

## RECUPERACION DE ORO POR FLOTACION DE AGLOMERADOS CARBON VEGETAL - DIESEL OIL\*

CINDA BELTRAN O.<sup>1</sup>, NAPOLEON JACINTO E.<sup>1</sup>, FRANK E. RACHOR<sup>2</sup>

1. Departamento de Metalurgia, Universidad Técnica de Oruro. P.O. Box 200, Oruro-Bolivia.
  2. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) P.O. Box 5180/D 6236 Eschborn, Alemania
- 1 y 2. Proyecto Metalúrgico Oruro (GTZ), Oruro/Bolivia. P.O. Box 252, Oruro-Bolivia.

**RESUMEN:** La colección de partículas de oro fino en partículas de carbón aglomerado y la subsiguiente flotación "froth" del carbón ha sido investigada. Se produjeron los aglomerados de carbón por adición de diesel oil. Partiendo de muestras "batch" de colas de aproximadamente 500 g de sólidos y un contenido de oro de 3 g/t se ha logrado una recuperación de 80 % resultando en un preconcentrado con más de 900 g/t. El consumo de carbón y diesel está en el rango de 20 kg y 2 kg por tonelada métrica de colas. Los parámetros principales son dados.

**ABSTRACT:** Collection of fine gold particles with agglomerated coal dust and following froth flotation of loaden coal has been investigated. The coal dust was agglomerated by the addition of diesel fuel. Starting on batch samples of tailings with approximately 500 g of solids and a gold content of approximately 3 g/t a recovery of about 80 % has been reached, yielding a gold content in the concentrate of over 900 g/t. Consumption of carbon and diesel is in the range of 20 kg and 2 kg per metric ton of tailings. Main operating parameters are given.

### INTRODUCCION

En la concentración gravimétrica convencional de oro aluvial, uno de los problemas principales es la baja recuperación de partículas finas de oro. En Bolivia se estiman para tal tipo de operaciones recuperaciones totales en el rango de 40 %. Por este hecho se hace importante el estudio de nuevas técnicas que representen una alternativa de solución a este problema.

El presente trabajo evalúa al nivel de laboratorio la recuperación por adsorción selectiva de las partículas finas de oro en aglomerados de carbón vegetal - diesel oil y una posterior flotación de estos aglomerados cargados. Se planificó las pruebas por "factorial design".

Para la ejecución de las pruebas experimentales se utilizó una mena aluvial procedente del departamento de Cochabamba. La muestra corresponde a colas de tratamiento en mesas.

---

\* Resumen de la tesis de grado del autor primeramente mencionado.

la misma contiene 3.18 Au g/t y el tamaño de las partículas esta en el rango de 10 a 100  $\mu\text{m}$ . El proceso responde a tres etapas fundamentales (fig. 1):

