



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES FAC. DE QUIMICA

ESTUDIO ELECTROCINETICO APLICADO AL PROCESO DE FLOTACION EN EL SISTEMA GALENA - XANTATO ETILICO DE POTASIO - DICROMATO DE POTASIO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE: INGENIERO QUIMICO METALURGICO PRESENTA: HUGO ALBERTO HERNANDEZ ALVAREZ



MEXICO, D. F.

1994

TESIS CON SELLO DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

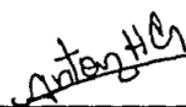
JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Prof. ANTONIO REYES CHUMACERO
VOCAL: Prof. ANTONIO HUERTA CERDAN
SECRETARIO: Prof. JOAN GENESCA LLONGUERAS
1er. SUPLENTE: Prof. SERGIO GARCIA GALAN
2do. SUPLENTE: Prof. TEZOSOMOC PEREZ LOPEZ

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

LABORATORIO DE METALURGIA EXTRACTIVA, LABORATORIO DE
PROCESAMIENTO DE MINERALES, DEPARTAMENTO DE METALURGIA,
FACULTAD DE QUIMICA EDIF. "D", CIUDAD UNIVERSITARIA.

ASESOR DEL TEMA:



M en C. ANTONIO HUERTA CERDAN

SUSTENTANTE DEL TEMA:



HUGO ALBERTO HERNANDEZ ALVAREZ

Con gran alegría dedico especialmente este trabajo de

tesis a

mis queridos padres:

Francisco Hdez. Carvajal e Ignacia Alvarez de Hdez.

a mis hermanos:

Claudia D., Juan Fco., Gabriel A.

Por confiar en mí y por todo el apoyo brindado

durante todo este tiempo, los quiero;

Hugo Alberto Hernández Alvarez

Sin olvidar a todos mis amigos que junto conmigo

vivimos días maravillosos en nuestra querida

Universidad, especialmente en la Facultad de Química.

Una mención especial a mis profesores que durante

todo este tiempo se preocuparon por mi aprendizaje.

A todos ellos mi respeto y admiración.

H. A. H. A.

INDICE

RESUMEN

CAPITULO I

- 1.1.- INTRODUCCION
- 1.2.- OBJETIVOS

CAPITULO II

- 2.1.- FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA FLOTACION
 - 2.1.1.- Minerales y materiales recuperados por flotación
 - 2.1.2.- Angulo de contacto
- 2.2.- QUIMICA DE SUPERFICIE EN LA FLOTACION
 - 2.2.1.- Doble capa electroquímica
 - 2.2.2.- Distribución iónica en la doble capa electroquímica
 - 2.2.3.- Densidad de carga en la superficie.
- 2.3.- TEORIAS Y MODELOS DE LA DOBLE CAPA ELECTROQUIMICA
 - 2.3.1.- Teoría y modelo de Gouy-Chapman
 - 2.3.2.- Teoría y modelo de Stern
- 2.4.- DETERMINACION TEORICA DEL POTENCIAL ZETA
 - 2.4.1.- Electrocinética
 - 2.4.2.- Eletrofóresis
 - 2.4.3.- Punto de carga cero (PCC).
 - 2.4.4.- Punto isoelectrico (PIE)

- 2.4.5.- Adsorción específica de iones.
- 2.5.- ESTUDIO DE LA GALENA (PbS) Y REACTIVOS QUIMICOS
 - 2.5.1.- Propiedades físicas y químicas de la Galena
 - 2.5.2.- Colectores
 - 2.5.3.- Propiedades físicas y químicas del Xantato
Étilico de Potasio (colector)
 - 2.5.4.- Depresores
 - 2.5.5.- Propiedades físicas y químicas del Dicromato
de Potasio (depresor)

CAPITULO III

3.1.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

- 3.1.1.- Metodología experimental para la determinación
del potencial zeta.
- 3.1.2.- Metodología experimental para la determinación
del potencial de reposo.
- 3.1.3.- Metodología experimental para la determinación
del potencial en la flotación.
- 3.1.4.- Reactivos y equipo usado durante el trabajo.

CAPITULO IV

4.1.- RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION.

- 4.1.1.- Resultados y discusión de la medición de
potencial zeta.
- 4.1.2.- Resultados y discusión de la medición de
potencial de reposo.

4.1.3.- Resultados y discusión de la medición de potencial en la flotación y balances metalúrgicos.

4.1.4.- Comparación de los potenciales zeta, reposo y flotación.

CAPITULO V

5.1.- CONCLUSIONES

5.2.- RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

5.2.- BIBLIOGRAFIA

RESUMEN

La concentración de minerales por flotación se basa en la fisicoquímica de superficies e interfases, por ello es necesario conocer más a fondo la interacción eléctrica que tiene el mineral con los reactivos usados en el proceso. En el presente trabajo se realizó un estudio de potenciales eléctricos para determinar la relación que pueden tener estos con el que se obtiene en un proceso de flotación a nivel laboratorio. Se hicieron concretamente mediciones de potencial zeta y de reposo para partículas de mineral de galena (PbS). Estas mediciones se relacionaron con los potenciales que se obtuvieron en la flotación del mineral de PbS en presencia de xantato etílico de potasio (colector) y dicromato de potasio (depresor), a diferentes concentraciones y a diferente pH. De los resultados obtenidos para los potenciales zeta, reposo y de la flotación se observa un incremento cuando se aumenta la concentración de dicromato y una disminución al aumentar la concentración de xantato, el potencial zeta nos permitió conocer el potencial de carga cero (PCC), el cual está relacionado directamente con la flotación del mineral, ya que en este potencial las recuperaciones son muy pobres, alrededor de 3 % en promedio, el depresor deprime a la galena, mientras que el colector activa al mineral. Los potenciales más favorables para flotar al PbS son los que están por debajo de -148 mV con recuperaciones del 98 % aprox. y ley del 51 %.

CAPITULO I

INTRODUCCION

La flotación por espuma es sin lugar a dudas una de las operaciones industriales más importantes junto con la fundición usada en el procesamiento de minerales metálicos, esta técnica se usa específicamente para separar minerales que se encuentran asociados con materiales no deseables como cuarzo y feldespato y fue patentada en 1906 por E. L. Sulman, H. F. K. Pickard y John Ballot [1]. La flotación permite la explotación de minerales de baja ley y complejos, lo cual habría sido incosteable por otro proceso distinto; principalmente la operación se desarrolló para tratar los sulfuros de cobre, plomo y zinc pero en la actualidad se incluyen minerales oxidados y los no metálicos.

La separación de minerales por flotación se basa en una compleja combinación de las leyes de la fisicoquímica de superficies e interfases, química coloidal y cristalografía. En la actualidad se han realizado diferentes estudios de las principales variables del proceso, con el objeto de comprender más el fenómeno de la flotación, y principalmente para aumentar la producción a un costo más bajo y optimizar el proceso, sin embargo no se ha logrado tener un buen control de este debido principalmente al desconocimiento que existe de las interacciones mineral-reactivos. Hay un interés muy especial en conocer las interacciones eléctricas que existen

en la superficie del mineral con los distintos reactivos usados durante el proceso de flotación, ya que en un futuro estas pueden ser las variables más importantes que controlen el proceso, de aquí la importancia de este estudio. Para este trabajo se postula la hipótesis de que los distintos potenciales eléctricos que se obtienen por diferentes métodos, tienen una relación entre sí, lo cual nos ayudaran a determinar la condición más favorable para concentrar al mineral de galena por el proceso de flotación.

El mineral de galena o sulfuro de plomo (PbS), es concentrado en México en varias compañías mineras mediante este proceso, en la TABLA I, se listan las principales y la producción de cada una de ellas en el año de 1986 para minerales sulfurados de plomo (Pb), plata (Ag), cobre (Cu) y zinc (Zn), el Oro (Au) se presenta en forma nativa.

T A B L A I

RAZON SOCIAL	CAP T/D	METALES
AGUASCALIENTES		
Cía. Min. Real de Asientos, S.A.	500	Pb, Cu, Zn
CHIHUAHUA		
Zinc de México, S.A. (Aldama)	500	Pb, Zn
Min. Nac. de México, S.A.	575	Ag, Pb, Zn, Cd
Industrial Minera México, S.A.	690	Ag, Pb, Zn, Fe
Zinc de México, S.A. (Parral)	1700	Au, Ag, Pb, Cu
Minera San Fco. del Oro, S.A.	5000	Pb, Zn
Cía. Fresnillo, S.A. (Saucillo)	1600	Pb, Zn
Min. Met. del Norte, S.A. (Sta. Barbara)	2400	Cu, Pb, Zn, Ag

COAHUILA		
La Encantada, S.A.	1200	Pb
DURANGO		
Comisión de Fom. Min. (Guanaceví)	350	Au, Ag, Pb, Cu
Cía. Minera Mexicana de Avino, S.A.	800	Pb, Cu
Min. Meta. del Norte, S.A. (Velardeña)	800	Au, Ag, Pb, Cu
GUANAJUATO		
Soc. Coop. Min. Met. Sta. Fe de Gto.	1200	Au, Ag, Pb, Zn
HIDALGO		
Cía. Real del Monte y Pachuca, S.A.	3000	Au, Ag, Pb, Zn
Beneficiadora San Antonio, S.A.	300	Pb, Cu, Zn
Cía. Fresnillo, S.A. (Zimapán)	750	Pb, Cu, Zn
JALISCO		
Minerales Bolaños, S.A.	1000	Pb, Zn
Zimapán, S.A.	900	Pb, Zn, Fe
Min. San Pedro Analco, S.A.	400	Au, Ag, Pb, Cu
MICHOACAN		
Impulsora Min. de Angangueo, S.A.	400	Ag, Pb, Zn
MORELOS		
Rosario de México, S.A.	300	Ag, Pb, Zn
QUERETARO		
Cía. Min. La Negra y Anexas, S.A.	500	Ag, Pb, Cu, Zn
SAN LUIS POTOSI		
Industrial Minera México, S.A.	3450	Au, Ag, Pb, Zn
SINALOA		
Industrial Minera México, S.A.	550	Pb, Cu, Zn
Comisión de Fom. Min. (La Minita)	300	Cu, Pb, Zn
SONORA		
Minera Lampazos, S.A.	600	Au, Ag, Pb, Zn
ZACATECAS		
Minera Victoria Eugenia, S.A.	300	Ag, Pb, Zn
Cía. Fresnillo, S.A.	2000	Pb, Zn
Cía. Min. Noche Buena y Anexas, S.A.	300	Au, Ag, Pb, Zn
Minera Mexicana Sombrerete, S.A.	400	Pb, Zn
Industrial Min. México, S.A.	5700	Pb, Cu, Zn
Comisión de Fom. Min. (El bote)	850	Au, Ag, Pb, Cu

1.2.- OBJETIVOS

- a) Estudiar las interacciones eléctricas que se presentan entre la superficie del mineral de galena (PbS) con los distintos reactivos de flotación como son el colector de xantato etílico de potasio (C₂H₅OCS₂K) y el depresor dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) con diferentes valores de pH.
- b) Observar mediante estudios electrocinéticos la influencia de las concentraciones de colector y depresor sobre el potencial eléctrico de un mineral de galena (PbS).
- c) Encontrar la posible relación existente entre las mediciones de potencial zeta, potencial de reposo y potencial en la flotación de un mineral de galena.
- d) Encontrar el punto de carga cero para la galena
- e) Encontrar las condiciones más favorables para la recuperación de mineral de sulfuro de plomo a partir de los estudios efectuados.

CAPITULO II

2.1.- FUNDAMENTOS TEORICOS DE LA FLOTACION.

La flotación es una operación unitaria muy importante para separar minerales valiosos y otros materiales sólidos que se encuentran asociados con otros a los cuales se les denomina gángas o estériles. Las componentes de un sistema de flotación pueden dividirse en tres categorías según R. Klimpel [0], en la FIGURA 1 se muestra esta división:



Fig. 1.- Sistema de flotación con sus tres subdivisiones

El proceso de flotación se lleva acabo en una cuba o tanque rectangular llamado celda de flotación, dentro de la

cual se introducen partículas minerales relativamente finas en una fase líquida que por lo general es agua, a esta suspensión se le adiciona ciertos reactivos químicos normalmente orgánicos los cuales modifican la interacción superficial del mineral a concentrar volviéndolo hidrofóbico (aerofílico).

Los ingredientes se agitan vigorosamente mediante una hélice que gira a gran velocidad, produciéndose una pulpa, al inyectar aire por debajo del tanque se producen burbujas y las partículas del mineral que se desea concentrar se adhieren a ellas, las partículas que no se adhieren a las burbujas se hunden al fondo de la celda. A medida que la espuma con mineral sube a la superficie de la celda de flotación, se recoge mediante paletas convenientemente diseñadas y se arroja luego dentro de una artesa llamada lavadero.

Este último descarga el producto limoso en un tanque o cuba provisto de una serie de filtros cubiertos de lona que tienen la forma de discos huecos, denominados hojas, que se hacen girar lentamente sobre un eje horizontal. Sólo la parte inferior de los discos se sumerge en el limo cargado de minerales del tanque de filtro. Este sector inferior gira lentamente, hallándose bajo vacío, hace que una capa de limo se adhiera a él. La parte del disco que contiene el limo asciende a la superficie, y el vacío es automáticamente reemplazado por una presión, que hace que la capa se desprenda de la hoja. Este mineral se recolecta para que después sea

enviado a otros procesos metalúrgicos en donde los productos metálicos de valor servirán en la producción de piezas metálicas, herramientas, productos ornamentales, etc. En la FIGURA 2 se muestra un diagrama del proceso de flotación donde se observa las partes que componen este proceso.

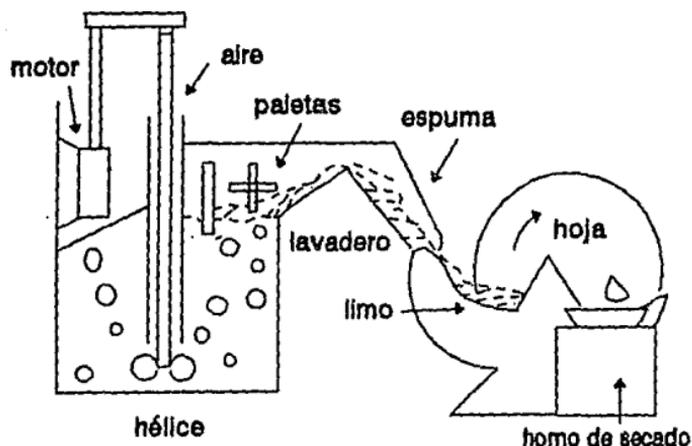


Fig. 2.- Esquema de la flotación en una celda.

2.1.1.- Minerales y materiales recuperados por flotación.

La lista de minerales que se sabe han sido recuperados o purificados por flotación es ahora muy larga. Algunos de los ejemplos mejor conocidos se dan en la TABLA II, junto con sus valores metálicos entre paréntesis.

T A B L A II

Apatita	(P)	Arsenopirita	(As, Au)	Azurita	(Cu)
Azufre	(S)	Barita	(BaSO ₄)	Bauxita	(Al)
Berilo	(Be)	Bornita	(Cu)	Calcopirita	(Cu)
Carbón	(C)	Casiteria	(Sn)	Cerusita	(Pb)
Celestita	(Sr)	Chelita	(W)	Cinabrio	(Hg)
Colemanita	(B)	Covelita	(Cu)	Crisocola	(Cu)
Cromita	(Cr)	Esfalerita	(Zn)	Espodumena	(Li)
Estibnita	(Sb)	Fosforita	(P)	Fluorita	(CaF ₂)
Galena	(Pb)	Gráfita	(C)	Hematita	(Fe)
Ilmenita	(Ti)	Magnesita	(Mg)	Magnetita	(Fe)
Malaquita	(Cu)	Molibdenita	(Mo)	Oro	(Au)
Perovskita	(Ti)	Piricloro	(Nb)	Pirita	(S)
Rutilio	(Ti)	Smitsonita	(Zn)	Witerita	(Ba)
Zirconio	(Zr)				

2.1.2.- Angulo de contacto.

Las mediciones del ángulo de contacto han sido tradicionalmente usadas para fijar la flotabilidad de los minerales [2]. El ángulo de contacto, θ , de una burbuja sobre un sólido es definido como el ángulo medido a través del líquido en el contacto sólido-burbuja que se muestra en la, FIGURA 3. La actividad de una superficie mineral en relación a los reactivos de flotación en la fase acuosa depende de las

fuerzas que actúan sobre la superficie, en la misma FIGURA 3 se muestran las fuerzas que tienden a separar una partícula de una burbuja.

