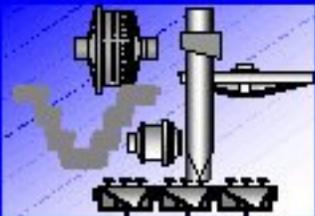
$$E = \frac{1,98(\text{cal / }^\circ\text{K mol}) 298(^\circ\text{K})}{1(\text{equiv / mol}) 23.060(\text{cal / volt - equiv})} \ln \frac{10^{-7}}{10^{-1,8}} = -0,31 \text{ volt}$$



Flotación

➤ *Potencial Electrocinético o Potencial Zeta, ξ*

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, “ ξ ”**.



Concentración de Minerales

Flotación

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

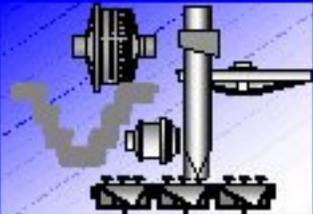
$$\xi = \frac{4 \pi \eta V}{D E} \quad [\text{milivolts}]$$

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.

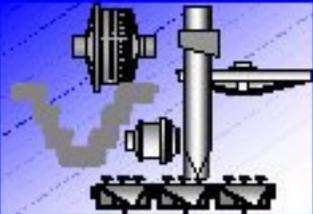
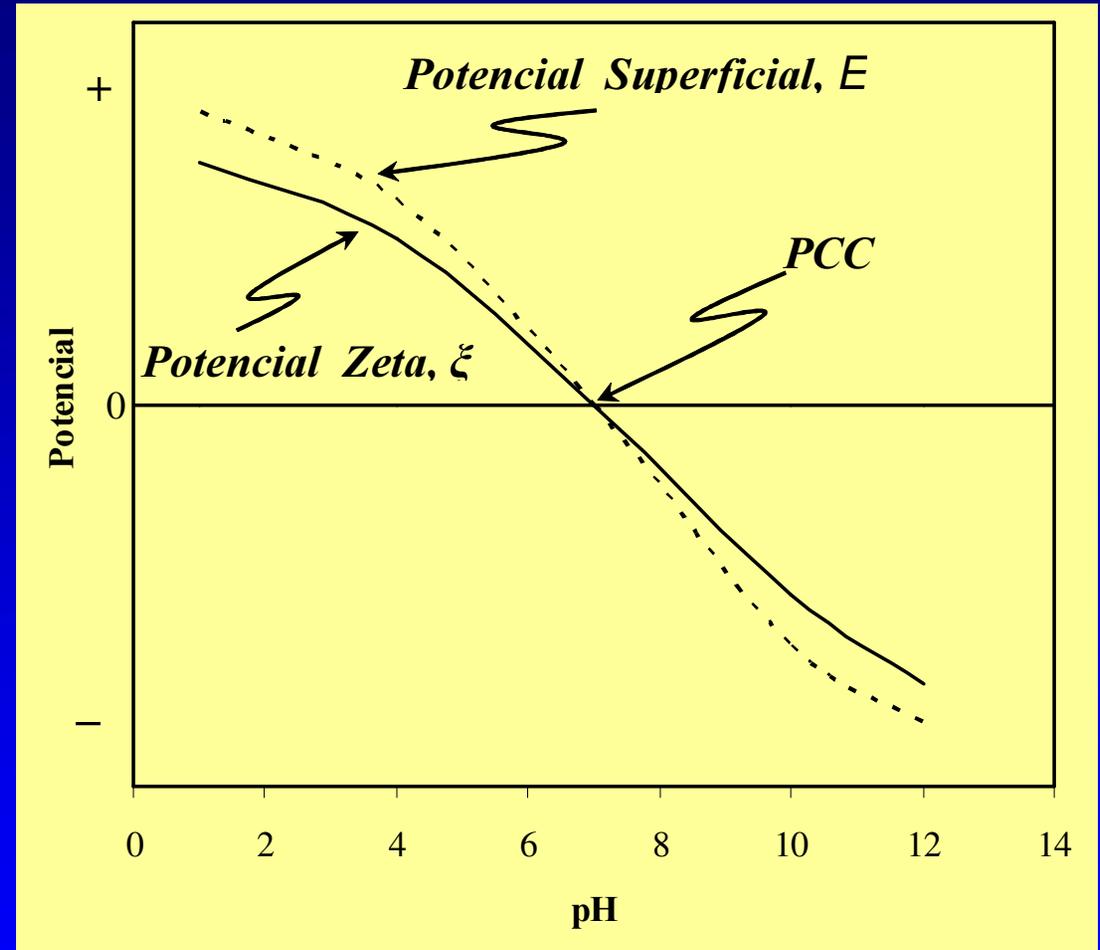


Flotación

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).

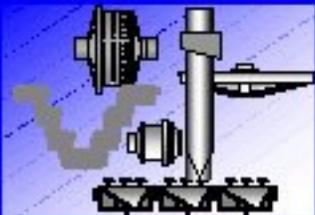
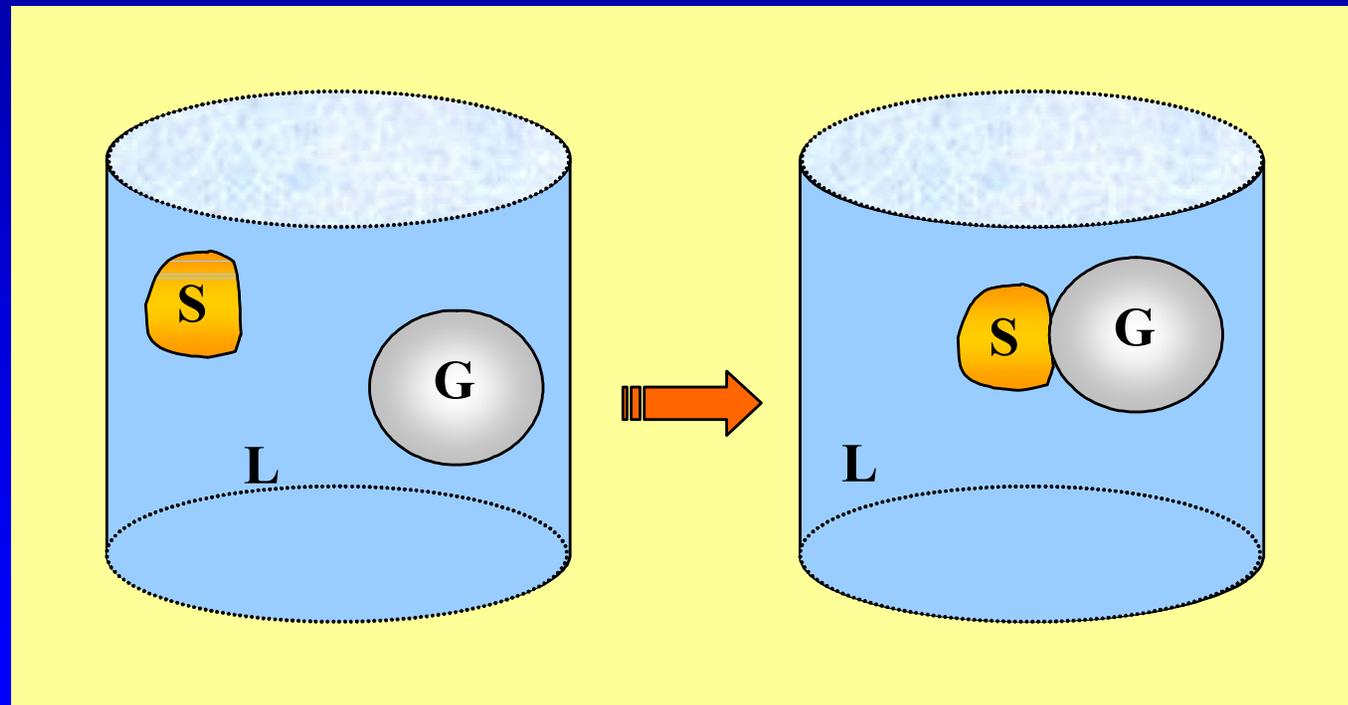
En los óxidos y silicatos estos puntos son iguales.



Flotación

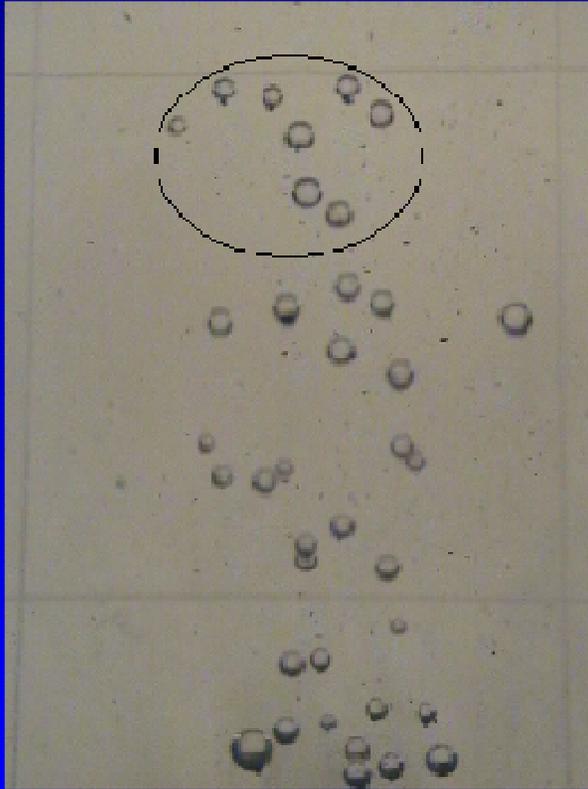
❖ Contacto entre las tres fases (S – L – G)

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

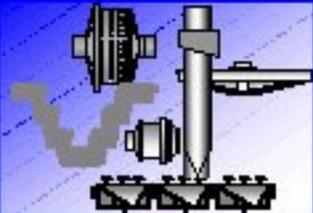
❖ Burbujas ascendiendo (cámara de visualización)