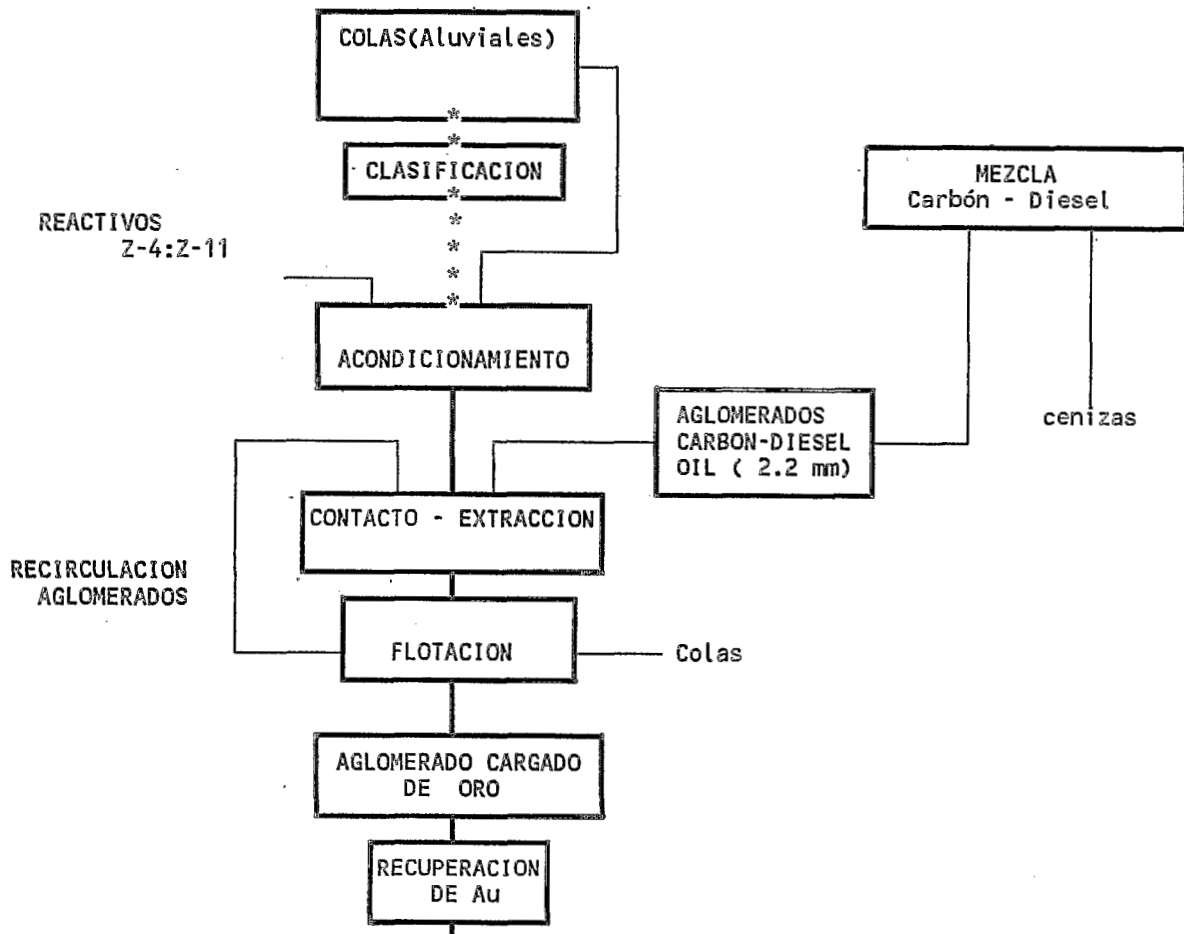


Fig. 1: Secuencia de etapas en el proceso de flotación de oro con aglomeración carbón diesel.

- Aglomeración esférica de carbón como colector, lo cual se obtiene agitando una mezcla de partículas finas de carbón con diesel oil.
- Contacto y extracción, las partículas de carbón son cargadas con oro .
- Flotación, recuperación de los aglomerados cargados del resto de la pulpa.
- Recuperación del metal precioso del concentrado.

Partiendo de una cola de bajo contenido de oro fino se obtiene un concentrado de oro de 930 g/t, con una recuperación total de 80%.

El proceso necesita insumes de bajo valor y fácil accesibilidad en mínima cantidad. La implementación técnica representa en línea general una adaptación de elementos conocidos en la industria. Se considera el proceso como una alternativa bastante atractiva a métodos actualmente empleados para el tratamiento de partículas finas de oro.

Trabajos subsiguientes son planificados en escala mayor, además otras al nivel de laboratorio para la mejor evaluación de los aspectos teóricos del proceso.

## CONSIDERACIONES TEORICAS

La flotación de partículas de oro, no responde cuando se trata de partículas demasiado finas o coloidales, debido a que estas no tienen la suficiente energía cinética para vencer la barrera energética formada por la presencia de una película de agua alrededor de la burbuja de aire. El proceso en consideración reúne algunas condiciones para superar el problema de flotación de partículas demasiado finas. Esta técnica emplea el carbón vegetal aglomerado con diesel oil, como un soporte para la extracción de partículas finas de oro, las cuales recubren al soporte como una alfombra y son flotadas como en el caso normal de flotación espumante.