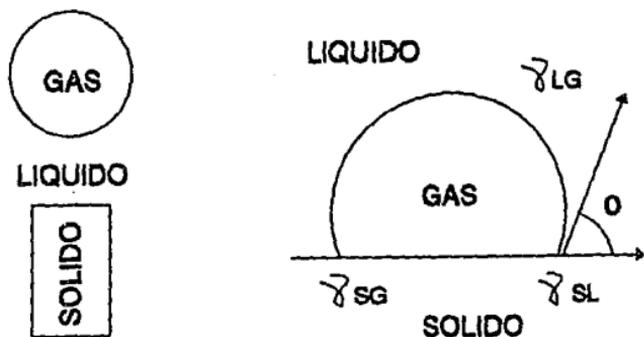


Fig. 3.- Angulo de contacto entre una burbuja y una partícula sólida en medio acuoso.

La magnitud del ángulo de contacto es definida por la ecuación de Young-Dupré [3],

$$\cos \theta = (\gamma_{SG} - \gamma_{SL}) / \gamma_{LG} \dots \dots \dots (1)$$

Donde: γ_{SG} , γ_{SL} , γ_{LG} , son las energías de superficie entre las fases sólido-gas, sólido-líquido y líquido-gas respectivamente, $\theta =$ es el ángulo de contacto entre la superficie sólida y la burbuja. Si la partícula es hidrofílica, el ángulo es cero en agua.

La fuerza necesaria para romper la interfase partícula-

burbuja es el llamado "trabajo de adhesión", $W_{s/g}$, y es el trabajo hecho en el sistema cuando dos fases condensadas "S" y "G", que forman una interfase de área unitaria, son separadas reversiblemente para formar áreas unitarias de cada una de las interfaces sólido-gaseoso, es decir,

$$W_{s/g} = \gamma_{SG} + \gamma_{LG} - \gamma_{SL} \dots \dots \dots (2)$$

Al combinar esta ecuación con la número 1, se tiene:

$$W_{s/g} = (\cos \theta - 1) \gamma_{LG} \dots \dots \dots (3)$$

Excluyendo efectos de gravedad, el cambio de la energía libre (sobre una base de unidad de área) para el enlace de una burbuja de aire sobre una partícula mineral esta dada por:

$$\Delta G_{\text{flot}} = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} = (\cos \theta - 1) \gamma_{LG} \dots \dots (4)$$

Mientras mayor sea el ángulo de contacto, el trabajo de adhesión será más grande entre la partícula y la burbuja, además que la flotabilidad del mineral será también mayor.

2.2.- QUIMICA DE SUPERFICIE EN LA FLOTACION

La flotación es un importante ejemplo de un proceso químico por el cual un sólido se separa de otros sólidos en

una mezcla. En contraste con otros procesos químicos como la lixiviación o la fundición, la separación de sólidos por flotación es caracterizado por el establecimiento del contacto entre tres fases. En la flotación con espuma estas tres fases son el sólido que es flotado, una solución electrolítica acuosa, y un gas, usualmente aire. Para poder tener un mejor entendimiento del sistema de flotación, es necesario el estudio de las propiedades químicas y físicas de la superficie y establecer el efecto de los cambios en la composición de las fases sobre las tres interfases, sólido-gas, sólido-líquido y líquido-gas.

Una consecuencia general del encuentro de dos fases en un límite es la formación de una doble capa eléctrica. Este término se usa para describir el arreglo de cargas y dipolos orientados que constituyen la región interfacial. Cuando una de las dos fases se mueve con respecto a la otra se manifiesta en el sistema un fenómeno electrocinético. La palabra electrocinética, por lo tanto, implica efecto combinado de fenómenos de movimiento y eléctricos. El interés de este trabajo está enfocado a estudiar el efecto electrocinético que se presenta en la flotación de un mineral de plomo.

2.2.1.- Doble capa electroquímica.

El término doble capa electroquímica o simplemente doble

capa se usa para describir el arreglo de cargas eléctricas y dipolos orientados que constituyen la región interfacial en el límite de un electrólito. En esta región existe una capa de carga positiva y otra capa de carga negativa, lo que hace que el sistema en general sea electricamente neutro.

La doble capa es una consecuencia del encuentro de dos fases en un límite. Una diferencia de potencial se genera a través de casi cualquier unión entre dos fases, si los materiales contienen cargas móviles libres (electrones ó iones), la diferencia de potencial se produce por la electrificación de los dos lados del límite. Aún cuando el material no contenga cargas libres, si contiene dipolos - permanentes ó moléculas cuyos dipolos pueden ser inducidos, se puede generar una diferencia de potencial en el límite por la orientación neta de sus dipolos [4].

2.2.2.- Distribución iónica en la doble capa electroquímica.

En el más simple de los casos, se considera que la doble capa está constituida por dos regiones; una superficie con carga, y una capa difusa de iones contrarios distribuidos por la acción resultante de fuerzas eléctricas y movimiento térmico al azar. La FIGURA 4 ilustra esquemáticamente la distribución de iones en la doble capa electroquímica, y muestra la carga de superficie y la capa difusa de iones

de carga contraria. La primera capa de iones de carga contraria se conoce como capa de Stern y se localiza a una distancia δ de la superficie. La magnitud de δ depende de si los iones están hidratados o sin hidratar. El espesor de la capa difusa de iones de carga contraria, $1/K$, está dado por la relación de Debye-Hückel para un electrólito simétrico ($Z^+ = Z^- = Z$):

$$K^2 = (8 \pi C z^2 F^2) / \epsilon R T \dots \dots \dots (5)$$

Donde: C es la concentración el electrólito, ϵ es la constante dieléctrica del líquido. En soluciones acuosas de electrólitos con valencia 1-1, $1/K$ es 10^{-4} , 10^{-5} y 10^{-6} cm en soluciones 10^{-7} , 10^{-5} y 10^{-3} M, respectivamente. Así, si se aumenta la concentración del electrólito disminuye la extensión de la capa difusa. La longitud de Debye, $1/K$, es el centro de gravedad con la distancia de la capa y coincide con la posición donde el potencial ha disminuido hasta un valor $1/e$ del valor en el plano de Stern, ψ_δ .

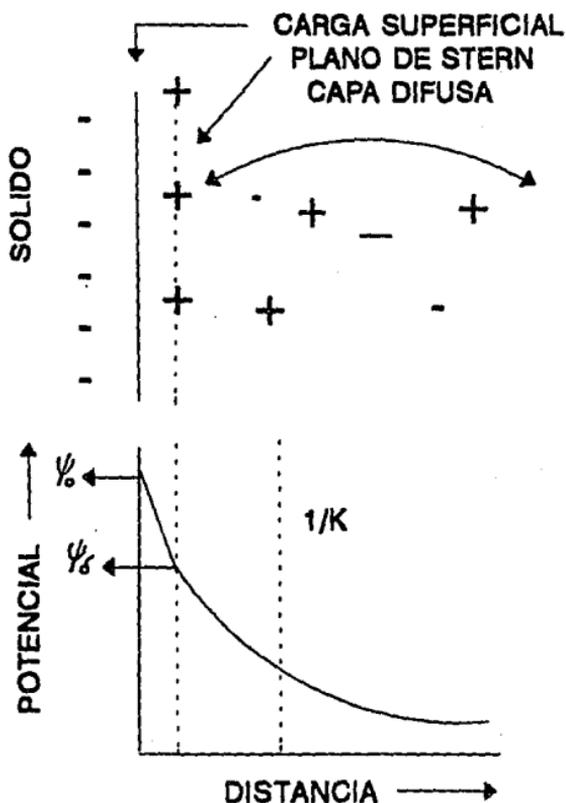


Fig. 4.- Representación esquemática de la distribución iónica en la doble capa electroquímica y de la caída de potencial a través de la doble capa.

Donde: + y - son los iones determinantes del potencial

+ y - son los co-iones negativos y los contra-iones respectivamente

ψ_0 = potencial de superficie

ψ_δ = potencial en el plano de Stern

$1/K$ = espesor de la capa difusa

Según Overbeek [5], Tres ecuaciones básicas gobiernan la distribución de iones en la doble capa:

1) Ecuación de Poisson:

$$\nabla^2 \Psi = - (4 \pi \rho (X)) / \epsilon \dots \dots \dots (5)$$

2) Ecuación de Boltzman:

$$C_i (X) = C_i (\infty) \exp [- (Z_i F \Psi (X)) / RT \dots \dots (6)$$

$$3) \rho (X) = \sum Z_i F C_i (X) \dots \dots \dots (7)$$

Donde: $\rho (X)$ es la densidad de carga espacial, X es la distancia a partir de la superficie, Ψ es el potencial, y C_i es la concentración iónica en mol por cm^3 . Gouy y Chapman resolvieron estas ecuaciones suponiendo que los iones son cargas puntuales, que la constante dieléctrica no varía con la distancia y que es la misma que la del líquido.

La distribución de potencial eléctrico en la doble capa está relacionado con su espesor. Si el potencial $\Psi \ll 25$ mV, la caída de potencial a través de la doble capa está dado por la siguiente expresión:

$$\Psi (X) = \Psi_0 \exp [- K X] \dots \dots \dots (8)$$

Donde: Ψ_0 es el potencial en la superficie. Cuando $X = 1/K$, el potencial en la doble capa es Ψ_0 . Por esta razón, $1/K$ se toma como el espesor de la doble capa. La FIGURA 4 también muestra la distribución de potencial en la doble capa electroquímica.

Sin embargo el potencial de superficie Ψ_0 , no es posible medirlo en un sólido directamente pero se puede calcular si se conoce el punto de carga cero (PCC) del sólido de la siguiente forma:

$$\Psi_0 = [(R T) / (Z + F)] \cdot \ln (a_+ / a_+^{\text{pcc}}) \dots \dots (9)$$

Donde: F es la constante de Faraday, T es la temperatura absoluta, Z es la valencia del catión determinante del potencial, a_+ es la actividad cuando la superficie no está cargada esto es, en el potencial de cero carga (PCC). En el modelo de la doble capa, el potencial de superficie es considerado cero en el PCC.

2.2.3.- Densidad de carga en la superficie.

La densidad de carga en la superficie está dada por la siguiente expresión [6] :

$$\sigma_0 = Z \pm F (\Gamma_{\text{cdf}} - \Gamma_{\text{adp}}) \dots \dots \dots (10)$$

Donde los subíndices de la densidad de adsorción Γ son el catión determinante del potencial, cdp, y el anión determinante del potencial, adp.

2.3.- TEORIAS Y MODELOS DE LA DOBLE CAPA ELECTROQUIMICA.

Una de las primeras teorías propuestas para explicar la distribución de cargas contrarias en la solución que rodea a una superficie plana con carga se debe a Helmholtz (1879), quién se imaginó a todos los iones contrarios alineados en forma paralela a la superficie cargada, y a una distancia de aproximadamente un diámetro molecular. De acuerdo con este modelo, el potencial eléctrico debería disminuir rápidamente hasta cero a una distancia muy corta de la superficie cargada eléctricamente. El modelo de Helmholtz de la doble capa se presenta en la FIGURA 5. Este modelo permitió a Helmholtz tratar de matemáticamente a la doble capa eléctrica como un condensador de placas paralelas. Sin embargo, este modelo no se sostuvo por mucho tiempo porque no tomó en cuenta que la agitación térmica tiende a difundir algunos de los iones de carga contraria a través de la solución [7].

2.3.1.- Teoría y modelo de Gouy-Chapman

La teoría de Gouy - Chapman de la doble capa considera una distribución difusa de los iones contrarios, con la

concentración de estos iones (y el potencial) disminuyendo rápidamente al principio con la distancia desde la superficie, y luego más y más gradualmente con la distancia. Este modelo, presentado en la FIGURA 6, útil para superficies planas con baja densidad de carga o para distancias no muy cercanas a la superficie, no es adecuado para superficies con densidad de carga alta, especialmente a distancias cortas de la superficie, porque desprecia los diámetros iónicos de las cargas en solución y las trata como cargas puntuales.

2.3.2.- Teoría y modelo de Stern

La teoría y modelo de Gouy-Chapman de la doble capa electroquímica fue modificada por Stern (1924), quién dividió el lado de la solución de la doble capa en dos partes:

- a) Una capa de iones contrarios enlazados fuertemente, adsorbidos sobre sitios fijos muy cerca de la superficie cargada mediante un mecanismo que corresponde al tipo de adsorción de Langmuir (para corregir el defecto fundamental del modelo de Gouy-Chapman)
- b) Una capa difusa de iones contrarios similar al modelo de Gouy-Chapman.

De acuerdo al modelo de Stern, mostrado en la FIGURA 7, el potencial eléctrico de la doble capa disminuye rápidamente

en la porción fija (capa de Stern) de la doble capa. Como se muestra en la FIGURA 8, los iones contrarios fijos en la capa de Stern pueden en ciertos casos cambiar el signo del potencial que se genera por la carga de superficie.

El tratamiento matemático de la parte difusa de la doble capa electroquímica proporciona un concepto muy útil: el espesor efectivo de la doble capa, $1/k$. Este parámetro es la distancia en la solución (a partir de la superficie) dentro de la cual se considera que ocurren la mayor parte de las interacciones eléctricas con la superficie.

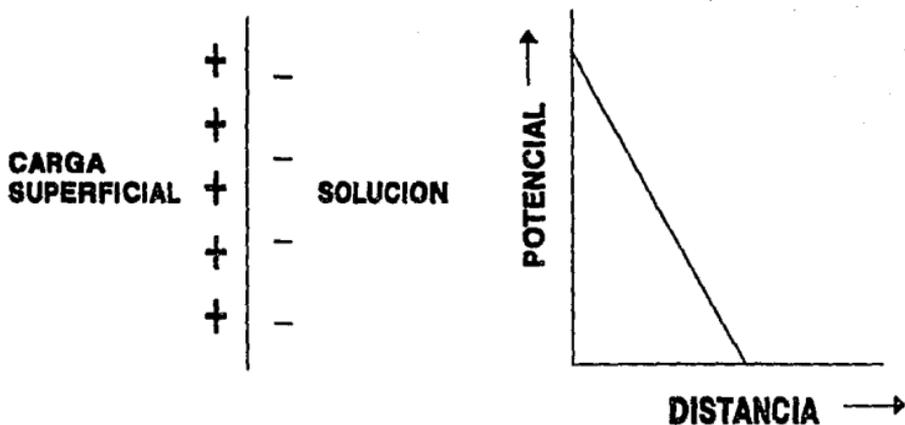


Fig. 5.- Representación esquemática del modelo de Helmholtz de la doble capa electroquímica.

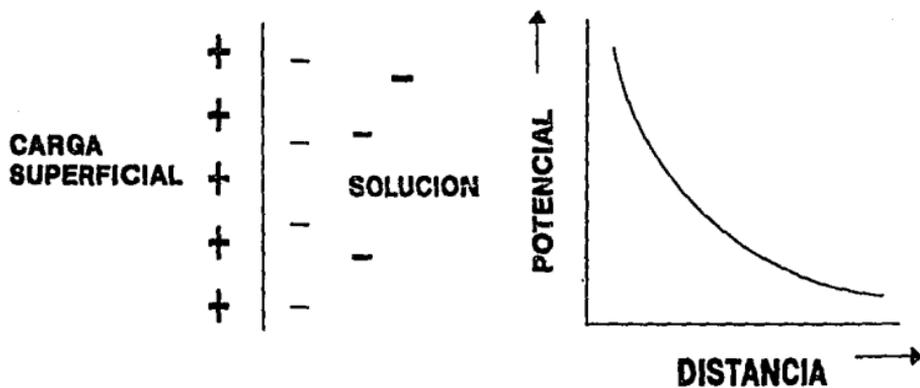


Fig. 6.- Representación esquemática del modelo de Gouy-Chapman de la doble capa electroquímica

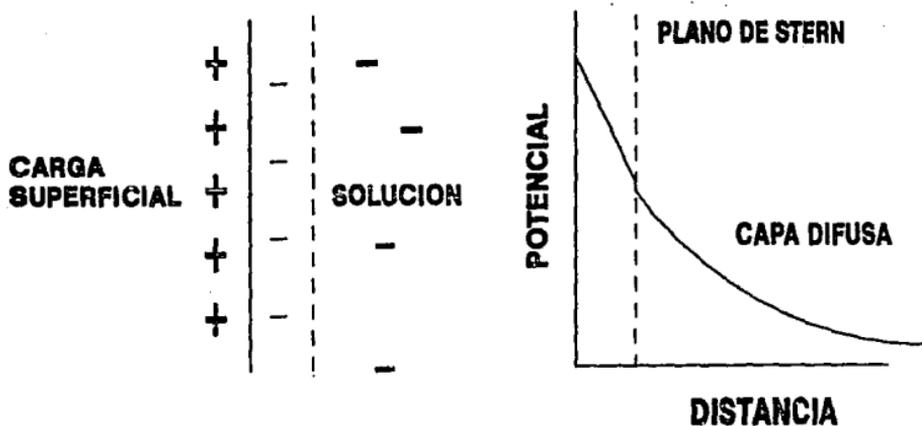


Fig. 7.- Representación esquemática del modelo de Stern de la doble capa electroquímica.