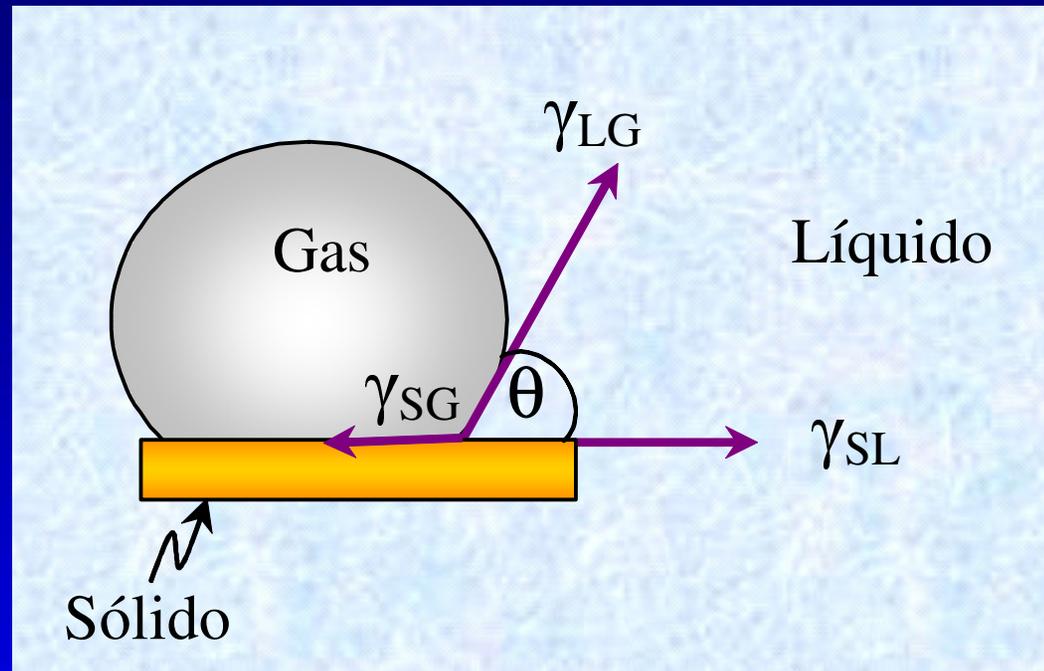
Muestreador



Concentración de Minerales

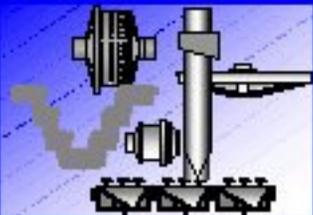


Flotación



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

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



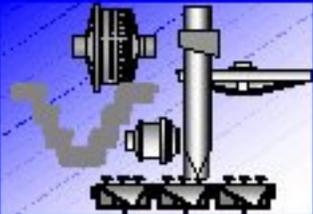
Flotación

El cambio de energía libre por unidad de área correspondiente al proceso de unión (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 :

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



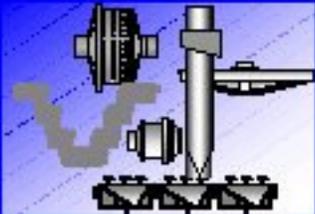
Flotación

➤ Ángulo de Contacto θ

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

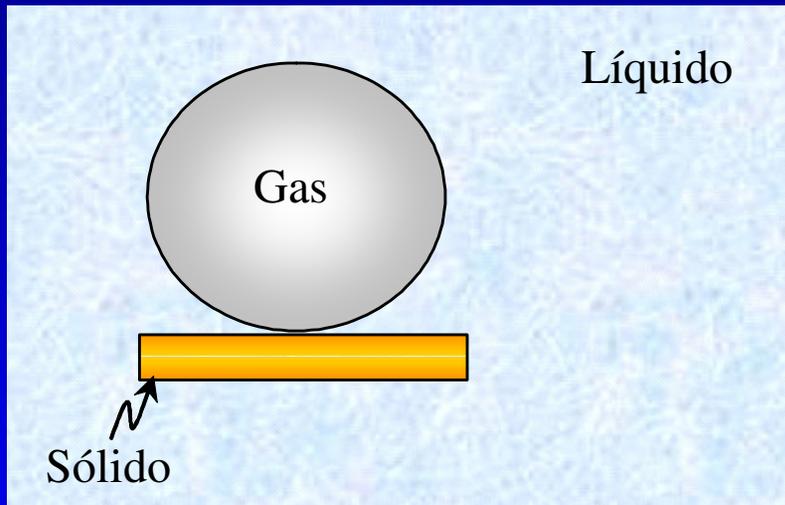
Si el sólido es hidrofóbico, ya sea en forma natural o por la adsorción de un colector en su superficie, la película de líquido retrocede hasta una posición en la que las tres tensiones superficiales se encuentren en equilibrio. El ángulo que se genera entre las tensiones interfasiales γ_{LG} y γ_{SL}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

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

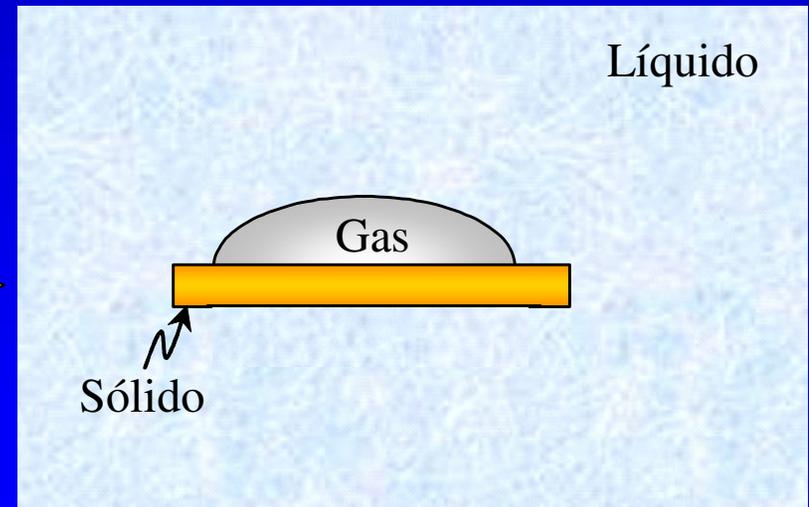


Flotación

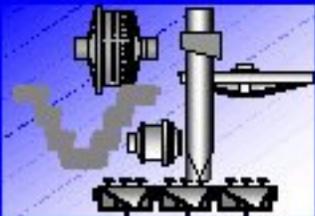
Cuando no hay contacto entre las tres fases, θ es cero y, por el contrario, cuando es máxima la afinidad, θ es 180° .



$\theta = 0^\circ \Rightarrow$ afinidad nula



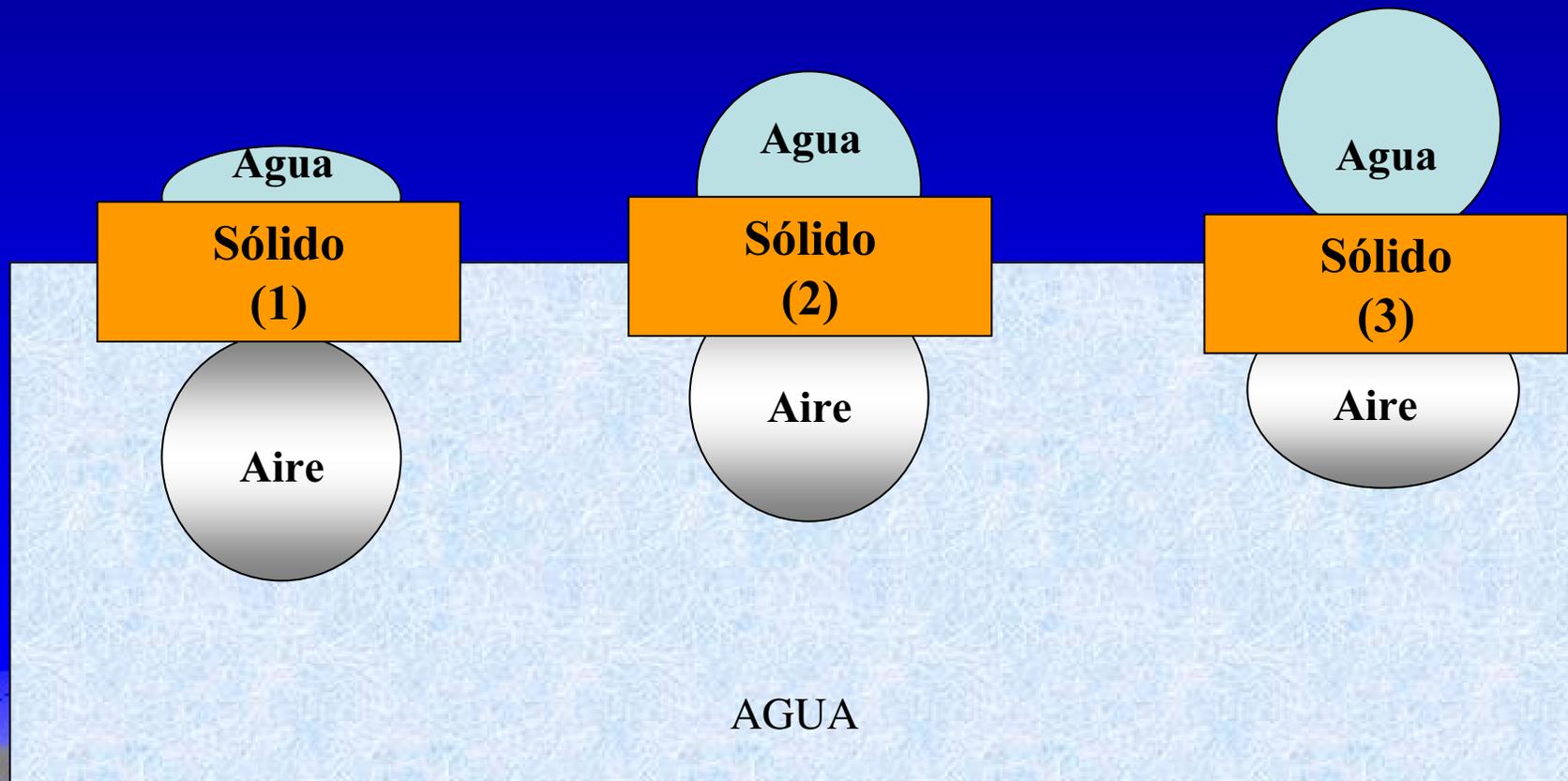
$\theta = 180^\circ \Rightarrow$ máxima afinidad



Concentración de Minerales

Ejercicio MI 52E

- ❖ Determinar las propiedades de los sólidos (1), (2), (3)
- ❖ Dibuje el ángulo de contacto



Flotación

ΔG También puede ser como:

$$\Delta G = W_A - W_C$$

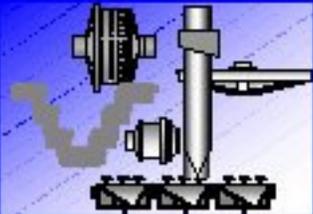
Donde:

W_A = Trabajo de Adhesión = Trabajo requerido para remover líquido de la superficie del sólido.

$$W_A = W_{\text{Ionización}} + W_{\text{Enlace de Hidrógeno}} + W_{\text{Dispersión}}$$

Ejm. Sílice:

$$\begin{aligned} W_I + W_{EH} &= 368 \text{ erg/cm}^2 \\ W_D &= 102 \text{ erg/cm}^2 \end{aligned}$$



Flotación

W_C = Trabajo de Cohesión = Trabajo requerido para crear una nueva superficie en la interfase Líquido – Gas.

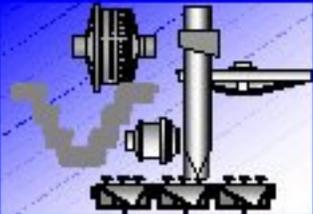
$$W_C = 2 \gamma_{LG} = 146 \text{ erg/cm}^2$$

En general :

$W_A > W_C \Rightarrow$ Los Sólidos son mojados por el agua $\Delta G > 0$

Si se agrega colector $W_A \downarrow \Rightarrow \Delta G < 0$

Los sólidos no serían mojados, equilibrio entre las tres fases.

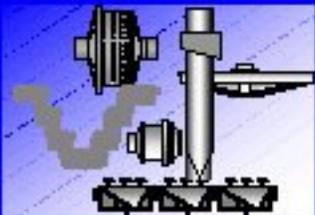


Flotación

❖ **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.

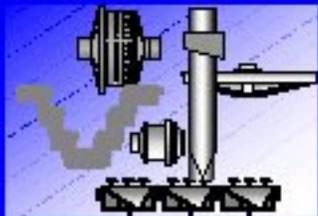
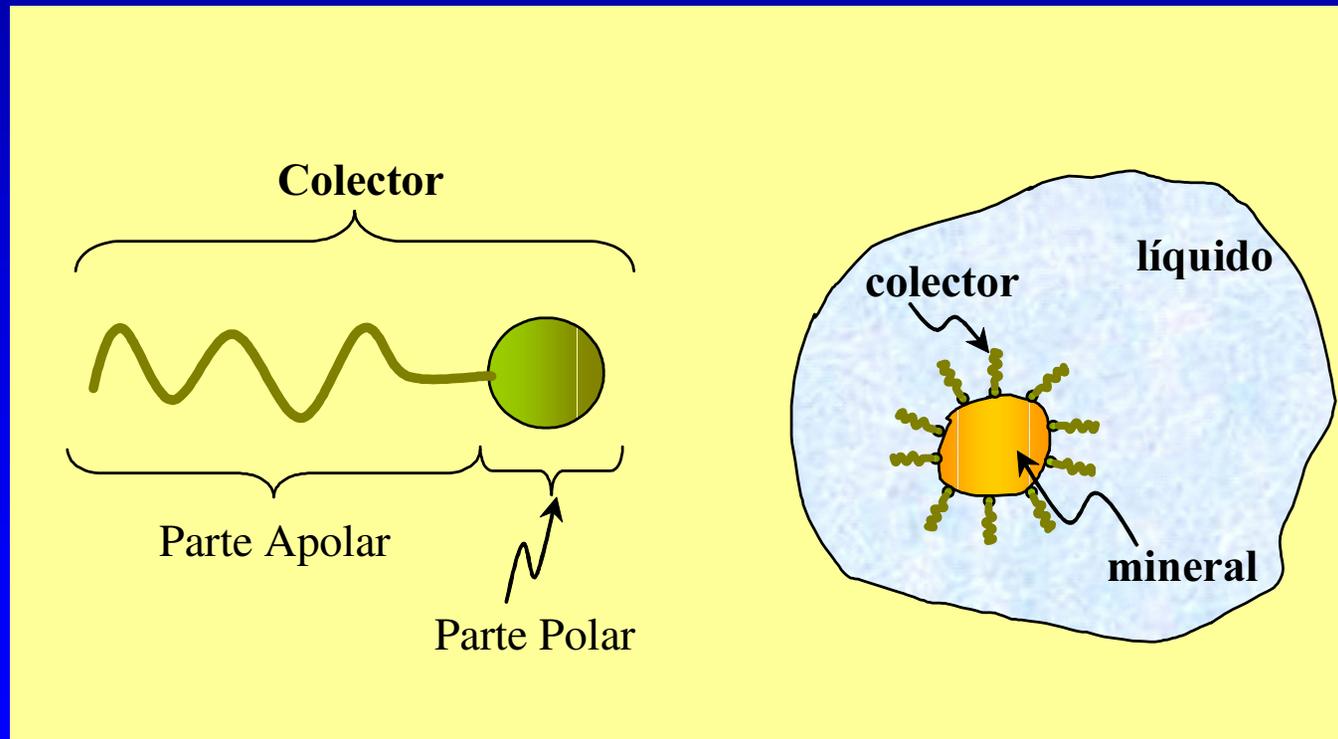
Pocos minerales son hidrofóbicos por naturaleza, tales como la molibdenita, y es posible su flotación sin el uso de colectores, aunque es práctica común ayudarse con colectores suplementarios. Otros minerales se pueden tornar hidrofóbicos sin el uso de colectores, ya que, por ejemplo, la adición de grandes concentraciones de sulfuro de sodio a minerales sulfurados puede generar superficies hidrofóbicas (al reemplazar productos de oxidación e hidratación superficiales) posibilitando su flotación.



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.



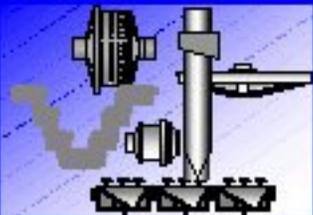
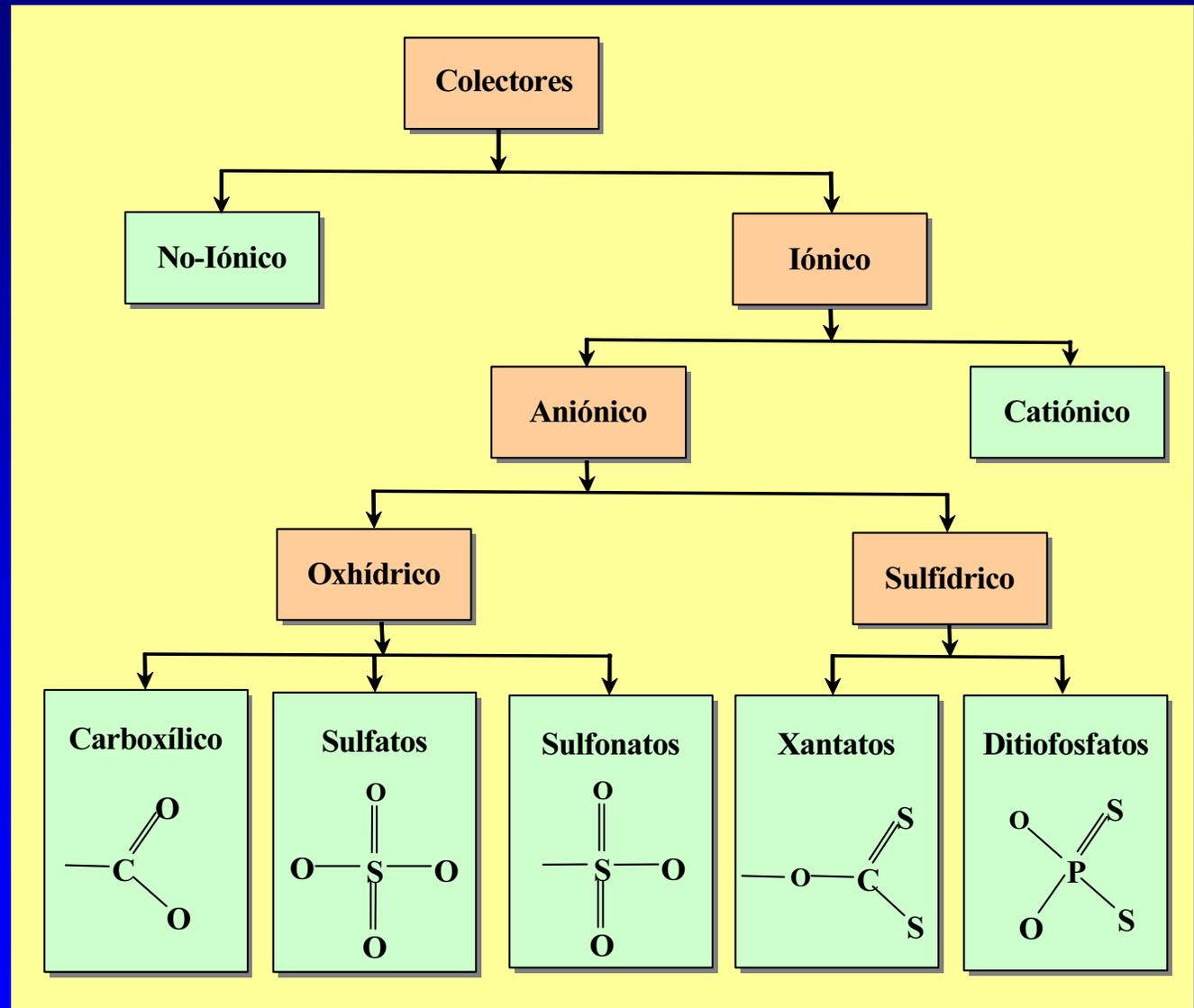
Concentración de Minerales

Flotación

Clasificación de los Colectores

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

♣ Existen también colectores no polares (no ionizados).