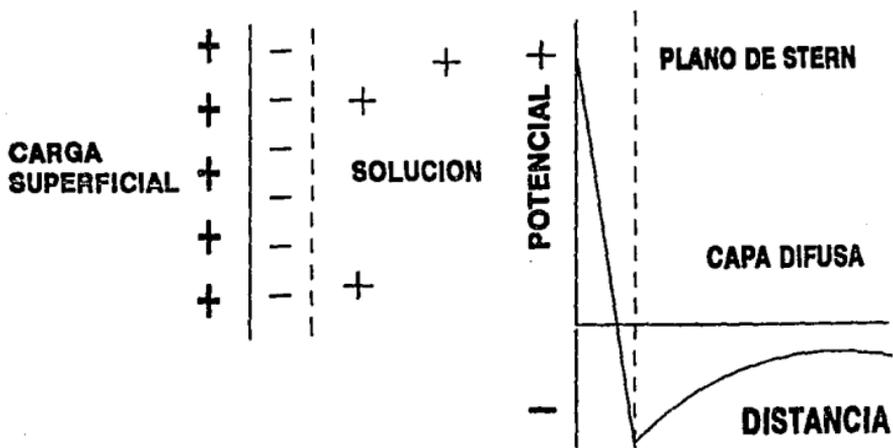


Fig. 8.- Representación esquemática del modelo de Stern para un sistema con cambio del potencial en el plano de Stern.

2.4.- DETERMINACION TEORICA DEL POTENCIAL ZETA

El potencial zeta ó potencial electrocinético, ζ , es la caída de potencial a través de la parte móvil de la doble capa, que es responsable de los fenómenos electrocinéticos. ζ es positivo si el potencial aumenta de la fase líquida hacia la interfase. Cuando se calcula el potencial electrocinético en fenómenos electrocinéticos con frecuencia se supone que el líquido adherido a la pared sólida y el líquido móvil están separados por un plano de cizallamiento. Como no existe información considerable sobre los valores de la permitividad, ϵ , y la viscosidad, η , en la doble capa eléctrica cerca de la interfase, el cálculo del potencial electrocinético a partir de experimentos electrocinéticos sigue abierto a la crítica (nadie sabe en donde está este plano).

La importancia de este potencial radica en controlar la estabilidad de sistemas coloidales, la naturaleza y la magnitud de los procesos de adsorción de especies iónicas. Existen muchas situaciones prácticas donde la floculación (agregación de coloides) es un proceso de considerable importancia. Con frecuencia lo que se desea en estos casos es maximizar o minimizar la floculación, por lo que el concepto de potencial zeta emerge como un parámetro práctico muy valioso. Si dos sistemas de potencial zeta diferente se comparan, el que tiene mayor potencial zeta será más estable

con respecto a la floculación, y el que tiene menor potencial zeta menos estable.

2.4.1.- Electrocinética

En un sistema intercara con carga donde cuando menos una de las fases es un fluido, si existe un movimiento relativo entre las dos fases, se presenta un número de fenómenos electrocinéticos. El movimiento relativo del fluido causa el transporte de iones contrarios en la capa difusa, lo cual da lugar a los varios tipos de fenómenos electrocinéticos. El efecto medio y aplicado depende de si se aplica una fuerza mecánica o un campo eléctrico. Si un líquido se encuentra en una roca porosa o en un capilar, y se le aplica una presión sobre el líquido, se genera un potencial, el cual se conoce como potencial de flujo. Por lo tanto, si se aplica un potencial a través de las terminaciones del capilar, el líquido fluirá en respuesta al campo eléctrico; a este fenómeno se le conoce como *electro-ósmosis*. Si las partículas dispersas son sólidos o gotas de aceite y la suspensión se coloca en un campo eléctrico, las partículas se moverán; a este fenómeno se le conoce como *electrofóresis*.

Además de los fenómenos electrocinéticos, estas técnicas constituyen un método útil para medir los efectos eléctricos en fenómenos de adsorción. El potencial importante es el

potencial en el plano de corte o plano de cizallamiento, conocido como el potencial zeta, ζ , y usado ampliamente en ciencia de coloides, procesamiento de minerales etc. Como se puede apreciar en la FIGURA 9, la magnitud del potencial zeta depende de la posición del plano de cizallamiento. Los resultados de algunas investigaciones con micelas indican que el plano de corte se localiza muy cerca de la superficie, por lo que una aproximación razonable consiste en considerar que el potencial zeta es una medida del potencial en el plano de Stern [8].

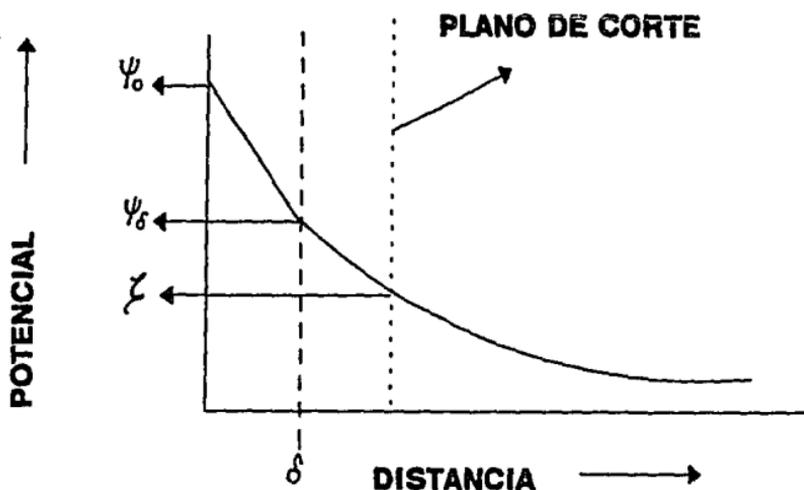


Fig. 9.- Representación esquemática de la posición del plano de corte o cizallamiento en la doble capa electroquímica. El potencial en este plano es el potencial electrocinético o potencial zeta.

2.4.2.- Electroforesis

La electroforesis es el más importante de los fenómenos electrocinéticos. La electroforesis microscópica depende de la visibilidad de partículas en movimiento en una celda cilíndrica o rectangular bajo un microscopio. Este experimento electrocinético consiste en aplicar un gradiente de potencial en una solución que contiene partículas con carga y en determinar su velocidad de movimiento [9].

2.4.3.- Punto de carga cero (PCC).

El parámetro más importante que describe la doble capa electroquímica en la interfase sólido/solución acuosa es el punto de carga cero (PCC). El PCC se expresa como la condición de la solución acuosa que produce una carga de superficie igual a cero; esta condición está determinada por la actividad de los iones determinantes del potencial en la solución (a_{+pcc} y a_{-pcc}). El modelo de la doble capa electroquímica considera que el potencial de la superficie ψ_0 es cero en el PCC, y su valor a cualquier actividad de ion determinante del potencial está dado por la expresión de la ecuación 9.

2.4.4.- Punto isoelectrico (PIE)

El punto isoelectrico de un material se define como la

condición a la cual el potencial electrocinético, ξ , es cero. Si ψ_0 y ξ se pueden identificar, como es práctica común, entonces la estabilidad coloidal también mide el punto isoeléctrico. En muchos artículos el PCC y el PIE se usan indistintamente. Esto se debe a que la carga en la capa difusa es cero en el PIE. Sin embargo, el PCC se refiere solamente a la condición donde la carga de superficie es cero, y no a la condición cuando la carga de la capa difusa es cero. Por lo tanto, si se toman en cuenta estas condiciones, los dos términos no se pueden usar indistintamente.

En ausencia de adsorción específica, el PCC y el PIE deben coincidir. Por otra parte, si la adsorción específica de los iones del electrólito no es igual, el PCC y el PIE no coinciden; al contrario, si la adsorción específica aumenta el PCC y el PIE se mueven en direcciones opuestas. Con electrólitos indiferentes estos parámetros dependen exclusivamente de las propiedades de la superficie y del solvente.

2.4.5.- Adsorción específica de iones.

Ciertos iones se adsorben fuertemente en la región interna de la doble capa, es decir, en la capa de Stern, por medio de enlaces que incluyen fuerzas adicionales a las electrostáticas [10]. La adsorción de este tipo de iones se

conoce como adsorción específica y su densidad de adsorción está dada por una relación del tipo de Langmuir:

$$\Theta / (1 - \Theta) = (C / 55.5) \exp [-\Delta G_{ads}^{\circ} / RT] \dots (11)$$

Donde: Θ es la fracción de superficie cubierta y ΔG_{ads}° es la energía libre estándar de adsorción. La cantidad $C/55.5$ representa la fracción molar del soluto en la fase acuosa. La ecuación de la energía libre estándar de adsorción puede contener no sólo el término de los efectos electrostáticos, $Z\pm F\psi_{\delta}$, sino también otros términos que consideran los efectos específicos:

$$\Delta G_{ads}^{\circ} = Z\pm F\psi_{\delta} + \Delta G^{\circ}_{quim} + \Delta G^{\circ}_{CH_2} + \Delta G^{\circ}_{solv} + \Delta G^{\circ}_{H} + \dots (12)$$

Donde: ΔG°_{quim} representa la contribución del enlace químico superficial, $\Delta G^{\circ}_{CH_2}$, es la contribución de la energía libre debida a la asociación de las cadenas de hidrocarburo en la superficie, ΔG°_{solv} , representa la adsorción controlada por la hidratación (solvatación) de iones y superficies, y ΔG°_{H} es la contribución de adsorción por enlace de hidrógeno.

Las propiedades de la doble capa electroquímica se pueden modificar significativamente mediante la adición al sistema de electrólitos cuyos iones se adsorben específicamente en la

capa de Stern. Si el valor de cualquiera de los términos de adsorción específica es grande, la densidad de adsorción en la capa de Stern puede rebasar a la superficie; esto es, $\sigma_s > \sigma_o$. Este comportamiento del sistema puede explotarse para controlar muchos de los fenómenos de superficie.

2.5.- ESTUDIO DE LA GALENA (PbS) Y REACTIVOS QUIMICOS.

La galena ha sido estudiada frecuentemente por investigadores debido a que es un mineral de fácil obtención y por tener un uso industrialmente importante, aunque se discute en la actualidad la toxicidad que el plomo provoca en la salud.

2.5.1.- Propiedades físicas y químicas de la galena

La galena ó sulfuro de plomo es un mineral opaco de color gris de plomo y brillo metálico, se encuentra asociado con minerales de esfalerita (ZnS), pirita (FeS₂), calcopirita (CuFeS₂), y minerales de ganga, tales como cuarzo (SiO₂), calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)), barita (BaSO₄) y fluorita (CaF₂). La densidad relativa del PbS es de 7.4 - 7.6 con un 86.6 % de plomo y 13.4 % de azufre, la dureza varia de 2 1/2 a 3 en escala de Mohs.

Los átomos de plomo y de azufre tienen el arreglo del

sulfuro de sodio, cada átomo de plomo tiene 6 átomos de azufre vecinos a una distancia de 2.9 Å y 12 átomos vecinos de plomo a 4.19 Å. El Sulfuro de plomo tiene un arreglo cristalográfico cúbico con $a^* = 5.92$ Å. Cada plomo tiene un total de 1.38 enlaces covalentes con el azufre y 1.2 enlaces covalentes con el plomo. El sulfuro de plomo también cuenta con un intervalo perceptible de estequiometría lo cual indica que se puede preparar sulfuro de plomo rico en plomo ó en azufre. El diagrama de fases de la galena fue determinado por Bloem y Kröger [11] al preparar sulfuro de plomo de estequiometría variable.

El sulfuro de plomo es un semiconductor, Frey [12] llegó a medir la resistividad eléctrica del sulfuro de plomo sintético, obteniendo una relación del tipo:

$$\rho = 0.00258 (1 + 0.00895 T + 0.00002 T^2) \text{ ohm cm} \dots (13)$$

Donde: T es la temperatura en grados centigrados.

Mientras que Reichenheim y Koeniberger [13] obtuvieron para la galena la siguiente relación:

$$\rho = 0.00242 (1 + 0.00524 T) \text{ ohm cm} \dots (14)$$

Las imperfecciones de la red cristalina de la galena, los defectos dentro del sólido, defectos en la superficie y la

variación de la estequiometría, dan como resultado un comportamiento diferente de potencial químico sobre su superficie. Szeglowski [14] mostró esta irregularidad de potencial mediante el uso de un electrodo de microsonda, Plaksin y Shafeev [15] encontraron que las fisuras, hoyos y huecos sobre la superficie de la galena tendían a ser anódicos y los bordes junto con las proyecciones tendían a ser catódicos.

2.5.2.- Colectores

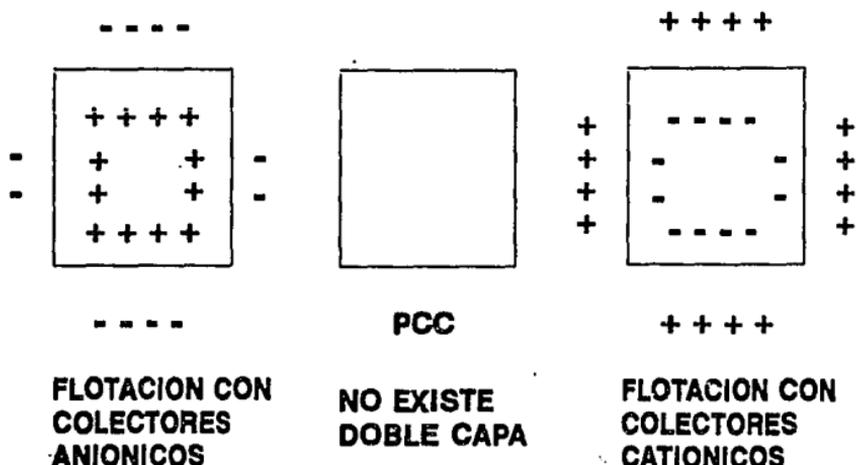
Para concentrar minerales por el proceso de flotación en espuma se les debe dar una cierta calidad hidrofóbica. Para lograrlo se adiciona surfactantes a la pulpa contenida en la celda de flotación, a estos surfactantes se les conoce como colectores y el tiempo concedido para la adsorción durante la agitación se conoce como período de acondicionamiento. Los colectores son compuestos orgánicos que convierten a los minerales seleccionados en repelentes al agua por la adsorción de moléculas o iones sobre la superficie mineral, reduciendo la estabilidad de la capa hidratada que separa la superficie mineral de la burbuja de aire, hasta un nivel tal que la adhesión de la partícula a la burbuja pueda hacerse por contacto. Taggart, Taylor y Ince [16] en 1930 demostraron la generalización de que los colectores contienen un grupo polar y uno no polar, estos autores postularon que en una pulpa de

En general los colectores se usan en pequeñas cantidades, sólo las necesarias para formar una capa monomolecular sobre la superficie de la partícula, al aumentar la concentración, no sólo aumenta el costo sino que puede ser perjudicial porque otros minerales tienden a flotar, reduciendo así su selectividad. Al tener una concentración excesiva de un colector también es perjudicial sobre la recuperación, porque posiblemente debido al desarrollo de multicapas de colector sobre las partículas reducen la proporción de radicales hidrocarburo orientados hacia la masa de la solución, de este modo reduce la hidrofobicidad de las partículas y por tanto, su capacidad de flotar.

Los colectores se pueden clasificar como aniónicos y catiónicos, los *colectores aniónicos*; son los que más se usan en el proceso de flotación de minerales y se pueden clasificarse a su vez de acuerdo a la estructura del grupo polar. Los colectores oxhidrilo tienen como grupos polares aniones orgánicos y sulfo-ácidos, el catión no interviene de manera significativa en la reacción mineral-reactivo. Los colectores de este tipo son en general ácidos orgánicos o jabones. Los carboxilatos se conocen como ácidos grasos y se encuentran en vegetales o grasas de animales, estos tienen una selectividad relativamente baja. Los que más se usan son los de tipo sulfhidrilo, en los que el grupo polar contiene azufre bivalente, son muy selectivos en la flotación de minerales de

sulfuro. Los que se emplean más son los llamados xantogenatos ó xantatos. *Colectores catiónicos*, la propiedad que los distingue es que el catión produce la repulsión al agua cuando el grupo polar se basa en nitrógeno pentavalente, las aminas son las más comunes. Somasundaran [18] encontró que a diferencia de los xantatos las aminas se adsorben sobre la superficie mineral principalmente debido a la atracción electrostática entre la cabeza polar del colector y la doble capa cargada eléctricamente sobre la superficie del mineral. Estos colectores son muy sensitivos al pH, son más activos en soluciones ácidas e inactivos en alcalinas.

En la FIGURA 10 se muestra como es la adsorción con los colectores aniónicos y catódicos en la superficie del mineral.



**FLOTACION CON
COLECTORES
ANIONICOS**

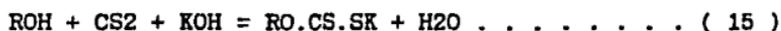
**NO EXISTE
DOBLE CAPA**

**FLOTACION CON
COLECTORES
CATIONICOS**

Fig. 10.- Esquematzación de la flotación con colectores aniónicos y catiónicos.

2.5.3.- Propiedades físicas y químicas del Xantato Etilico de Potasio (colector)

Los xantatos son los más importantes para la flotación de los minerales sulfurados y se preparan haciendo reaccionar un hidróxido alcalino, un alcohol y disulfuro de carbono:



Donde: R es el grupo hidrocarburo que normalmente contiene de uno hasta seis átomos de carbono.

El xantato más utilizado es el etílico y continuando en uso se encuentra el isopropílico, isobutílico, amílico y hexílico. El xantato etílico de potasio es típico y tiene la estructura mostrada en la FIGURA 11.

El anión consiste de un radical no-polar de hidrocarburo y un grupo polar conectado. Se asume que el xantato es adsorbido sobre la superficie del mineral sulfurado debido a fuerzas químicas entre el grupo polar y la superficie, resultando en xantatos insolubles del metal fuertemente hidrofóbico, xantato etílico de plomo [19]. El xantato etílico de potasio tiene la fórmula química siguiente, $C_2H_5OCS_2K$, con un peso molecular de 160 g/mol.

La depresión es atribuida a la fuerte hidratación del cromato adsorbido sobre la superficie por lo que la hidrofobicidad de la capa del colector es vencida, en pocas palabras este cromato es insoluble lo cual aumenta la mojabilidad y evita su flotación. El dicromato de potasio posee la siguiente fórmula química, $K_2Cr_2O_7$ con un peso molecular de 294.188 g/mol.

CAPITULO III

3.1.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.

En este estudio se llevaron a cabo determinaciones de tres tipos de potencial eléctrico con diferentes métodos que son:

- a) potencial zeta
- b) potencial de reposo
- c) potencial en la flotación

Esto con el fin de encontrar la relación que puede existir entre ellos. Para este estudio se contó con mineral de galena puro (99.9 % galena) que sirve para medir potencial zeta y de reposo, mientras que el potencial de la flotación se hace para mineral de galena de alta ley de plomo (40 % de ley de plomo), esto con el fin de obtener información próxima a los procesos reales de flotación.

Medición de potencial zeta.

Como se mencionó en el apartado 2.4, la técnica de electrofóresis es utilizada para encontrar potencial electrocinético, el cual nos sirve para determinar las propiedades superficiales y la estabilidad coloidal de las partículas de mineral con el medio de flotación.

Medición de potencial de reposo.

El potencial de reposo se obtiene por medio de un

electrodo de referencia de calomel y otro de galena pura. Aquí se colocan los dos electrodos uno frente al otro dentro del medio en estudio el cual permanece sin movimiento alguno, el potencial se mide con ayuda de un multímetro conectado a los dos electrodos.

Medición de potencial en la flotación.

Se mide el potencial que se obtiene introduciendo los electrodos de referencia y galena a una celda de flotación nivel laboratorio al momento en que se realiza una flotación de mineral de galena, aquí si hay turbulencia debido a la agitación del mineral y la inyección de aire.

3.1.1.- Metodología experimental para la determinación del potencial zeta.

Para determinar el valor de potencial zeta de la galena a diferentes concentraciones de reactivo colector y depresor con diferentes valores de pH, se utilizó un zetámetro modelo 3.0 plus que se encuentra en el Laboratorio de Metalurgia Extractiva de la Facultad de Química.

El aparato cuenta con una celda de cuarzo especial que contiene un capilar por la parte central en donde viajarán las partículas del mineral cuando se aplique una diferencia de

potencial por medio de dos electrodos de platino, uno de estos electrodos sirve de cátodo y el otro de ánodo, cuando las partículas viajan por el capilar son observadas por medio de un microscopio el cual cuenta con un micrometro que sirve para determinar la velocidad de una partícula, como el aparato cuenta con un cronómetro acoplado; las lecturas de potencial zeta son directas. Cabe mencionar que la velocidad de las partículas se deben al voltaje aplicado (conocido) y a la conductividad de las soluciones. En la FIGURA 12 se muestra esquemáticamente el zetámetro usado para este experimento.

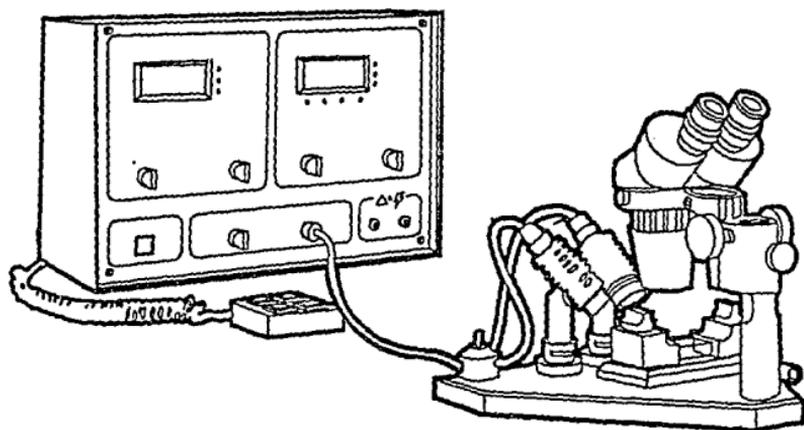


Fig. 12.- Zetámetro 3.0 plus

Condiciones de trabajo:

pH variable: 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.

Concentración de Xantato Etilico de Potasio (colector) variable: 1×10^{-2} M, 1×10^{-3} M, 1×10^{-4} M.

Concentración de Dicromato de Potasio (depresor) variable: 1×10^{-3} M, 1×10^{-4} M, 1×10^{-5} M.

Para cada valor de pH corresponde una concentración de reactivo.

Preparación de mineral de galena.

Para conocer el valor de potencial zeta de una especie en especial es necesario contar con material puro debido a que las impurezas afectan en el valor de potencial, por lo anterior se preparó mineral de galena puro el cual fue molido a una granulometría de - 150 + 200 mallas con ayuda de un mortero de porcelana, la cantidad para utilizada para cada prueba fue del orden de 0.5 grs.

Preparación de las soluciones.

Las soluciones se realizaron apartir de un buffer de borato de sodio - ácido bórico (pH=9), y con ayuda de ácido nítrico al 10 % se ajustaron las pruebas al pH requerido. Las cantidades de reactivo colector como reactivo depresor se

pesaron en una balanza analítica para soluciones con un volumen de .40 ml, debido a la capacidad de la celda del zetámetro tiene un volumen aproximado de 30 ml. Una vez teniendo las condiciones establecidas se agregó el mineral ya molido y se agitó durante 5 minutos esto con el fin de acondicionar bien las partículas de galena. Posteriormente se coloca la solución dentro de la celda conectando bien los electrodos y se empieza a medir los valores de potencial zeta.

3.1.2.- Metodología experimental para la determinación del potencial de reposo.

Para obtener el potencial de reposo de la galena se necesito tener un electrodo de este mineral, las condiciones de trabajo fueron igual a las del potencial zeta que son:

pH variable: 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.

Concentración de Xantato Etilico de Potasio (colector) variable: 1×10^{-2} M, 1×10^{-3} M, 1×10^{-4} M.

Concentración de Dicromato de Potasio (depresor) variable: 1×10^{-3} M, 1×10^{-4} M, 1×10^{-5} M.

Para cada valor de pH corresponde una concentración de reactivo.

El electrodo de galena es sumergido en la solución que se esta analizando y que se encuentra en un vaso de precipitado

de 250 ml y a su lado se coloca el electrodo de referencia, estos electrodos se conectan a un multímetro que nos permite conocer el potencial de reposo.

Preparación de soluciones

Las soluciones con la concentración requerida se prepararon de igual forma como en el apartado 3.1.1, sólo que aquí el volumen fue mayor, 250 ml para cada prueba.

Preparación del electrodo de galena.

El electrodo fue construido a partir de una muestra de mineral puro y cortado con una cortadora de disco de diamante hasta obtener un paralelepípedo con área expuesta de 1 cm^2 . El contacto del electrodo se realizó uniendo un alambre de cobre al mineral de galena por medio de una pintura a base de grafito (conductor) y finalmente montados en resina no conductora. El potencial se midió a partir de un electrodo de calomel y un multímetro. En la FIGURA 13 se puede ver el montaje del electrodo de galena, el de calomel y el multímetro.

Antes de cada experimento, el electrodo de trabajo se somete a un desbastado manual con lija de carburo de silicio de grado 600 y lavado posteriormente con agua destilada.

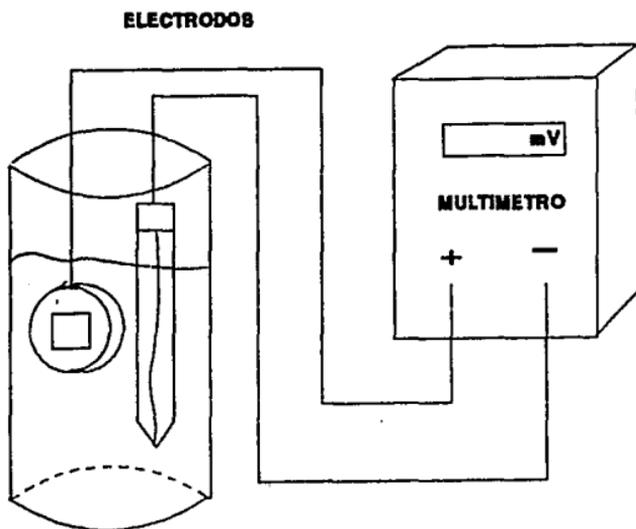


Fig. 13.- Montaje para medir el potencial de reposo

3.1.3.- Metodología experimental para la determinación del potencial en la flotación.

Para medir este potencial se diseñó especialmente un dispositivo que fue adaptado a la celda de flotación, se uso nuevamente el electrodo de galena utilizado en el apartado 3.1.2, con este diseño se evitará la turbulencia de las partículas cuando estas están en agitación constante. El electrodo simula la acción que tienen las partículas de mineral dentro de la celda de flotación, lo anterior supone que las mediciones de potencial de electrodo son las mismas

que esta reportandose en las partículas del mineral. Un multímetro es conectado a las puntas de los electrodos, y así el potencial se puede medir.

Preparación de mineral de galena.

El mineral usado para su flotación es rico en galena, lo anterior para asegurar que las impurezas afecten el potencial. Este mineral se preparó moliendolo en un molino de bolas que se encuentra en el laboratorio de procesamiento de minerales, dejando un tamaño final de -60 +150 mallas por medio de cribas y eliminando a las partículas más finas que afectan en la flotación, esto debido a que estas producen lodos que afectan al consumo de reactivo elevandolo.

Preparación de soluciones.

Las soluciones se prepararon de igual forma que en los apartados 3.1.1 y 3.1.2, sólo que aquí se necesito de un volumen de 1200 ml para cada prueba y con 400 gramos de mineral para tener una concentración de 25 % de sólidos en peso.

Construcción del dispositivo para medición de potencial en la flotación.

El dispositivo que fue diseñado para este trabajo se construyó en el taller mecánico de la Facultad de Química Edif. "D" . El dispositivo consta de una caja de acrílico con orificios en su parte inferior de 1/16 pulg. de diámetro por la cual entra la solución que se encuentra en la celda de flotación y sin permitir la entrada de partículas de mineral las cuales pueden modificar las lecturas, en la parte superior se tienen dos orificios de 1/2 y 1/4 de pulg. de diámetro por donde entran el electrodo de referencia y el de galena respectivamente. El acrílico se corto con ayuda de una sierra mecánica y los orificios que se hicieron con un taladro de mesa con brocas de 1/2, 1/4 y 1/16 de pulg. En las FIGURAS 14 y 15 se muestra el dispositivo con los electrodos adaptado en la celda de flotación.

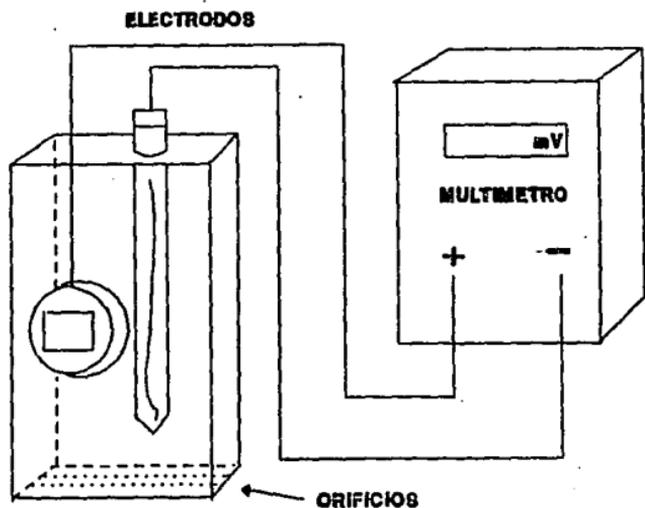


Fig. 14.- Dispositivo para medir el potencial en la flotación

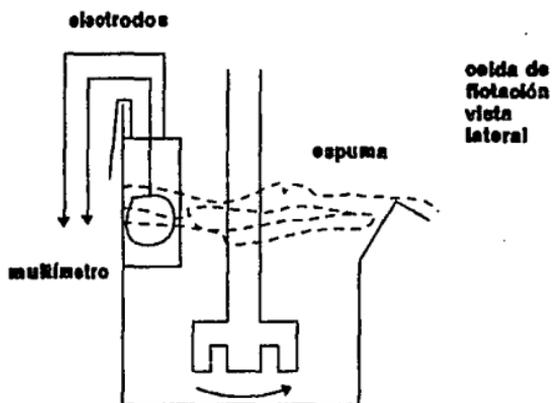
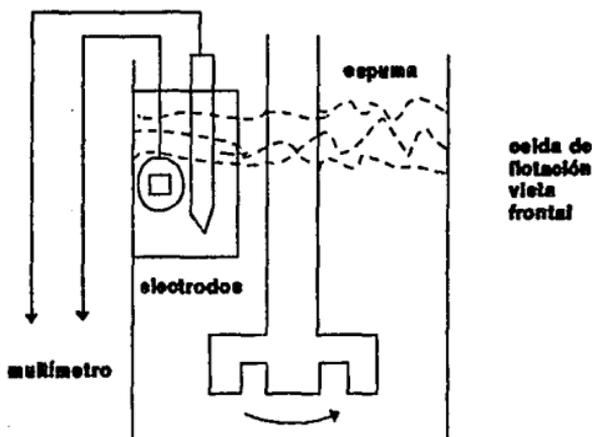


Fig. 15.- Dispositivo para medir el potencial en la flotación dentro de la celda de flotación.

3.1.4.- Reactivos y equipos usados durante el trabajo.

Reactivos utilizados para la experimentación.