(Glembotskii)

Concentración de Minerales

Flotación

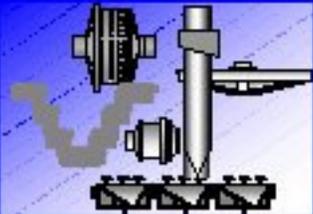
- **Colectores Iónicos**

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

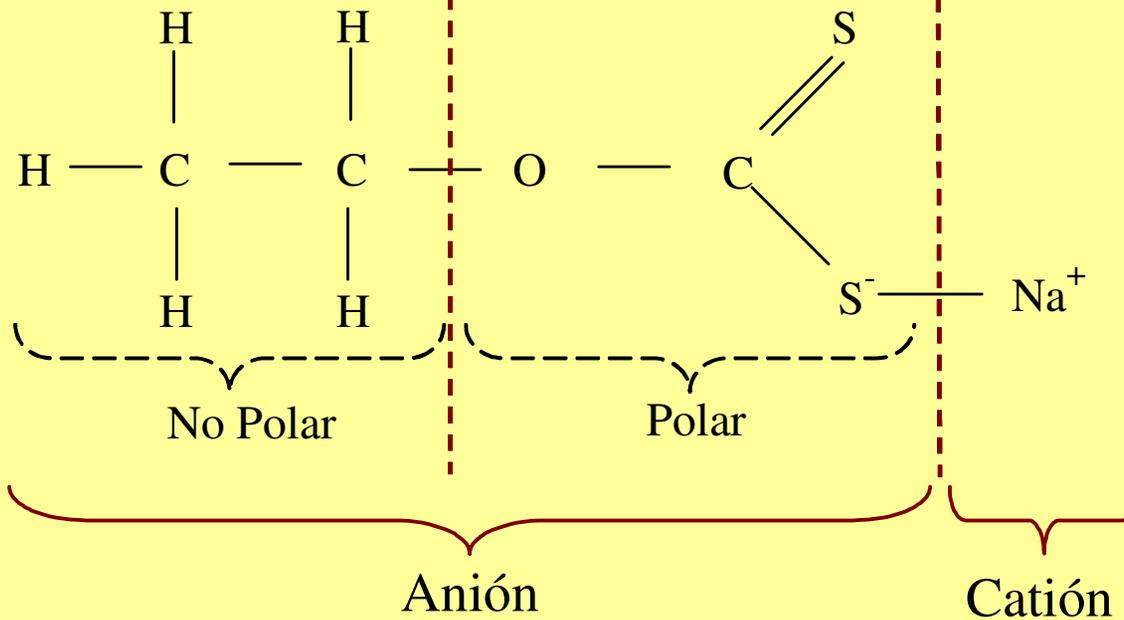
Si al disociarse un colector en agua, su parte principal es un anión o un catión, se distingue dos grupos de colectores: **Colectores Aniónicos** y **Colectores Catiónicos**.

Colectores Aniónicos (constituyen la mayoría)

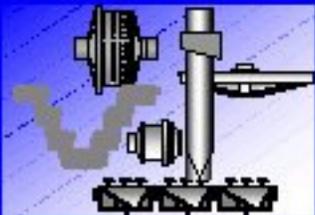
Estos colectores se disocian de modo que sus radicales junto con el grupo polar constituyen un anión (-), dejando en la solución un catión que puede ser sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^+) o el mismo hidrógeno.



Flotación



Estructura del etil xantato de sodio

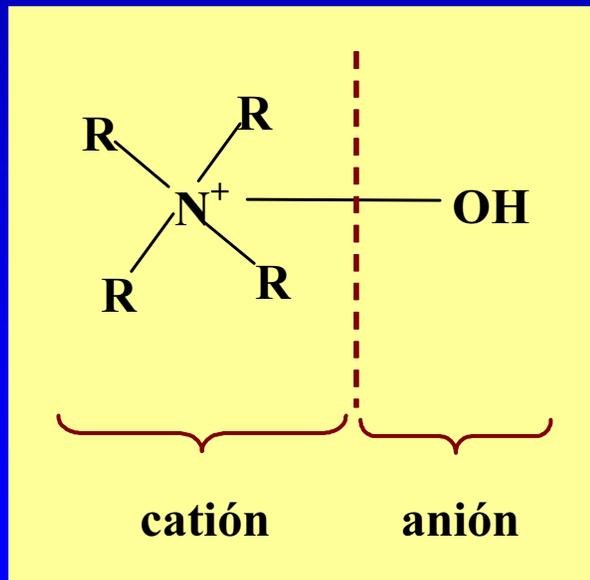


Flotación

Colectores Catiónicos

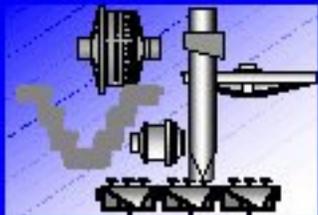
Aminas y sales cuaternarias de amonio. Derivados del amoníaco, con hidrógenos reemplazados por radicales. Según el número de reemplazos se tiene aminas I, II y III. Las cuaternarias (IV). se obtienen al actuar cloruros sobre aminas terciarias.

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..

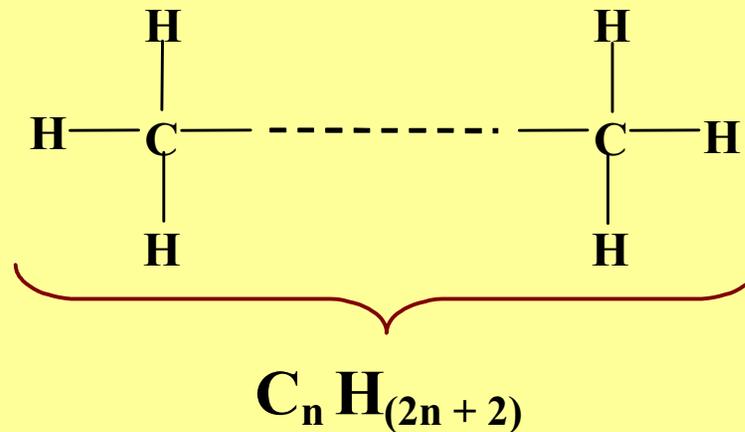


Flotación

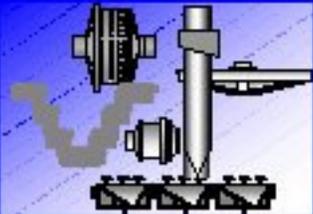
- **Colectores No Iónicos**

No poseen grupos polares. Hidrocarburos saturados o no saturados, fuel oil, kerosén, aceite de transformadores. Tornan al mineral repelente al agua al cubrir su superficie con una fina película.

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



Diesel : $n = 15 - 19 \text{ C}$



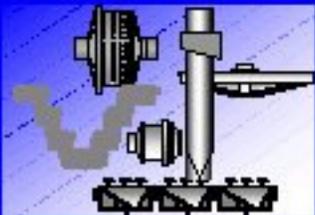
Flotación

- **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.

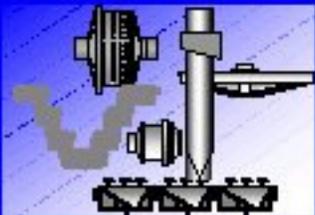
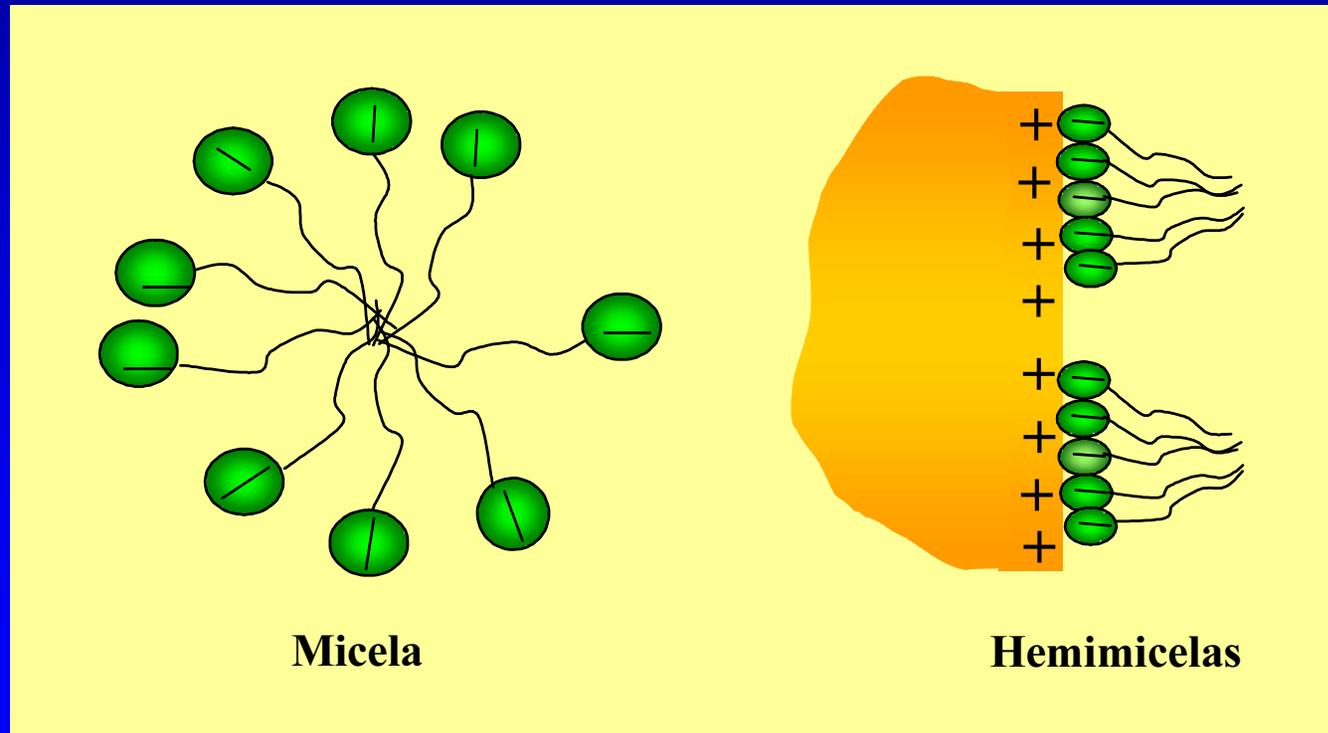
Las micelas son agregados de iones colectores de tamaño coloidal que se forman por uniones de van der Waal entre las cadenas de hidrocarbones del colector. Se forman debido a que las cadenas de hidrocarbones son no iónicas y existe incompatibilidad entre las moléculas polares del agua y las cadenas de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