- Xantato Etilico de Potasio, Compañía " Industrias Químicas de México "
- Dicromato de Potasio, reactivo analítico, Baker
- Acido bórico, reactivo analítico, Baker
- Borato de sodio, reactivo analítico, Baker
- Agua destilada
- Mineral de galena puro para el electrodo y mineral de galena con ley alta en plomo para flotación, donado por Industrial Minera México, Taxco, Gro.
- Espumante CC-560, Compañía "Industrias Químicas de México"

Equipo para medir el potencial esta, potencial de reposo y potencial de en la flotación.

- Zetámetro modelo 3.0 plus
- pHmetro Corning modelo 125
- Balanza analítica Mettler, modelo AE 240
- Cortadora de disco de diamante LECO modelo Vari/cut vc50
- Pintura de grafito conductora
- Resina no conductora
- Vaso de precipitado de 250 ml
- Multímetro
- Electrodo de referencia de calomel
- Celda de flotación de laboratorio, Denver modelo D-12 Lab.

CAPITULO IV

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION.

Para que el lector tenga un panorama más claro acerca de los resultados obtenidos en la experimentación, estos se dividen de acuerdo al potencial que se trabajo; potencial zeta, potencial de reposo potencial en la flotación, y al final se da la relación que tienen entre si.

4.1.1.- Resultados y discusión de la medición de potencial zeta.

	CONDICION		
	CONCENTRACION		
Prueba # 1	SIN REACTIVO	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 2	XEP [1×10^{-2} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 3	XEP [1×10^{-3} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 4	XEP [1×10^{-4} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 5	DP [1×10^{-3} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 6	DP [1×10^{-4} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 7	DP [1×10^{-5} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.

Donde:

XEP = Xantato Etilico de Potasio

DP = Dicromato de Potasio

Voltaje aplicado para cada prueba (constante) = 50 V

Mediciones de Potencial Zeta en mV para cada condición de concentración de reactivo y pH.

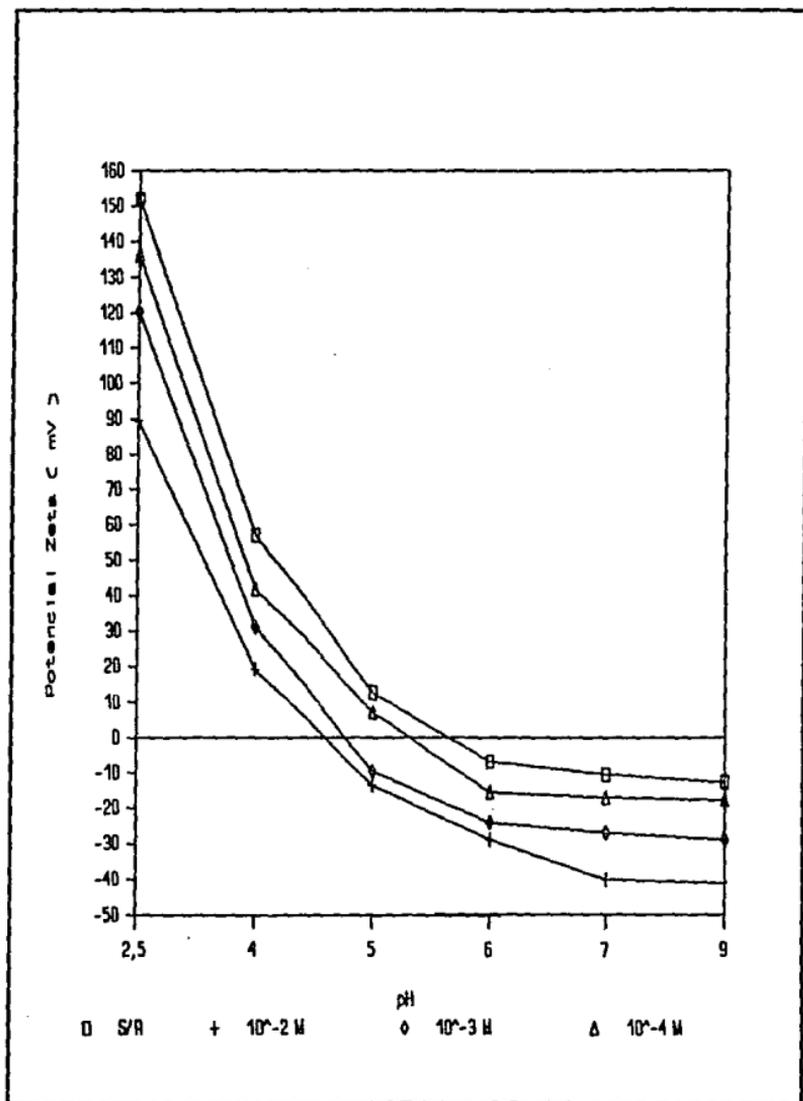
pH =	2.5	4	5	6	7	9
Sin React.	152 mV	57.12 mV	12.64 mV	-6.87 mV	-10.6 mV	-12.6 mV
XEP 10 ⁻² M	89.47 mV	19.20 mV	-13.49 mV	-28.8 mV	-40.0 mV	-41.2 mV
XEP 10 ⁻³ M	120.3 mV	31.14 mV	-9.56 mV	-23.9 mV	-26.8 mV	-28.8 mV
XEP 10 ⁻⁴ M	136.3 mV	41.92 mV	7.21 mV	-15.4 mV	-17.0 mV	-17.5 mV
DP 10 ⁻³ M	152.0 mV	78.58 mV	36.96 mV	----- mV	-16.1 mV	-20.5 mV
DP 10 ⁻⁴ M	150.7 mV	74.99 mV	33.28 mV	-13.1 mV	-20.0 mV	-23.7 mV
DP 10 ⁻⁵ M	141.0 mV	76.0 mV	30.46 mV	-15.4 mV	-21.1 mV	-24.4 mV

Nota:

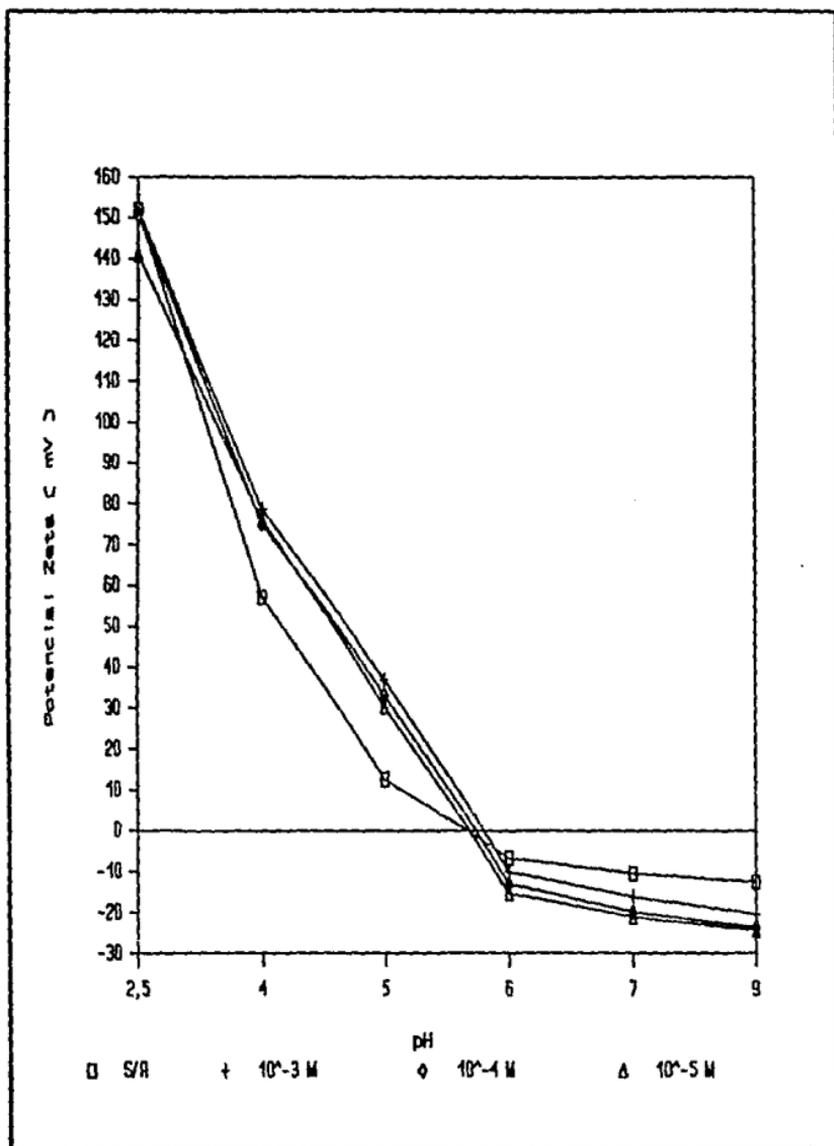
XEP = Xantato etílico de potasio

DP = Dicromato de potasio

--- = no hay medición



Gráfica 1.- Curva de Potencial Zeta vs pH para galena con XEP 10^{-2} M, 10^{-3} M, 10^{-4} M y sin reactivo.



Gráfica 2.- Curva de Potencial Zeta vs pH para galena con DP 10^{-3} M, 10^{-4} M, 10^{-5} M y sin reactivo.

Discusión de los resultados de la medición de potencial zeta.

Se puede observar claramente que el potencial zeta aumenta con la adición de Dicromato de Potasio independientemente del valor de pH que se está manejando, en cambio cuando se trabaja con Xantato Etilico de Potasio, el potencial se reduce, lo cual indica que existe para este último una activación superficial de la partícula del mineral. Lo anterior se debe a que el DP tiende a formar cromato de plomo sobre la superficie de la galena polarizándola y aumentando así su carga superficial haciéndola más catiónica [27], mientras el XEP tiene el efecto contrario, oxida a la superficie y la activa, así la carga superficial disminuye.

En la gráfica 1, el comportamiento del potencial zeta se observa para el XEP con diferentes concentraciones en función del pH, y se tiene que los valores de potencial zeta igual a cero se encuentran en el intervalo comprendido de pH igual a 4.5 - 5.6, esto indica que se tratan de puntos isocelétricos, ya que nunca llegan a juntarse en un punto en especial cuando su carga superficial es cero. Este desplazamiento se puede deber a varios factores como son la temperatura de las soluciones dentro del tubo capilar de la celda y a las posibles burbujas formadas dentro de la misma celda formando una presión que hace que las partículas no viajen como deben ser. Para el dicromato de potasio si se observa el punto de

carga cero esto en la gráfica 2, aquí las curvas tienden a juntarse a un valor de potencial zeta igual a cero en pH = 5.6 aprox., este punto es de suma importancia, ya que en un proceso de flotación en este valor de pH, el mineral de galena no sería conveniente concentrarlo porque no habría recuperación, Fuerstenau y Urbina [22], demostraron que la recuperación del cuarzo en su punto de carga cero era casi nula.

4.1.2.- Resultados y discusión de la medición de potencial de reposo.

CONDICION

CONCENTRACION

Prueba # 8	SIN REACTIVO	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 9	XEP [1×10^{-2} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 10	XEP [1×10^{-3} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 11	XEP [1×10^{-4} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 12	DP [1×10^{-3} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 13	DP [1×10^{-4} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.
Prueba # 14	DP [1×10^{-5} M]	a	pH = 2.5, 4, 5, 6, 7, 9.

Para cada valor de concentración de reactivo corresponde un valor de pH y el tiempo de espera es independiente, sólo se toma la lectura cuando ésta se estabiliza.

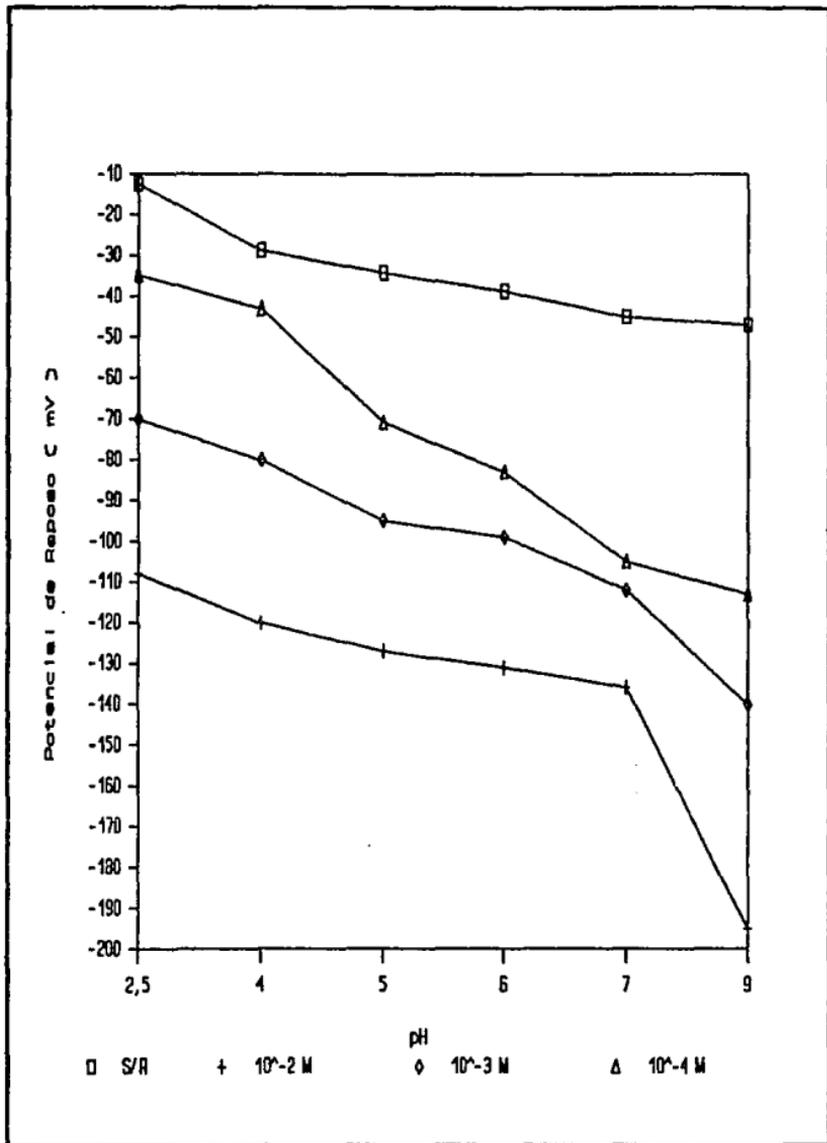
Mediciones de Potencial de Reposo en mV para cada condición de concentración de reactivo.

pH =	2.5	4	5	6	7	9
Sin React.	-12.5 mV	-28.7 mV	-34.2 mV	-38.7 mV	-45 mV	-47 mV
XEP 10^{-2} M	-108 mV	-120 mV	-127 mV	-131 mV	-136 mV	-195 mV
XEP 10^{-3} M	-70.0 mV	-80 mV	-95 mV	-99 mV	-112 mV	-140 mV
XEP 10^{-4} M	-34.8 mV	-43 mV	-71 mV	-83 mV	-105 mV	-113 mV
DP 10^{-3} M	181 mV	145 mV	142 mV	132 mV	106 mV	-32 mV
DP 10^{-4} M	107 mV	91.1 mV	86.4 mV	79 mV	72.6 mV	-41.8 mV
DP 10^{-5} M	88.9 mV	84.9 mV	80.2 mV	77.5 mV	69 mV	-46.8 mV

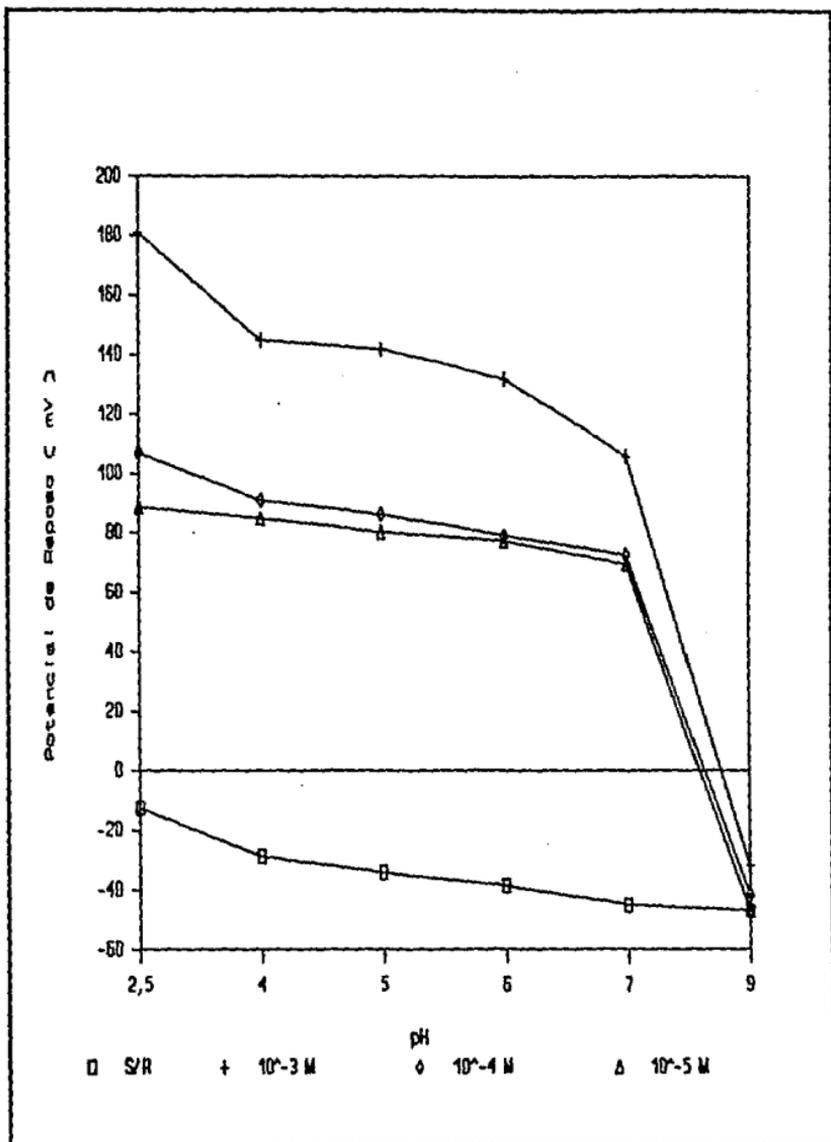
Nota:

XEP = Xantato etílico de potasio

DP = Dicromato de potasio



Gráfica 3.- Curva de Potencial de Reposo vs pH para galena con XEP 10⁻² M, 10⁻³ M, 10⁻⁴ M y sin reactivo.