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



Flotación

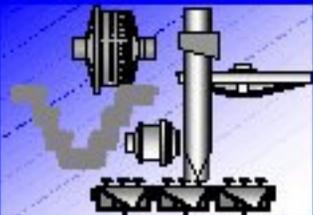
En estas condiciones las **micelas** van fuera de la solución. Cuando este fenómeno ocurre en la superficie del mineral, estos agregados se llaman **hemimicelas** y los iones colectores son adsorbidos bajo estas condiciones. Se evita esto con la presencia de sales inorgánicas o moléculas orgánicas neutras 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:

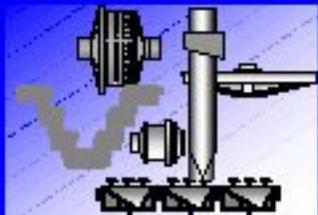
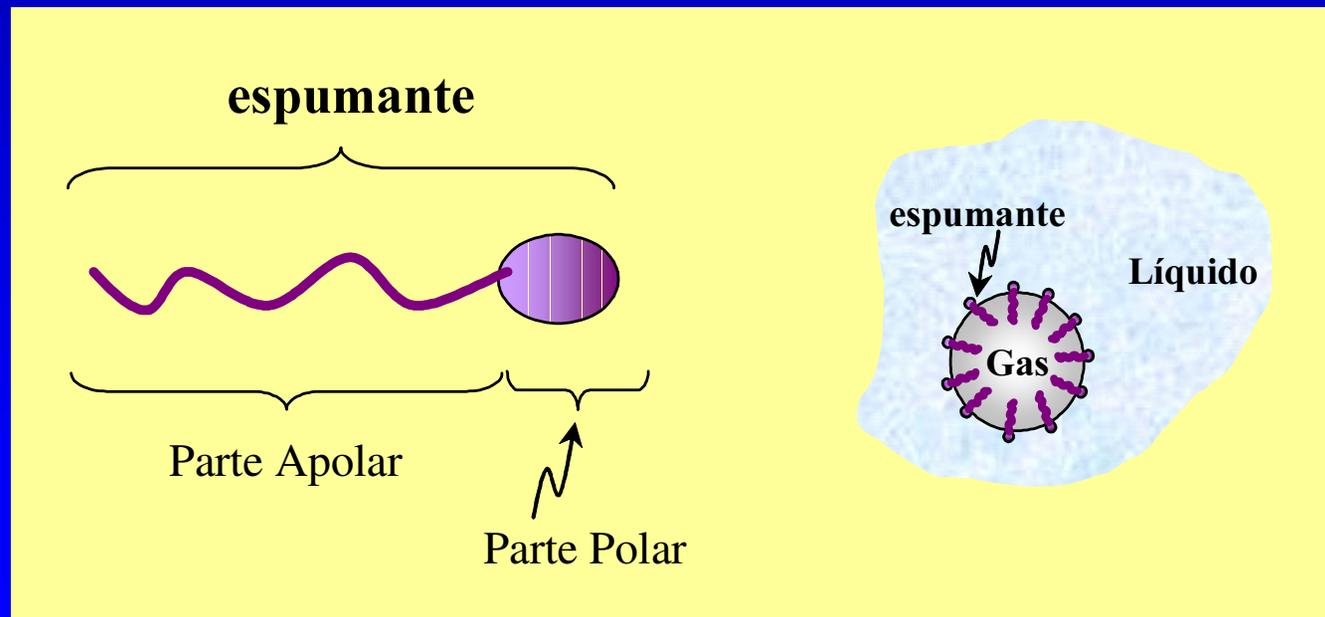
Radical	Nº de carbonos	Ángulo de contacto
Metil	1	50°
Etil	2	60°
Propil	3	68°
Butil	4	74°
Amil	5	80°
Hexil	6	87°
Reptil	7	90°
Octil	8	94°
Cetil	16	96°



Flotación

➤ Espumantes

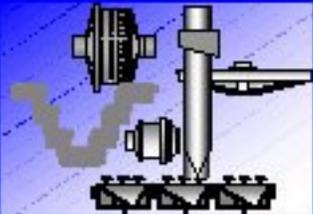
Son reactivos orgánicos de carácter heteropolar. Análogos a los colectores iónicos en su estructura, su diferencia radica en el carácter del grupo polar que en los colectores es activo para reaccionar con la superficie de los minerales, mientras que en los espumantes es un grupo con gran afinidad con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



Flotación

Ácidos, aminos 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)	$\begin{array}{ccccccc} \text{CH}_3 & - & \text{CH} & - & \text{CH}_2 & - & \text{CH} & - & \text{CH}_3 \\ & & & & & & & & \\ & & \text{CH}_3 & & & & \text{OH} & & \end{array}$
Terpinol (aceite de pino) (alcohol aromático)	
Cresol (ácido cresílico) (alcohol aromático)	
Éter glicol polipropinil (éter poliglicólico)	$\text{CH}_3 - (\text{O} - \text{C}_3\text{H}_6)_n - \text{OH}$

Concentración de Minerales

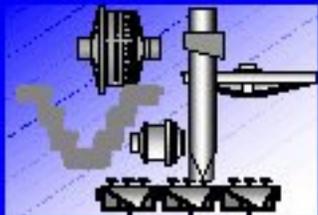
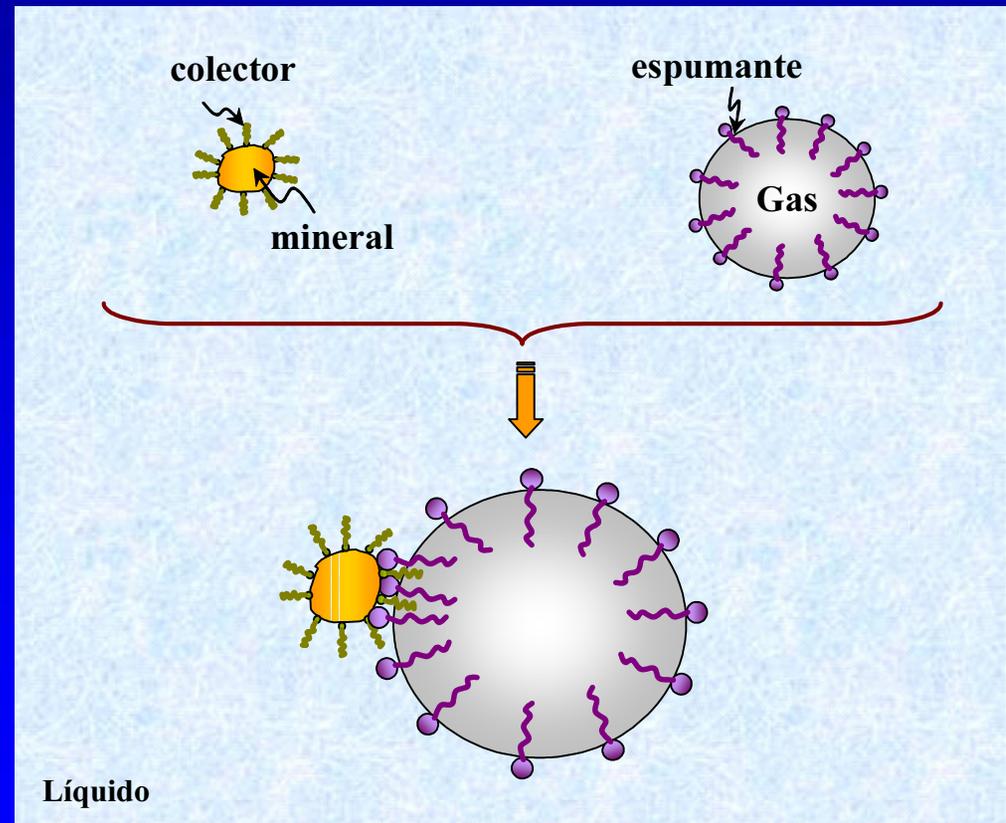
Flotación

➤ Colector y Espumante: Contacto Mineral - Burbuja

Tras el contacto mineral – burbuja, las moléculas de espumante 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} disminuye mucho, y ocurre una situación similar.



Concentración de Minerales

❖ Medición del Potencial Z: **Zetasizer**

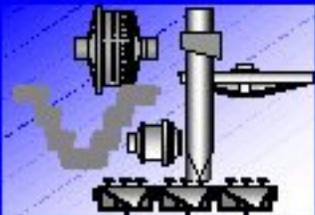
Usa el principio de **Microelectroforesis**. La muestra en estudio se coloca en una célula de electroforesis, al aplicar un campo eléctrico conocido y un haz de luz láser, las partículas se moverán produciendo una luz dispersa. La intensidad de la luz fluctuará con una frecuencia proporcional a la velocidad de las partículas. Se calcula el valor de la velocidad, la cual se utiliza para calcular el potencial Z.

❖ Medición del Ángulo de Contacto: equipos tipo **CAM 100, CAM 200**

Usan un sistema óptico para medir el ángulo, basado en la proyección de la imagen de una gota sobre la superficie pulida del mineral o material en estudio.