Gráfica 4.- Curva de Potencial de Reposo vs pH para galena con DP 10^{-3} M, 10^{-4} M, 10^{-5} M y sin reactivo.

Discusión de los resultados de la medición de potencial de reposo.

Al adicionar el XEP, el potencial de reposo tiende a desplazarse hacia potenciales más negativos (activación) a medida que se aumenta su concentración, para pH de 2.5 son valores no muy altos en comparación a los que se tienen a pH de 9 que son los más negativos, lo anterior se debe a que el XEP se descompone más rápido, esto lo observó Arturo J. H. en su tesis de licenciatura [23].

Para el dicromato sucede lo contrario, a medida que se eleva el pH el potencial de reposo es más positivo inclusive sólo se observa el cambio de signo a pH muy básico, este valor es de 9, esto debido a la polarización (pasivación) que hace el DP a la superficie de la galena cuando se forma cromato de plomo.

Otra consideración que hay que tomar es que aquí no hay agitación, lo cual hace que el potencial se comporte estable en la superficie del mineral.

4.1.3.- Resultados y discusión de la medición de potencial en la flotación y balances metalúrgicos.

En base a los resultados previos de potencial zeta y de

reposo, se seleccionó una serie de condiciones de flotación, no es posible hacer una prueba para cada condición como anteriormente se hizo esto porque no hay suficiente mineral disponible.

A continuación se muestran las condiciones que se seleccionaron para hacer la flotación:

CONDICION

CONCENTRACION

Prueba # 15	SIN REACTIVO	a pH = 9
Prueba # 16	XEP [1×10^{-2} M]	a pH = 9
Prueba # 17	XEP [1×10^{-3} M]	a pH = 9
Prueba # 18	XEP [1×10^{-4} M]	a pH = 9
Prueba # 19	DP [1×10^{-3} M]	a pH = 9
Prueba # 20	DP [1×10^{-4} M]	a pH = 6
Prueba # 21	DP [1×10^{-5} M]	a pH = 6
Prueba # 22	XEP [1×10^{-2} M] + DP [1×10^{-3} M]	a pH = 9
Prueba # 23	XEP [1×10^{-2} M] + DP [1×10^{-3} M]	a pH = 6

Donde:

XEP = Xantato etílico de potasio

DP = Dicromato de potasio

Las mediciones de potencial se tomaron cada 15 segundos hasta un valor de 7 minutos, después éstas fueron registradas cada

minuto hasta llegar a un valor de 10 minutos, lo anterior se hizo para asegurar que la recuperación de mineral sea total.

Para las muestras de concentrado de mineral de galena se tomaron en 9 tiempos esto para tener un buen balance metalúrgico al final de la flotación. El volumen de espumante fue de 0.1 ml para cada flotación, antes de hacer las flotaciones se realizaron pruebas de espumante para seleccionar cual era el más idóneo para nuestro caso, al final resulto que el espumante CC-560 formaba una espuma resistente con un volumen de 0.1 ml.

Balances metalúrgicos.

Los balances metalúrgicos completos sólo se hicieron para las siguientes pruebas:

Prueba # 16 XEP [1×10^{-2} M] a pH = 9

Prueba # 17 XEP [1×10^{-3} M] a pH = 9

Prueba # 22 XEP [1×10^{-2} M] + DP [1×10^{-3} M] a pH = 9

Prueba # 23 XEP [1×10^{-2} M] + DP [1×10^{-3} M] a pH = 6

Esto debido a que las demás pruebas no se tuvo la cantidad necesaria de concentrado para hacer algún balance, aunque se reportan los datos que se obtuvieron.

PRUEBA # 15 SIN REACTIVO pH= 9

Peso de mineral = 400 grs.

Volumen de líquido = 1200 ml.

Velocidad de agitación = 2100 rpm

Potencial antes de agregar el reactivo (sin aire) = -119.1 mV

Tiempo de acondicionamiento = 6 min

Potencial después de agregar el reactivo = S/adición de reac.

Tiempo de acondicionamiento para el espumante = 1 min

t, min	mV	t, min	mV	t, min	mV
0	-123.9	2.45	-124.4	5.30	-125
15 seg	-124.3	3	-124.4	5.45	-125.1
30 seg	-124.4	3.15	-124.6	6	-125.5
45 seg	-124.1	3.30	-124.5	6.15	-125.9
1	-124.9	3.45	-124.5	6.30	-126
1.15	-124.6	4	-124.4	6.45	-126.2*
1.30	-124.6	4.15	-124.4	7	-128.4
1.45	-124.6	4.30	-124.4	8	-131.2
2	-124.4	4.45	-124.4	9	-130.2
2.15	-124.4	5	-124.5	10	-130.7
2.30	-124.2	5.15	-124.7		

* Adición de agua

PRUEBA # 16 XEP [1X10⁻² M] pH= 9

Peso de mineral = 400 grs.

Volumen de líquido = 1200 ml.

Velocidad de agitación = 2100 rpm

Potencial antes de agregar el reactivo (sin aire) = -119 mV

Tiempo de acondicionamiento = 6 min

Potencial después de agregar el reactivo (sin aire) = -210 mV

Tiempo de acondicionamiento para el espumante = 1 min

t, min	mV	t, min	mV	t, min	mV
0	-216	2.45	-212	5.30	-209
15 seg	-215	3	-211	5.45	-210
30 seg	-216	3.15	-208	6	-210
45 seg	-215	3.30	-207	6.15	-209
1	-214	3.45	-203	6.30	-209
1.15	-214	4	-203	6.45	-209
1.30	-212	4.15	-205	7	-208
1.45	-215	4.30	-206	8	-214
2	-214	4.45	-203	9	-192
2.15	-214	5	-203	10	-178
2.30	-214	5.15	-207		

PRUEBA # 17 XEP [1×10^{-3} M] pH= 9

Peso de mineral = 400 grs.

Volumen de líquido = 1200 ml.

Velocidad de agitación = 2100 rpm

Potencial antes de agregar el reactivo (sin aire) = -126 mV

Tiempo de acondicionamiento = 6 min

Potencial después de agregar el reactivo (sin aire) = -154 mV

Tiempo de acondicionamiento para el espumante = 1 min

t, min	mV	t, min	mV	t, min	mV
0	-147.3	2.45	-147.2	5.30	-150
15 seg	-146.9	3	-147.4	5.45	-151.5
30 seg	-146.8	3.15	-148	6	-151
45 seg	-147.3	3.30	-148.5	6.15	-151.5
1	-147.3	3.45	-148.1	6.30	-150.9
1.15	-147.2	4	-148	6.45	-150.4
1.30	-147.2	4.15	-148.5	7	-150.3
1.45	-147.3	4.30	-148.1	8	-148.4
2	-147.2	4.45	-148.5	9	-148.8
2.15	-146.9	5	-148.7	10	-149.1
2.30	-146.4	5.15	-149		

PRUEBA # 18 XRP [$1 \times 10^{-4} M$] pH= 9

Peso de mineral = 400 grs.

Volumen de líquido = 1200 ml.

Velocidad de agitación = 2100 rpm

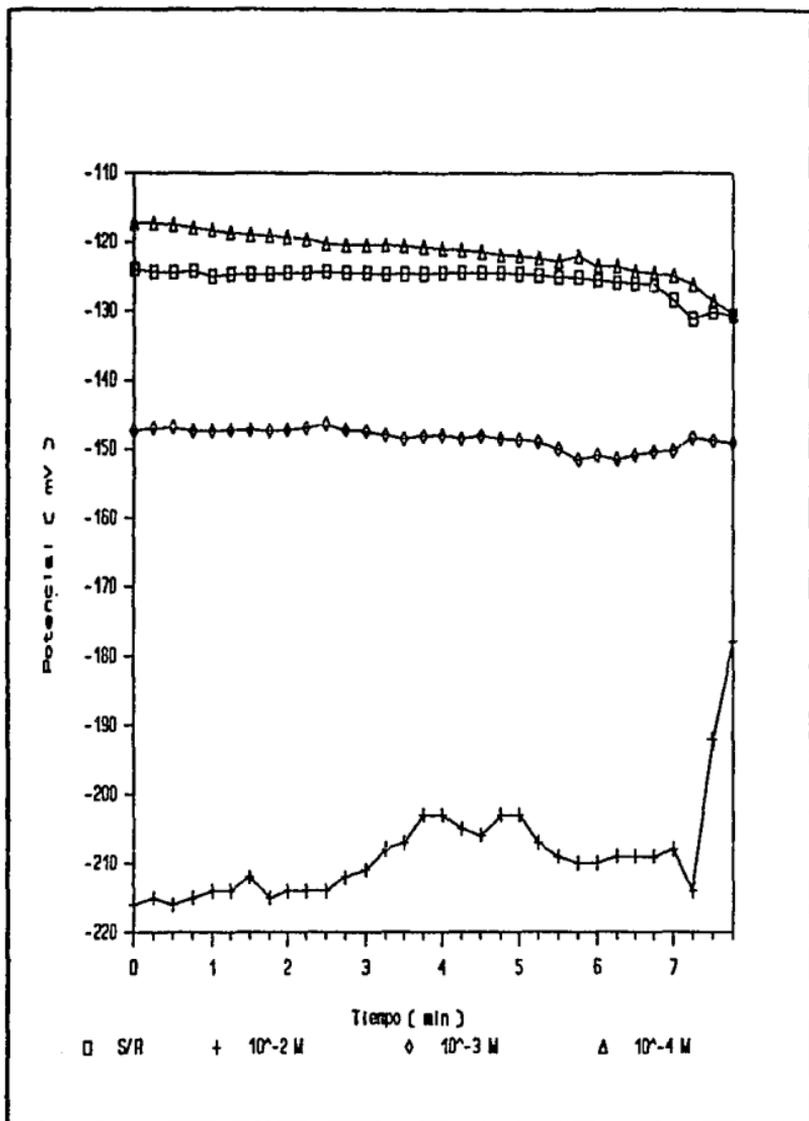
Potencial antes de agregar el reactivo (sin aire) = -117 mV

Tiempo de acondicionamiento = 6 min

Potencial después de agregar el reactivo = -115 mV

Tiempo de acondicionamiento para el espumante = 1 min

t, min	mV	t, min	mV	t, min	mV
0	-117.2	2.45	-120.4	5.30	-122.7
15 seg	-117.2	3	-120.4	5.45	-122
30 seg	-117.5	3.15	-120.4	6	-123.5
45 seg	-117.9	3.30	-120.5	6.15	-123.5
1	-118.2	3.45	-120.6	6.30	-124.2
1.15	-118.6	4	-120.9	6.45	-124.5
1.30	-118.9	4.15	-121.1	7	-124.9
1.45	-119.1	4.30	-121.4	8	-126.2
2	-119.2	4.45	-121.8	9	-128.6
2.15	-119.5	5	-121.9	10	-130.4
2.30	-120.2	5.15	-122.3		



Gráfica 5.- Curva de Potencial de Flotación vs Tiempo para galena con XEP 10^{-2} M, 10^{-3} M, 10^{-4} M y sin reactivo a pH = 9.

PRUEBA # 19 DP [1X10⁻³ M] pH= 9

Peso de mineral = 400 grs.

Volumen de líquido = 1200 ml.

Velocidad de agitación = 2100 rpm

Potencial antes de agregar el reactivo (sin aire) = -131.5 mV

Tiempo de acondicionamiento = 6 min

Potencial después de agregar el reactivo (sin aire) = -46.9 mV

Tiempo de acondicionamiento para el espumante = 1 min

t, min	mV	t, min	mV	t, min	mV
0	-47.4	2.45	-50.1	5.30	-53.5
15 seg	-47.6	3	-50.5	5.45	-53.7
30 seg	-47	3.15	-50.5	6	-53.9
45 seg	-47.7	3.30	-50.8	6.15	-54.2
1	-48.1	3.45	-51.2	6.30	-54.4
1.15	-48.5	4	-51.5	6.45	-54.8
1.30	-48.6	4.15	-51.7	7	-55
1.45	-48.6	4.30	-52.1	8	-55.7*
2	-48.8	4.45	-52.6	9	-56.5
2.15	-49.5	5	-53.1	10	-57.1
2.30	-49.8	5.15	-53.3		

Prueba # 20 DP [1X10⁻⁴ M] pH= 6

Peso de mineral = 400 grs.

Volumen de líquido = 1200 ml.

Velocidad de agitación = 2100 rpm

Potencial antes de agregar el reactivo (sin aire) = -188 mV

Tiempo de acondicionamiento = 6 min

Potencial después de agregar el reactivo (sin aire) = -56 mV

Tiempo de acondicionamiento para el espumante = 1 min

t, min	mV	t, min	mV	t, min	mV
0	-69.1	2.45	-69	5.30	-74.7
15 seg	-68.7	3	-70.3	5.45	-73.7
30 seg	-67.1	3.15	-71.4	6	-73.2
45 seg	-66.5	3.30	-72.4	6.15	-72.8
1	-66.4	3.45	-72.8	6.30	-72.3
1.15	-66.3	4	-73.3	6.45	-72.2
1.30	-66.2	4.15	-73.4	7	-71.8
1.45	-67 **	4.30	-73	8	-70.5
2	-66.9	4.45	-74.3	9	-71.9
2.15	-66.9	5	-73.9	10	-72
2.30	-66.8	5.15	-75.9 **		

** aire

Peso de mineral = 400 grs.

Volumen de líquido = 1200 ml.

Velocidad de agitación = 2100 rpm

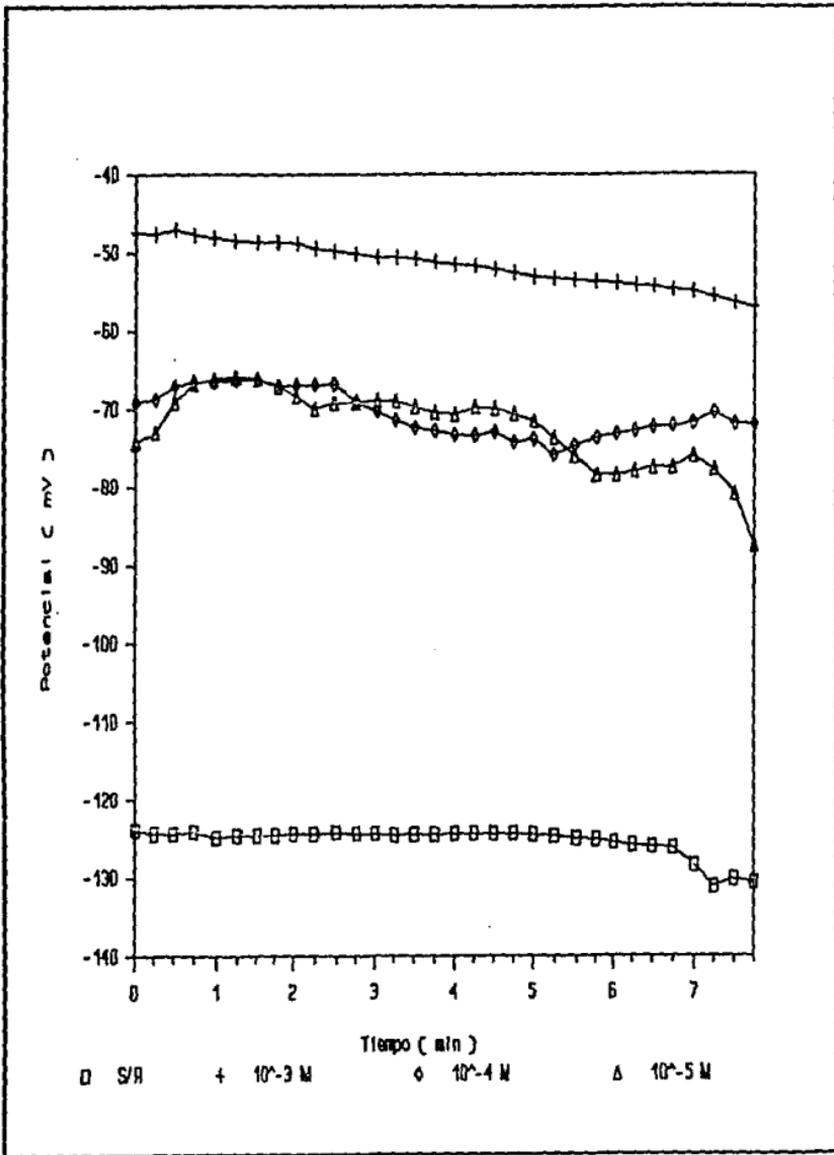
Potencial antes de agregar el reactivo (sin aire) = -122 mV

Tiempo de acondicionamiento = 8 min

Potencial después de agregar el reactivo (sin aire) = -76 mV

Tiempo de acondicionamiento para el espumante = 1 min

t, min	mV	t, min	mV	t, min	mV
0	-74.3	2.45	-69.1	5.30	-76
15 seg	-73	3	-68.9	5.45	-78.5
30 seg	-69.1	3.15	-69	6	-78.5
45 seg	-66.8	3.30	-69.7	6.15	-78
1	-66.2	3.45	-70.5	6.30	-77.5
1.15	-65.9	4	-70.7	6.45	-77.5
1.30	-66.1	4.15	-69.8	7	-76
1.45	-67	4.30	-70	8	-77.8
2	-68.3	4.45	-70.7	9	-80.9
2.15	-70	5	-71.6	10	-87.5
2.30	-69.2	5.15	-73.7		



Gráfica 6.- Curva de Potencial de Flotación vs Tiempo para galena con DP 10^{-3} M a pH = 9, DP 10^{-4} M, 10^{-5} M a pH = 6 y sin reactivo a pH = 9.

PRUEBA # 22 XEP [1×10^{-2} M] + DP [1×10^{-3} M] pH= 9

Peso de mineral = 400 grs.

Volumen de líquido = 1200 ml.

Velocidad de agitación = 2100 rpm

Potencial antes de agregar el reactivo (sin aire) = -111 mV

Tiempo de acondicionamiento para XEP = 5 min

Potencial después de agregar el XEP (s/aire) = -210 mV

Tiempo de acondicionamiento para DP = 2 min

Potencial después de agregar el DP (sin aire) = -206 mV

Tiempo de acondicionamiento para el espumante = 1 min

t, min	mV	t, min	mV	t, min	mV
0	-206	2.45	-195	5.30	-195
15 seg	-205	3	-195	5.45	-196
30 seg	-202	3.15	-195	6	-196
45 seg	-200	3.30	-194	6.15	-196
1	-200	3.45	-195	6.30	-195
1.15	-197	4	-195	6.45	-195
1.30	-197	4.15	-195	7	-195
1.45	-195	4.30	-194	8	-194
2	-195	4.45	-195	9	-194
2.15	-195	5	-196	10	-193
2.30	-195	5.15			

PRUEBA # 23 XEP [1×10^{-2} M] + DP [1×10^{-3} M] pH= 6

Peso de mineral = 400 gra.

Volumen de líquido = 1200 ml.

Velocidad de agitación = 2100 rpm

Potencial antes de agregar el reactivo (sin aire) = -121 mV

Tiempo de acondicionamiento para XEP = 5 min

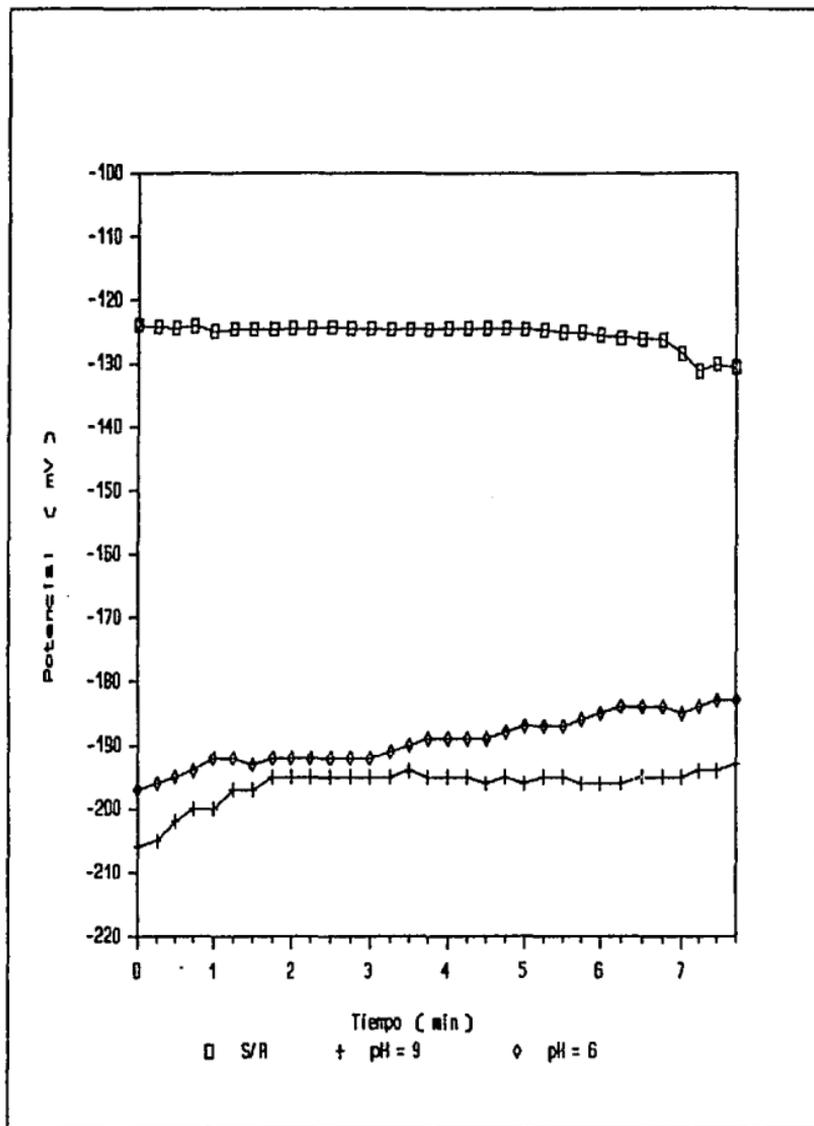
Potencial después de agregar el XEP (sin aire) = -210 mV

Tiempo de acondicionamiento para DP = 2 min

Potencial después de agregar el DP (sin aire) = -202 mV

Tiempo de acondicionamiento para el espumante = 1 min

t, min	mV	t, min	mV	t, min	mV
0	-197	2.45	-192.2	5.30	-187
15 seg	-196	3	-192.5	5.45	-186
30 seg	-195.4	3.15	-191.9	6	-185.9
45 seg	-194.2	3.30	-190.5	6.15	-184.2
1	-192.7	3.45	-189.2	6.30	-184.4
1.15	-192.7	4	-189.9	6.45	-184.3
1.30	-193.2	4.15	-189.3	7	-185.7
1.45	-192.8	4.30	-188.7	8	-184.3
2	-192.3	4.45	-188.3	9	-183.7
2.15	-192.2	5	-188.4	10	-183.3
2.30	-192.5	5.15	-187.2		



Gráfica 7.- Curva de Potencial de Flotación vs Tiempo para galena con XEP 10^{-2} M + DP 10^{-3} M con pH de 9 y 6 respectivamente y sin reactivo con pH de 9.

Balances metalúrgicos

Prueba # 15 sin reactivo pH = 9

Pro-ducto	Tiempo (min)	Peso (grs)	% Pb	C.M.	% Rec.	% Rec. acum.
Alim.	0	396.2	38.71	153.38	100	0.0
1	10	9.2	56.1	5.16	3.36	3.36
Colas		387	38.3	148.22	96.64	

Concentrado metálico a los 10 minutos = 5.16 grs.

% en Ley de Plomo a los 10 minutos = 56.10 %

Prueba # 18 XEP [1X10⁻⁴ M] pH = 9

Pro-ducto	Tiempo (min)	Peso (grs)	% Pb	C.M.	% Rec.	% Rec. acum.
Alim.	0	390.7	39.01	152.39	100	0.0
1	10	8.2	57.90	4.75	3.12	3.12
Colas		382.5	38.60	147.65	96.89	

Concentrado metálico a los 10 minutos = 4.75 grs.

% en Ley de Plomo a los 10 minutos = 57.90 %

Prueba # 19 DP [1X10⁻³ M] pH = 9

Pro-ducto	Tiempo (min)	Peso (grs)	% Pb	C.M.	% Rec.	% Rec. acum.
Alim.	0	384.3	39.92	153.40	100	0.0
1	10	8.2	57.60	1.44	0.94	0.94
Colas		381.8	39.80	151.96	99.06	

Concentrado metálico a los 10 minutos = 1.44 grs

% en Ley de Plomo a los 10 minutos = 57.60 %

Prueba # 20 DP [1X10⁻⁴ M] pH = 6

Pro-ducto	Tiempo (min)	Peso (grs)	% Pb	C.M.	% Rec.	% Rec. acum.
Alim.	0	389.5	39.32	153.16	100	0.0
1	10	5.5	54.90	3.02	1.97	1.97
Colas		384.0	39.10	150.14	98.03	

Concentrado metálico a los 10 minutos = 3.02

% en Ley de Plomo a los 10 minutos = 54.90 %

Prueba # 16 XEP [1×10^{-2} M] pH = 9

Pro- ducto	Tiempo (min)	Peso (grs)	% Pb	C.M.	% Rec.	% Rec. acum.
Alim.	0	395.6	39.24	155.2	100.0	0.0
1	0.3	91.4	47.50	43.42	27.97	27.97
2	0.6	43.2	47.10	20.35	13.11	41.07
3	1	45.8	47.70	21.85	14.07	55.15
4	1.5	47.2	46.10	21.76	14.02	69.16
5	2	49.0	41.20	20.19	13.00	82.17
6	3	51.0	42.40	21.62	13.93	96.10
7	5	13.0	33.00	4.29	2.76	98.86
8	7	1.2	30.30	0.36	0.23	99.09
9	10	1.0	30.00	0.30	0.19	99.29
Colas		52.8	2.10	1.11	0.71	

Concentrado metálico a los 10 minutos = 154.13

% en Ley de Plomo a los 10 minutos = 44.96 %

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Pro- ducto	Tiempo (min)	Peso (grs)	% Pb	C.M.	% Rec.	% Rec. acum.
Alim.	0	393.8	38.88	153.1	100.0	0.0
1	0.3	34.2	58.80	20.11	13.13	13.13
2	0.6	26.8	52.00	13.94	9.10	22.24
3	1	24.2	52.50	12.71	8.30	30.53
4	1.5	30.1	53.90	16.22	10.60	41.13
5	2	32.0	52.06	16.66	10.88	52.01
6	3	35.2	50.50	17.78	11.61	63.62
7	5	39.3	47.00	18.47	12.06	75.68
8	7	32.1	53.10	17.05	11.13	86.82
9	10	36.0	48.00	17.28	11.29	98.10
Colas		103.9	2.80	2.91	1.90	

Concentrado metálico a los 10 minutos = 150.21 grs

% en Ley de Plomo a los 10 minutos = 51.81 %

Prueba # 22 XEP [1X10⁻² M] + DP [1X10⁻³ M] pH = 9

Pro- ducto	Tiempo (min)	Peso (grs)	% Pb	C.M.	% Rec.	% Rec. acum.
Alim.	0	394.30	38.81	153.0	100.0	0.0
1	0.3	54.20	57.70	31.27	20.43	20.43
2	0.6	36.20	51.30	18.57	12.13	32.53
3	1	34.20	50.70	17.34	11.33	43.86
4	1.5	37.30	54.10	20.18	13.18	51.04
5	2	23.50	55.00	12.93	8.45	65.09
6	3	25.00	58.00	14.50	9.47	74.56
7	5	27.30	66.90	18.26	11.93	86.49
8	7	25.20	43.10	10.86	7.09	93.58
9	10	12.40	25.40	3.15	2.05	95.63
Colas		119.0	5.00	5.95	3.88	

Concentrado metálico a los 10 minutos = 147.05 grs

% en Ley de Plomo a los 10 minutos = 53.42 %

Prueba # 23 KEP [1×10^{-2} M] + DP [1×10^{-3} M] pH = 6

Pro- ducto	Tiempo (min)	Peso (gms)	% Pb	C.M.	% Rec.	% Rec. acum.
Alim.	0	394.90	37.62	148.5	100.0	0.0
1	0.3	37.30	76.00	28.35	19.08	19.08
2	0.6	34.20	51.90	17.75	11.95	31.03
3	1	33.70	48.60	16.38	11.03	42.06
4	1.5	26.00	68.00	17.38	11.90	53.96
5	2	24.80	70.00	17.36	11.69	65.65
6	3	32.00	55.10	17.63	11.87	77.52
7	5	28.40	29.70	8.43	5.68	83.20
8	7	24.10	37.00	8.92	6.00	89.20
9	10	11.00	39.00	4.29	2.89	92.09
Colas		143.40	8.20	11.76	7.92	

Concentrado metálico a los 10 minutos = 136.79 gra

% en Ley de Plomo a los 10 minutos = 54.39 %

Prueba # 21 DP [1X10⁻⁵ M] pH = 6

Pro- ducto	Tiempo (min)	Peso (grs)	% Pb	C.M.	% Rec.	% Rec. acum.
Alim.	0	394.5	38.34	151.25	100.0	0.0
1	10	8.20	54.40	4.46	2.95	2.95
Colas		386.3	38.00	146.79	97.05	

Concentrado metálico a los 10 minutos = 4.46 grs.

% en Ley de Plomo a los 10 minutos = 54.4 %

Comparación de potenciales en la flotación con los contenidos metálicos, % de recuperación, % en ley de plomo para cada prueba.