❖ Medición de la Tensión Superficial: **Método de Du Nouy (anillo) y método de la placa**

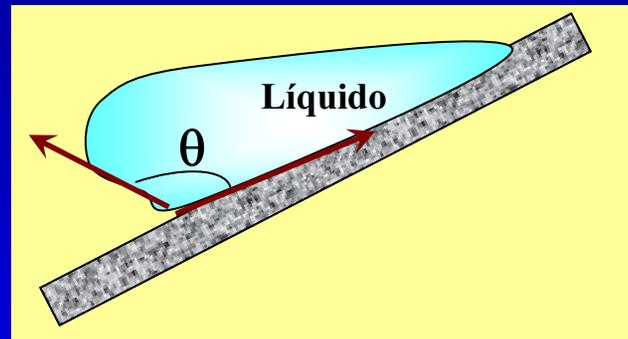
Usa una balanza que mide la fuerza necesaria para desprender en anillo o la placa de la superficie del líquido, el que se encuentra en un recipiente.



Flotación

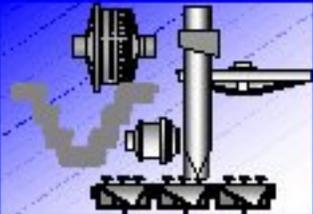
❖ HISTÉRESIS DE MOJABILIDAD

Al colocar una gota de cualquier líquido sobre una superficie inclinada, se producirá el deslizamiento de ésta por efecto de la gravedad.



La gota resistirá el movimiento por lo que se producirá un atraso o simplemente la negativa de la gota a moverse.

“EL ATRASO DEL MOVIMIENTO DE LA GOTA, PRODUCIDO A TRAVÉS DE UN PERÍMETRO TRIFÁSICO DE CONTACTO, SE LLAMA HISTÉRESIS DE MOJABILIDAD”.



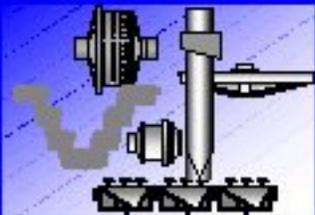
Flotación

❖ *EXPERIMENTO DE HISTÉRESIS DE MOJABILIDAD*

Se agrega una burbuja de aire sobre las superficies A y B, donde:

- A : Galena tratada con un depresor de galena (bicromato de potasio).
- B : Galena tratada con un colector (xantato).

Y luego se retira con una jeringa poco a poco el aire midiendo el ángulo de contacto.



Flotación

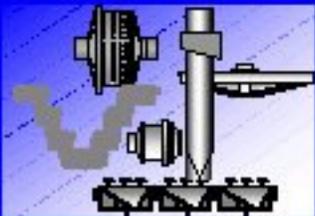
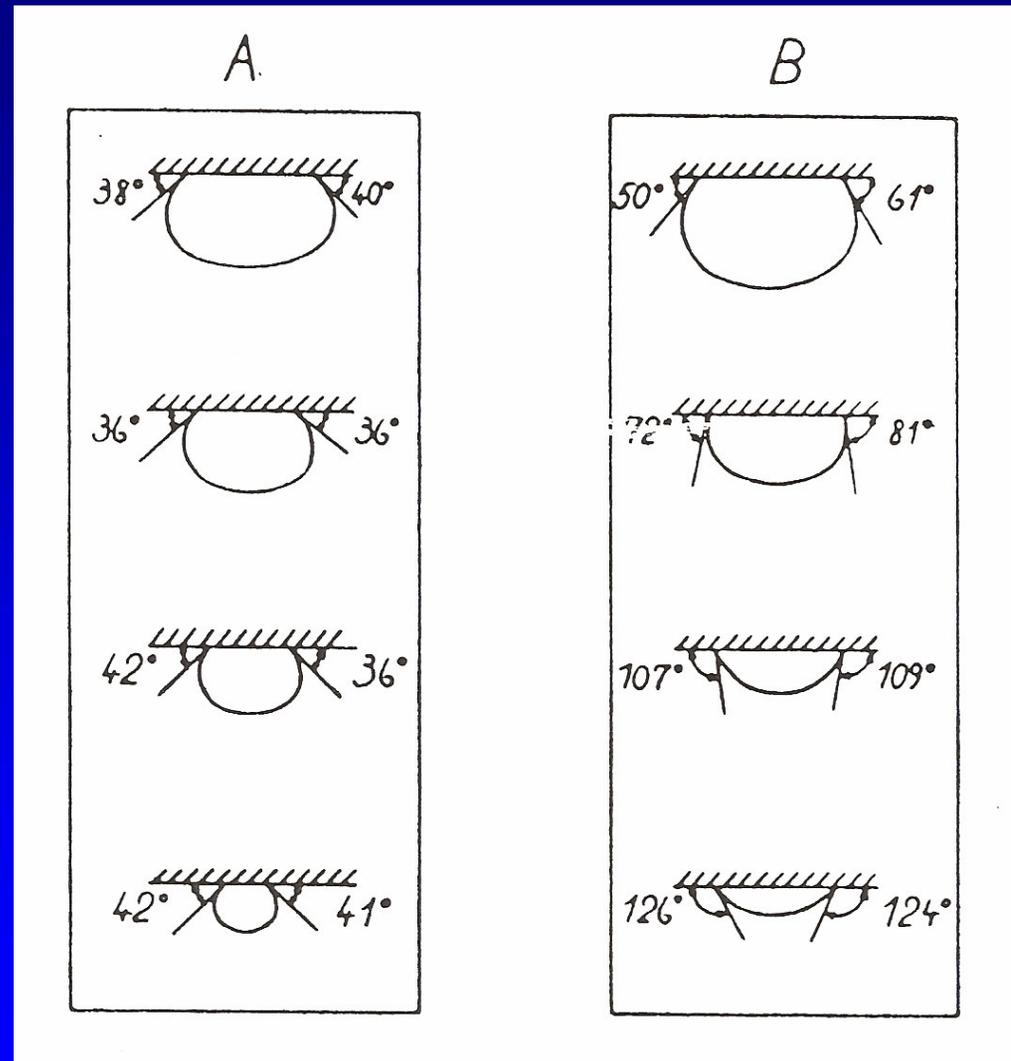
❖ CONCLUSIONES DEL EXPERIMENTO DE HISTÉRESIS DE MOJABILIDAD

• Superficie A:

Prácticamente no hay histéresis y el ángulo de contacto prácticamente se mantiene.

• Superficie B:

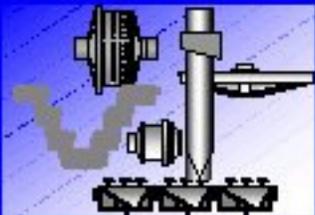
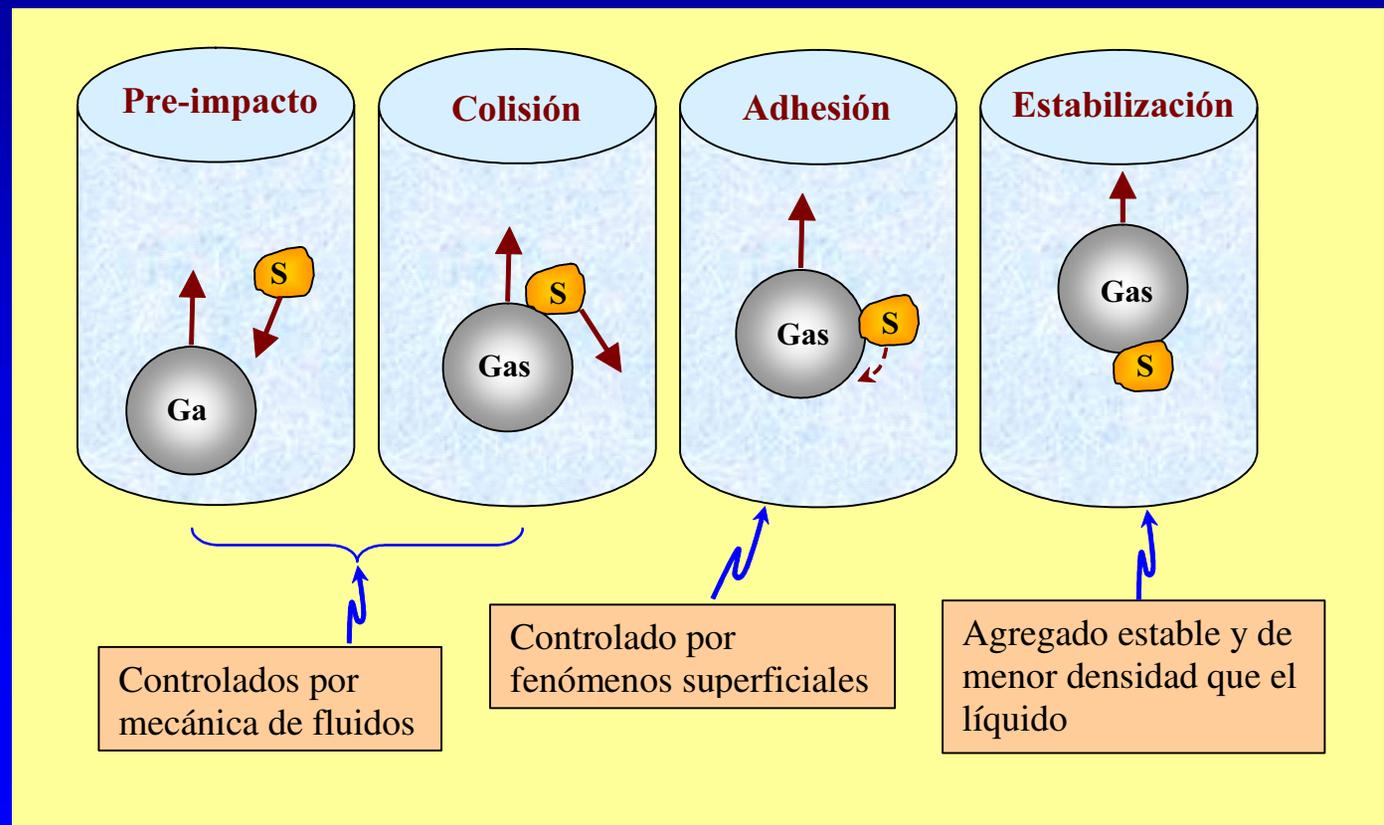
Hay histéresis y el ángulo de contacto aumenta.