Prueba # 15 SIN REACTIVO a pH = 9
 Prueba # 16 XEP [1X10⁻² M] a pH = 9
 Prueba # 17 XEP [1X10⁻³ M] a pH = 9
 Prueba # 18 XEP [1X10⁻⁴ M] a pH = 9
 Prueba # 19 DP [1X10⁻³ M] a pH = 9
 Prueba # 20 DP [1X10⁻⁴ M] a pH = 6
 Prueba # 21 DP [1X10⁻⁵ M] a pH = 6
 Prueba # 22 XEP [1X10⁻² M] + DP [1X10⁻³ M] a pH = 9
 Prueba # 23 XEP [1X10⁻² M] + DP [1X10⁻³ M] a pH = 6

Prueba	# 15	# 16	# 17	# 18	# 19
P.A.R. mV	-119	-119	-126	-117	-131.5
P.D.R. mV	-119	-210	-154	-115	-46.9
P.D.F. mV	-124.6	-210	-148	-121.6	-51.06
C.M. grs.	5.16	154.13	150.2	4.74	1.44
% de Recup.	3.36	99.28	98.1	3.11	0.94
% en ley Pb	56.1	44.96	51.81	57.9	57.6

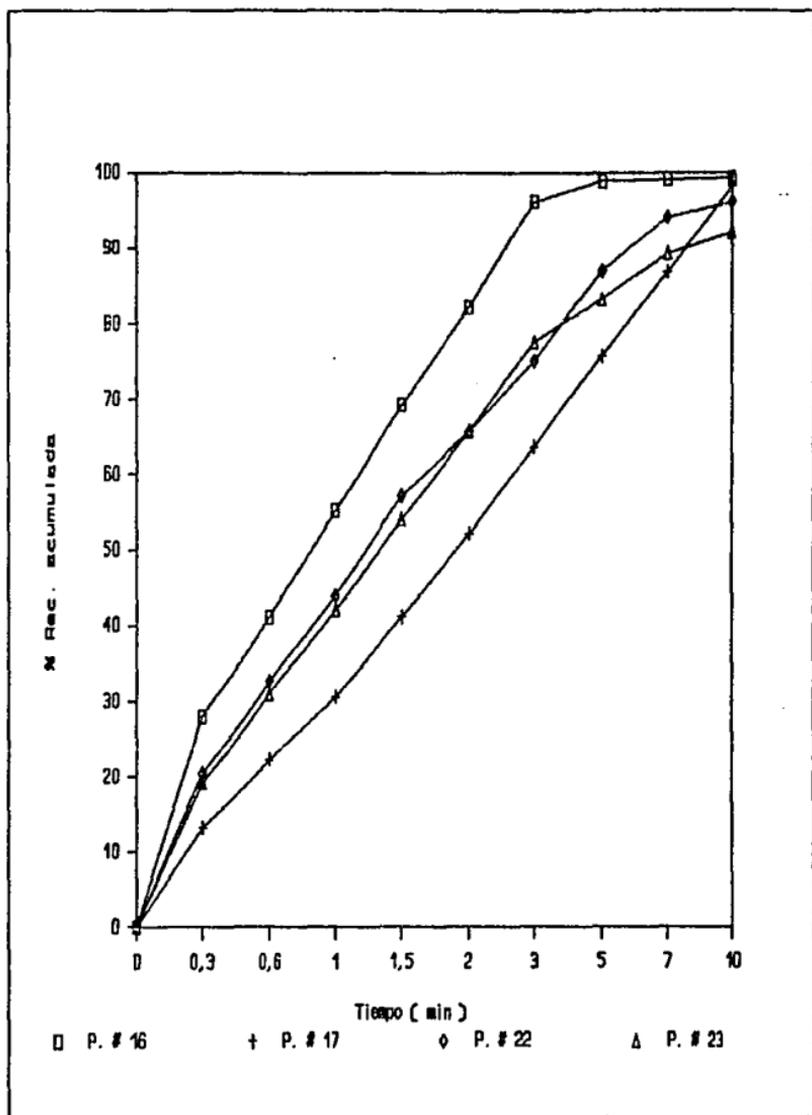
Prueba	# 20	# 21	# 22	# 23	
P.A.R. mV	-118	-122	-111	-121	
P.D.R. mV	-56	-76	-210	-202	
P.D.F. mV	-70.6	-71.9	-196	-189	
C.M. grs	3.01	4.46	147.06	136.78	
% de Recup.	1.97	2.95	96.11	92.89	
% en ley Pb	54.9	54.4	53.42	54.39	

Donde : P.A.R. = Potencial antes de agregar el reactivo.

P.D.R. = Potencial después de agregar el reactivo.

P.D.F. = Potencial promedio durante la flotación

El contenido metálico, % de recuperación y % de ley de plomo es para el tiempo de 10 minutos que dura cada flotación.



Gráfica B.- Curva de % de Recuperación acumulada vs Tiempo para las pruebas de flotación # 16, # 17, # 22 y # 23.

Discusión de los resultados de la medición de potencial en la flotación y de los balances metalúrgicos.

Antes de agregar cualquier reactivo al proceso de flotación, el potencial fue medido con el fin de verificar que todas las pruebas fueran representativas entre sí y que partieran de un mismo intervalo de medición, el potencial efectivamente era muy parecido para cada prueba teniendo como un promedio de -119.8 mV vs. SCE con una desviación estándar de 5.39 mV, esto se logró tomando las debidas precauciones como son, la correcta instalación de los instrumentos de medición, el lavado del equipo de flotación y de medición ya que puede contener residuos de reactivo de la prueba anterior, lo cual alteraría la medición de potencial.

Al adicionar el reactivo colector, que es el xantato etílico de potasio (XEP) se observó que el potencial se volvía más anódico (más negativo), lo cual indica que las partículas de galena se activan, entre más grande sea la concentración de XEP el potencial es más anódico, en el caso de la prueba con la concentración de XEP 1×10^{-2} M el potencial bajo de -119 mV hasta -210 mV lo cual indica que el mineral está completamente activado, para la demás pruebas donde se usa el XEP se tuvo un potencial de -154 mV para la concentración de 1×10^{-3} M y de -115 mV para la de 1×10^{-4} M. Para el caso del dicromato de potasio (DP) que es el depresor sucede lo contrario, las

partículas se pasivan a medida que aumenta la concentración de DP haciéndose el potencial más catiónico (más positivo), para el caso de DP 1×10^{-3} M que es la concentración más grande se tiene un potencial de inicio de -131.5 mV a uno de -46.9 mV al final, este comportamiento se observó para las demás pruebas que fueron de -56 mV y -76 mV para las concentraciones de DP 1×10^{-4} M y 1×10^{-5} M respectivamente.

También se propusieron dos casos particulares los cuales consistían en combinar el XEP con el DP para observar el comportamiento del potencial, las concentraciones de los dos reactivos fueron iguales (XEP 10^{-2} M + DP 10^{-3} M) para los dos casos sólo que el pH no fue el mismo, una prueba se efectuó con pH = 9 y otra con pH = 6, en el primer caso el potencial fue de -196 mV y el otro caso de -186 mV, se observa que los dos potenciales tienen una diferencia de tan sólo de -7 mV, lo cual indica que el pH no afecto demasiado al potencial.

El aire y la agitación presentes en la flotación modifican considerablemente a los potenciales con respecto a los obtenidos por la técnica de potencial de reposo, lo anterior se debe a que la agitación no permite la formación de cromato de plomo en la superficie de la galena debido al dicromato de potasio, y por otra parte la formación de xantato etílico de plomo debido por el xantato etílico de potasio.

Durante la flotación los potenciales no varían mucho, lo cual nos permitió tomar un promedio para cada prueba y reportarlo como el que se tiene durante toda la flotación, este potencial es de suma importancia dentro del presente trabajo ya que este nos permite tener una base para seleccionar las condiciones más idóneas para flotar al mineral de galena.

Como se observa en la tabla de resultados existen valores de potencial de flotación muy variados, de -210 mV que es el más negativo hasta el de -51.06 mV que es el más alto, y al compararlos con los balances metalúrgicos se tiene que en todas las pruebas donde el potencial abajo de -148 mV, se tiene un concentrado de galena por lo que las pruebas # 15, # 18, # 19, # 20 y # 21 que tienen valores altos de potencial cuentan con concentrado muy pobre de mineral.

Las pruebas #16, #17, #22 y # 23 se obtuvieron potenciales de -210 mV, -148 mV, -196 mV y -189 mV respectivamente, lo anterior indica que la prueba # 16 es la que tiene la concentración de galena más grande debido a que su potencial es muy negativo, y efectivamente en esta prueba se utilizó la concentración más alta de reactivo colector (1×10^{-2} M) teniendo como recuperación el 99.28 % de mineral, cabe mencionar que las demás pruebas las recuperaciones fueron también altas, para las pruebas # 17, # 22 y # 23, son de 98.10 %, 96.11 % y 92.89 % respectivamente, solo que para

llegar a estas recuperaciones se tuvo que flotar hasta el minuto 10, en cambio para la prueba # 16 al minuto 3 ya se tenía una recuperación bastante elevada, en cuanto a las leyes son del orden del 50 % de ley de plomo, la más baja se tuvo en la prueba # 16, que es de 44.96 %, esto debido a que el colector activo a otros especies que se encontraban en el mineral como pudieran ser los sulfuros de fierro o zinc.

En los casos donde se combinan los dos reactivos se tienen las siguientes observaciones, para la prueba que se realizó con un pH = 9 se obtuvo un potencial de -196 mV y para la de pH = 6 de -189 mV con recuperaciones de 96.11 % para la primera y de 92.89 % para la segunda, aunque el DP (depresor) deprime a la galena en estos dos casos no fue así debido a que existe demasiado XEP (colector), lo cual no permitió que el DP cubriera a las partículas de galena.

4.1.4.- Comparación de los potenciales zeta, reposo y flotación.

No existe una relación evidente entre los tres potenciales ya que los resultados son muy diferentes entre sí, aunque si existe una tendencia entre ellos que es la siguiente: a medida que aumenta la concentración de XEP (colector), el potencial de los tres métodos se vuelve más anódico a cualquier valor de pH y análogamente al aumentar la

concentración de DP (depresor), se hace más catódico a cualquier pH. El potencial zeta nos ayudó solamente a encontrar el posible punto de cero carga de la galena que esta en un valor de pH de 5.6 aproximadamente, lo cual indica que no es favorable flotar a la galena a este valor porque el concentrado será muy pobre. El potencial de reposo no tiene una relación estrecha con el de la flotación debido a que en este último existe agitación y el primero no, lo cual hace variar el valor, pero si existe una tendencia igual, la cual se mencionó anteriormente.

CAPITULO V

5.1.- CONCLUSIONES

1.- El proceso de flotación está controlado por la fisicoquímica de superficies ya que la interacción que existe entre el mineral y los reactivos de flotación es de carácter eléctrico y químico.

2.- El aumento de potencial está dado por el incremento de concentración de dicromato de potasio y su disminución con el aumento de concentración de xantato etílico de potasio a diferente valor de pH, uno lo vuelve más catódico y el otro más anódico respectivamente.

3.- Existe diferencias de valores entre el potencial zeta, reposo y flotación, pero con tendencia igual.

4.- Los productos que reaccionan con el mineral le dan el carácter hidrofóbico o hidrofílico

5.- Para la flotación de galena es recomendable una concentración elevada de XEP y pH de 9 para asegurar la mayor concentración de mineral, aunque el consumo de reactivo será costoso, lo cual haría incosteable el proceso.

6.- Para asegurar que el mineral de galena sea concentrado por flotación se requiere tener por lo menos un potencial de

-148 mV y entre más negativo sea habrá más concentrado, lo ideal es tener un potencial de -210 mV.

7.- Las condiciones más favorables para concentrar el mineral de galena son, concentración de XEP 1×10^{-2} M con pH = 9, teniendo un tiempo de flotación de 3 minutos para obtener una concentración del 95.8 %, el potencial que se tiene en esta prueba es de -210 mV.

5.2.- RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS POSTERIORES.

Es importante notar que para trabajos futuros relacionados con potenciales eléctricos se hagan flotaciones de galena con minerales asociados a ella como son los sulfuros de zinc, cobre, fierro etc, ya que esta tesis se uso minerales relativamente puros.

Al trabajar con potencial zeta es necesario revisar la celda del zetámetro para encontrar las posibles causas que nos den resultados erróneos como las burbujas atrapadas en el capilar y también hacer las mediciones lo más rápido posible ya que el calor producido por del sistema de iluminación puede alterar el comportamiento de las partículas.

5.3.- BIBLIOGRAFIA

Referencias.

- 0.- R. R. Klimpel, Use of chemical reagents in flotation, Chemical Engineering, September 3, 1984, pag 75 - 79
- 1.- Froth Flotation, 50th Aniversary Volume, D.W. Fuerstenau, Ed., Society of Mining Engineers of AIME, pag. 9, New York 1962.
- 2.- R.D. Crozier, Mining Magazine 151, pag. 202, USA 1984.
- 3.- D.W. Fuerstenau and S. Raghavan, "Some Aspects of The Thermodynamics of Flotation", en Flotation A.M. Gaudin Memorial Volumen (M.C. Fuerstenau, ed) vol 1, Society of Mining Engineers of AIME, pag. 21 New York 1976.
- 4.-J. O'M Bockris y A. K. N. Reddy, Modern Electrochemistry, vol 2, pag. 631, USA 1970.
- 5.- J. Th. G. Overbeek, en Colloid Science, (H. R. Kruyt, ed) Elsevier, vol 1 1952.
- 6.- D. W. Fuerstenau and Ronaldo H. Urbina, " Flotation Fundamentals", en Reagents in Mineral Technology (P. Somasundaran and Brij M. Moudgil, ed) Marcel Dekker, Inc. pag.5 , New York 1987.
- 7.-M. J. Rosen, Surfactants and Interfacial Phenomena, pag. 29 USA 1978.
- 8.- R. J. Hunter, Zeta Potencial in Colloid Chemistry, Academic Press, New York 1981.
- 9.- P. H. Wiersema, A. L. Loeb y J. Th. G. Overbeek, Journal Colloid and Interface Sci., vol 22 1968.
- 10.- D. W. Fuerstenau, The Chemistry of Biosurfaces, vol. 1, (M. L. Hair, ed), Marcel Dekkel, 1971.
- 11.- Bloen J. and Kröger F. A. , The p-t-x phase diagram of the lead-sulfur system. Z. Phys. Chem., 7, 1956, 1-14
- 12.- Frey G., Elektrische Leitfähigkeit des Kristallisierten Bleisulfides. Z. Electrochem, 36, 1930, pag. 511- 523

- 13.- Koenigsberger J., Über ein Temperatugesetz der Electricchen Leitfähigkeit Fester Einheitlicher Substanzen un Einige. Folgerungen derauf. Phys. Z., 7, 1906, 507-508
- 14.- Szeglowaki Z. Electric potencial of local galvanic elements on the Galena and their influence upon the adsorption of potassium xanthate. en Physics of interfaces (proc. erd Int. Congr. Surface Activity, vol 2) 1960, 110-111.
- 15.- Plaksin I.N. and Shafeev R. Sh. Supplementary remarks of the "Study of the influencie of some surface semi-conductivity properties on the interaction between potassium buthyl-xanthate and sulfhide minerals. en Physical interfaces 1960, 104-109" en (5th) int. Miner. Process. Congr., London 1960, pag 302-309.
- 16.- A. F. Taggart, T. C., and C. R. Ince: AIME Trans., 1930, vol. 87, pag 285.
- 17.- Glembotskii, V. A., Klassen, V. I., y Plaskin, I. N., Flotation, Primary Sources, New York, 1972.
- 18.- Somasundaran, P., Interfacial Chemistry of Particulate Flotation, A.I.Ch.E., Symposium Series. 150, 71 (1975).
- 19.- A. Huerta C., Tesis "Estudios de cinética de flotación en menas sulfuradas a partir de métodos electroquímicos", Fac. de Química, UNAM, pag. 37, 1991
- 20.- Taggart Handbook of Mineral Dressing., John Wiley, New York 1945
- 21.- Bogdanov o. S. et al. Kinetic of Flotation reagent sorption. In 5th Int. Miner. Process. Congr., London 1960, (London, Inst. of Minig and Metallurgy, 1960), pag 221-232.
- 22.- D. W. Fuerstenau and R. H. Urbina, "Mineral Separation by Froth Flotation", en Surfactant-Based Separation Processes, (John F. Scamehorn, ed). pag. 293 - 294, New York 1989.
- 23.- Arturo J. Hernández, Tesis, "Estudio Electroquímico en el Sistema la Galena-Xantato-Dicromato" 1992, Fac. de Química, U.N.A.M.

Libros de consulta

- Mineral Processing Technology, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Second Edition, B. A. Wills

Pergamon Press Ltd

- Flotation, A.M. Gaudin Memorial Volume

M. C. Fuerstenau, Editor

American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc.

New York, 1986

- Froth Flotation, 50th Anniversary Volume

D. W. Fuerstenau, Editor

American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc.

New York, 1962

- La minería en México, 1987.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
México, 1989

- Fundamentos de Electrodica

J. M. Costa

Ed. Alhambra, S.A., Barcelona 1981.