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

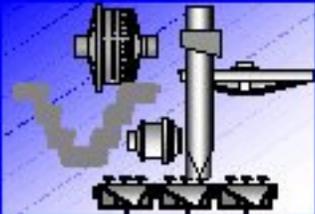
➤ Colisión o Impacto

Está controlada por fenómenos hidrodinámicos y variables 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. N° de Stokes (razón entre las fuerzas inerciales y las de arrastre)

$$Stk = \frac{1}{9} \left[\frac{r}{R} \right]^2 Re \frac{\rho_S}{\rho_L}$$



- ≈ **Arrastre Hidrodinámico:** turbulencia.

Concentración de Minerales

Flotación

- Probabilidad de Colisión, P_C

Depende del régimen de flujos. Para el caso turbulento (de alta agitación), se puede demostrar que:

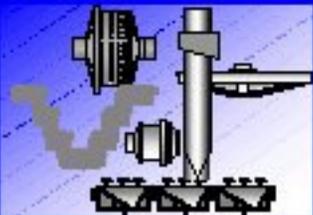
$$\left(\frac{d}{d_B}\right) = \left(\frac{3 d_P}{d_B}\right)^{1/2}$$

y

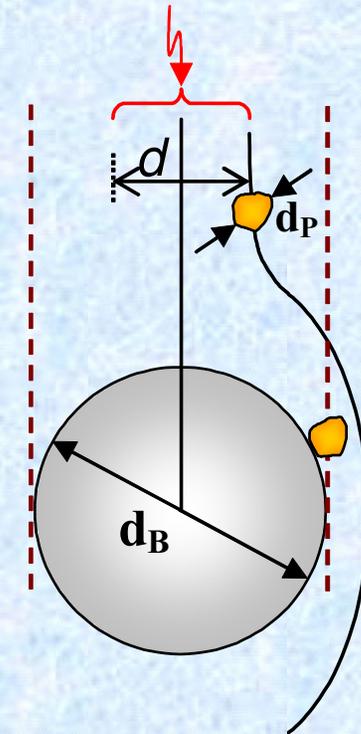
$$P_C = \left(\frac{d}{d_B}\right)^2$$

Por lo tanto,

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



Potenciales candidatas a impactar



Concentración de Minerales

Flotación

- En forma general la Probabilidad de Colisión se expresa como:

$$P_C = A \left[\frac{D_P}{D_B} \right]^N$$

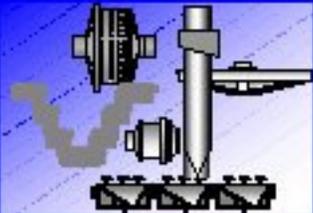
Donde A y B dependen del tipo de flujo

- Probabilidad de colisión

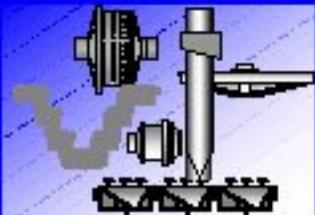
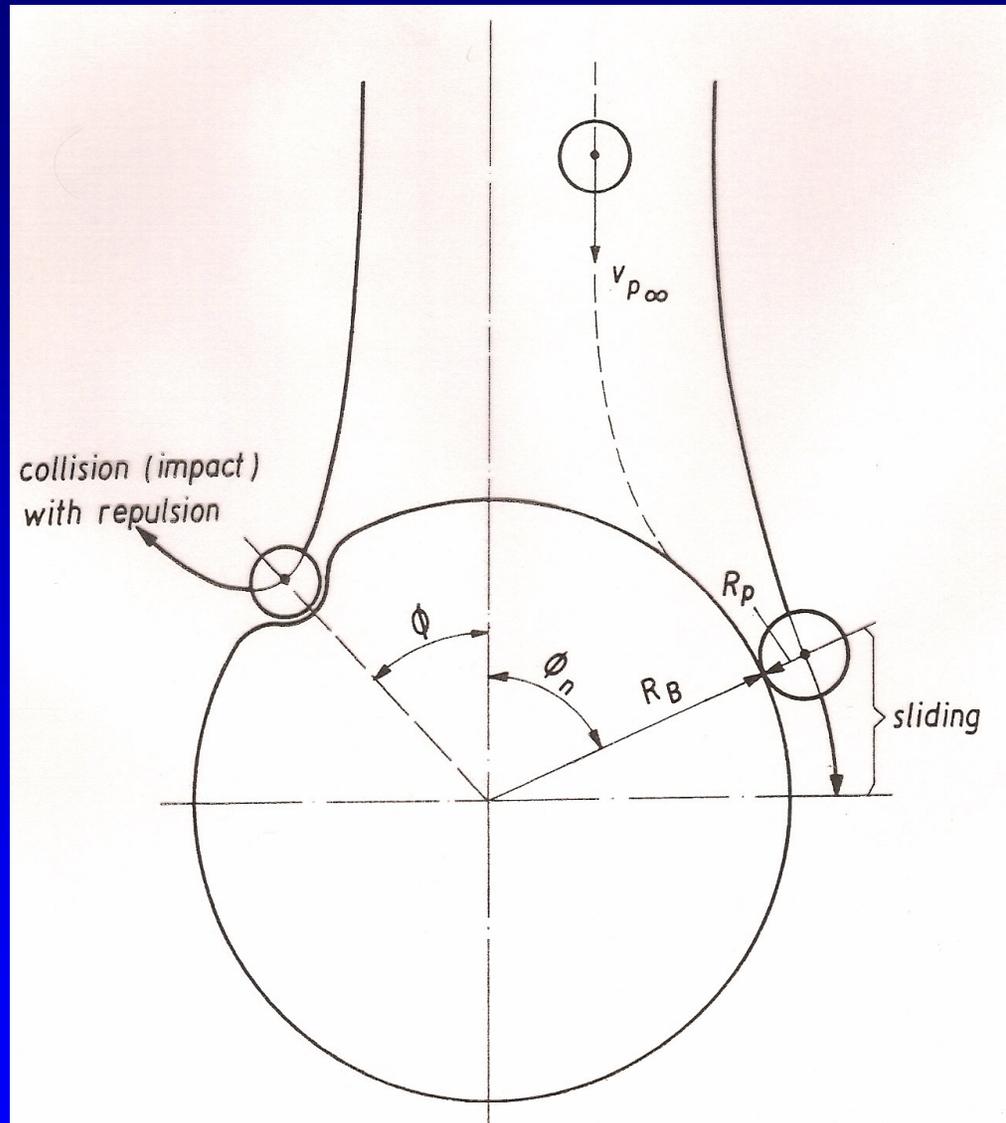
$P_c = f(\text{velocidad de sedimentación, Reynolds, Stk, } r/R)$

- Eficiencia de Colisión

$E_c = (\text{N}^\circ \text{ de partículas que impactan una burbuja}) / (\text{N}^\circ \text{ de partículas que tendrían posibilidad de impactar una burbuja})$



Flotación



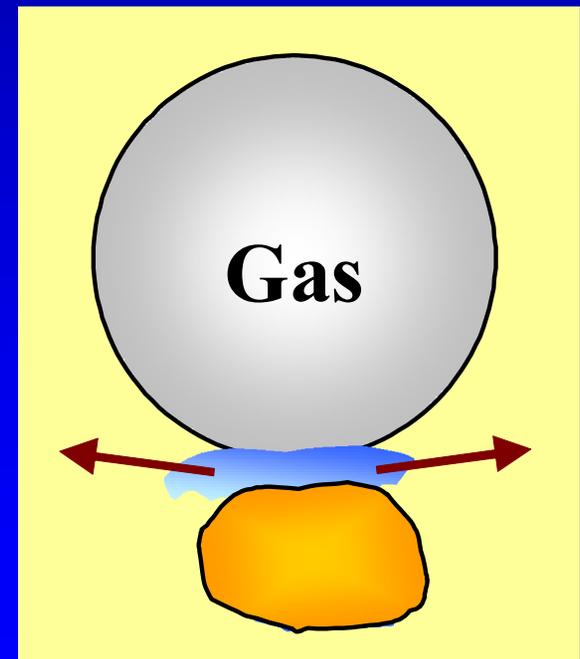
Flotación

➤ Adhesión

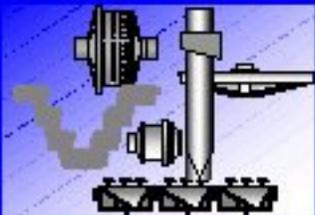
La termodinámica señala la tendencia, pero la adhesión depende además fuertemente de las condiciones cinéticas que participan en el proceso.

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.



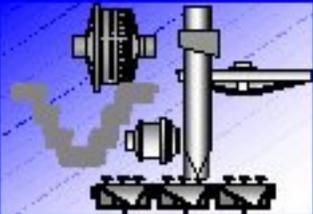
Concentración de Minerales



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:

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

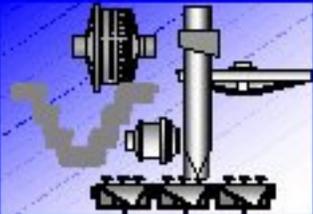
K = constante de Boltzman

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

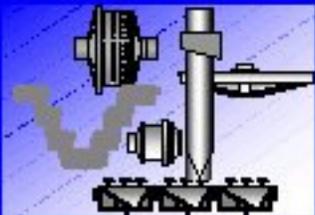
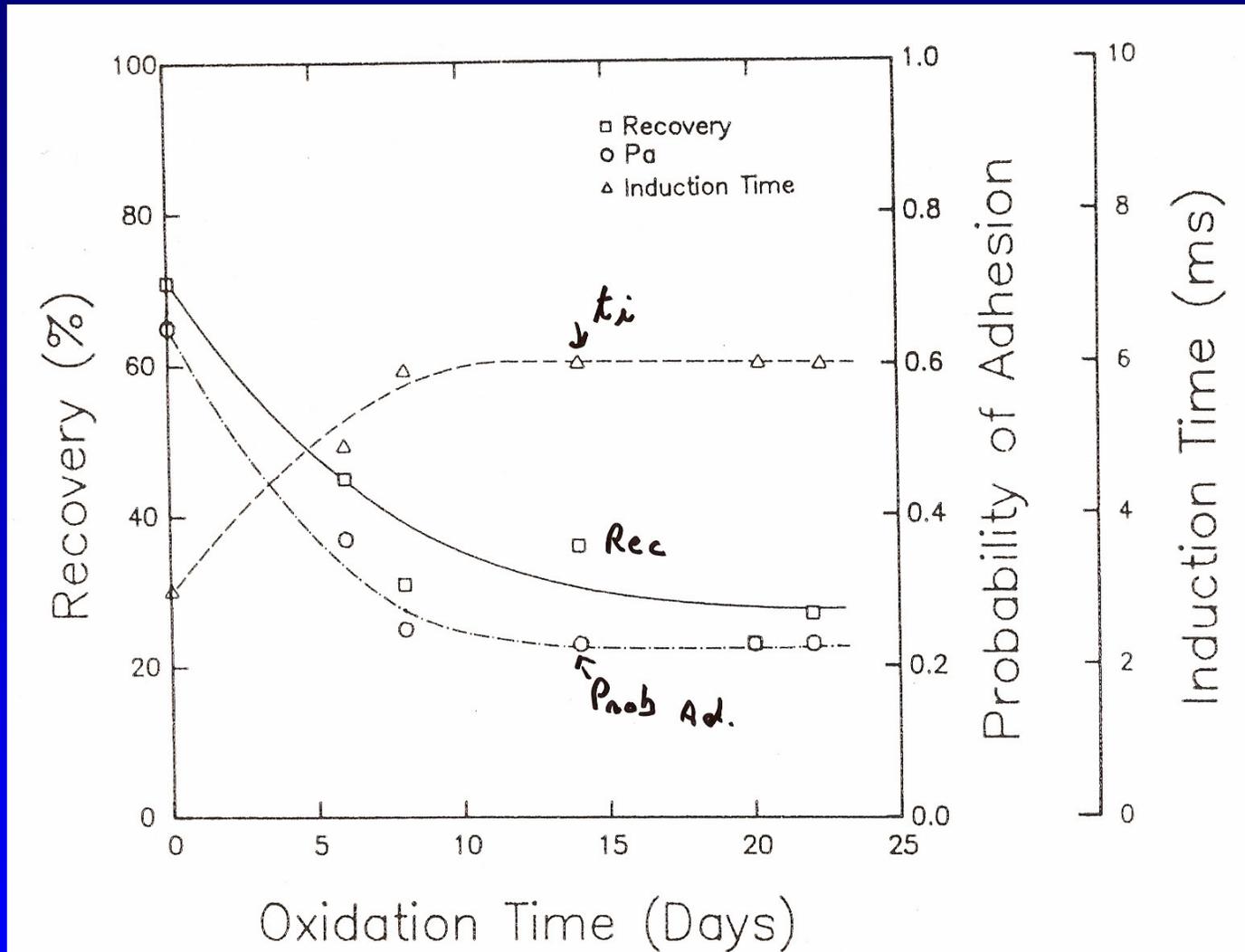
T = temperatura absoluta.

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 es aquel que corresponde a $t_c > t_i$.



Flotación



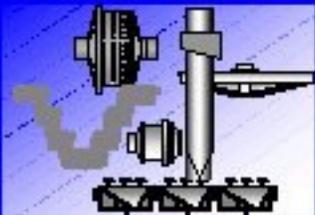
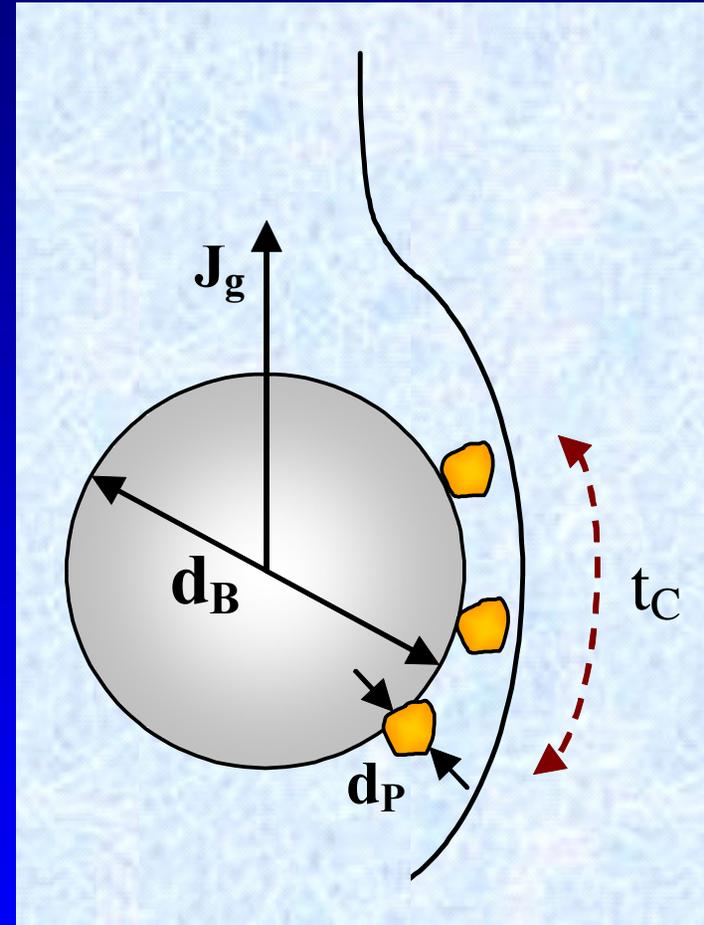
Flotación

El tiempo (t_c) que debe estar en contacto la burbuja con la partícula para que se produzca la adhesión es aquel que corresponde a $t_c > t_i$.

- **Probabilidad de Adhesión, P_A**

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

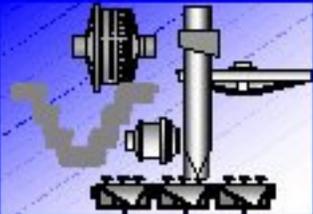
$$P_A = \text{sen}^2 \left(2 \arctan \left(\exp \left(\frac{-3 J_g t_i}{d_P + d_B} \right) \right) \right)$$



Flotación

¿Qué debe ocurrir para que el agregado burbuja y partícula llegue a la superficie?.

Se tiene una burbuja cargada con N partículas (iguales). ¿Qué relación debe existir entre el diámetro de la burbuja y el de las partículas para que exista levante?.



Flotación

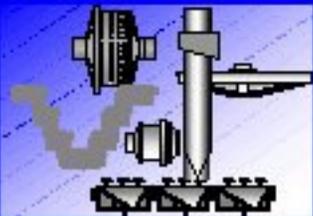
➤ Estabilización

Representa que la unión partícula – burbuja sea estable. Comprende 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 debe ser 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 - partícula pueda ascender es:

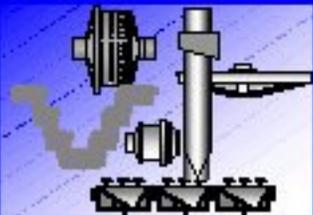
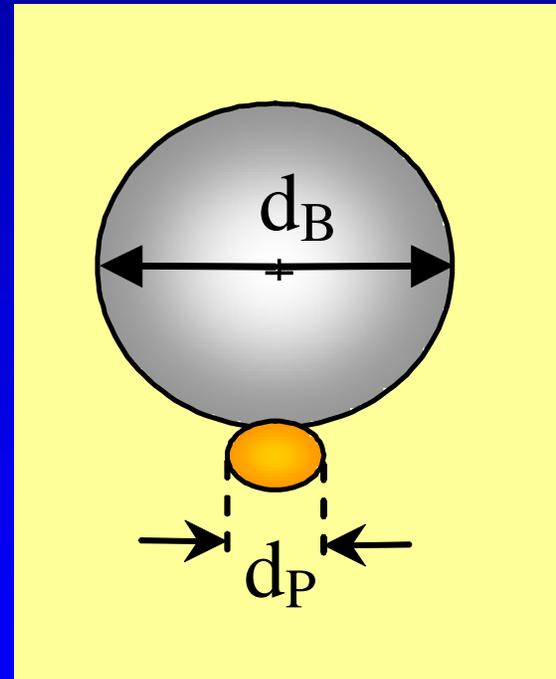
$$d_B \geq d_P \left(\frac{N_P \alpha_V}{\pi / 6} \right)^{1/3} \left[\frac{\rho_S}{\rho_L} - 1 \right]^{1/3}$$



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:

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

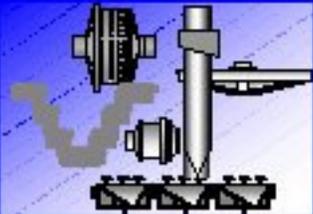


Flotación

- 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:

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



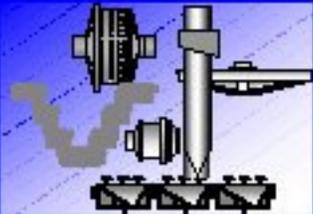
Flotación

- 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 con la tasa de flotación, K (constante cinética de flotación o velocidad de flotación).



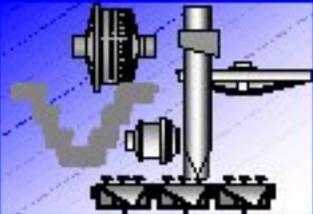
Flotación

Si la velocidad a la cual los sólidos dejan la pulpa es proporcional a la probabilidad de flotación y la frecuencia de colisiones es a su vez proporcional al número de partículas por

unidad de volumen ($c = \frac{C_V}{\alpha_V d_P^3}$), al área superficial de burbujas por unidad de volumen

(S) y a la probabilidad de colisión, entonces:

$$K = k_e c S P_F = k_e S \frac{C_V}{\alpha_V d_P^3} P_C P_A P_E$$



Flotación

❖ Cinética de Flotación, K

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

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

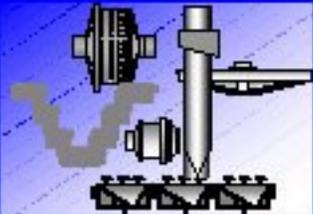
C_P y C_B son las concentraciones de partículas y burbujas respectivamente.

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

Usando las 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:

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



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