### ETAPA DE AGLOMERACION DE CARBON

En la aglomeración se adiciona un líquido inmisible (hidrocarburo) a la suspensión de sólidos en el agua (Capes, 1977). El hidrocarburo (aceite) es distribuido en el sistema, agitando la mezcla, dando lugar a superficies oleofílicas/hidrofóbicas, formando puentes líquidos entre las partículas del mineral, controlado por la propiedad oleofílica del material a ser aglomerado (Darkovich, 1988). La extracción sólido - aceite esta basada en la diferencia de tensiones superficiales de las tres interfases presentes.

La relación de equilibrio entre los componentes horizontales de dichas tensiones superficiales, viene expresada por la ecuación de Young (Toral, 1973; Shaw, 1970) (fig. 2).

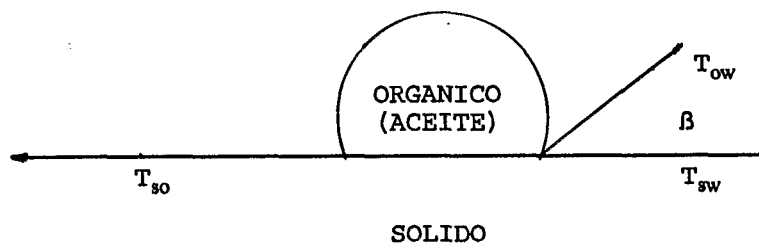


Fig. 2: Representación esquemática de una gota de aceite sobre la superficie de un mineral  
 $T_{so} - T_{sw} = T_{ow} \cos \beta$

[1]

Donde:  $T_{so}$  = Tensión interfacial sólido-aceite.  
 $T_{ow}$  = Tensión interfacial agua - aceite.  
 $T_{sw}$  = Tensión interfacial sólido - agua.

El comportamiento de una partícula respecto a los tipo de interfases presentes se explica del modo siguiente:

- Sí,  $T_{ow} > (T_{so} + T_{sw})$ , o ninguna de las tres tensiones interfaciales es mas grande que la suma de las otras dos, el sólido estará en la interfase aceite - líquido.
- Cuando el sólido se encuentra en la interfase aceite - líquido, se puede presentar el siguiente subcaso.
- Sí,  $T_{so} < T_{sw}$ , entonces  $\cos \beta$ , es negativo y  $\beta > 90^\circ$ , entonces la mayor proporción de sólidos se encuentra en la fase aceite (Shaw, 1970). Siendo estas las condiciones mas favorables para la formación de aglomerados.

## CONTACTO Y EXTRACCION

La extracción de partículas, en presencia de compuestos activos (colectores), se basa fundamentalmente en la formación de un puente líquido entre el aglomerado y partícula, el mismo que se forma debido a la coadsorción de las moléculas no polares del orgánico (agente aglomerante) con los colectores. Se considera como uno de los efectos principales la asociación entre hidrocarburos, dando como resultado el aumento efectivo de la cadena hidrocarbonada.

En la doble capa eléctrica, el comportamiento de los iones explica el mecanismo de adhesión. Puede establecerse una interacción ya sea por atracción electrostática y/o reacción química con los sitios activos de la superficie del mineral. Lo que implica una adhesión en el plano de Stern. La densidad de adsorción del ión activo, en el plano mencionado, estará controlado por la energía libre de adsorción ( $\delta G^{\circ}_{ads}$ ):

$$\Gamma_2 = 2 * 10^{-11} * r_i * c_i * \exp(-\delta G^{\circ}_{ads}) \quad [2]$$

Donde:  $\Gamma_2$  = densidad de adsorción (mol/cm<sup>2</sup>)  
 $r_i$  = radio efectivo del compuesto polar (Å)  
 $c_i$  = concentración de los iones en la solución (mol/cm<sup>3</sup>)  
 $K$  = constantes empíricas para un sistema dado.

La energía libre de adsorción comprende a su vez:

$$\delta G^{\circ}_{ads} = \delta G^{\circ}_{elec} + \delta G^{\circ}_{HM} + \delta G^{\circ}_{CH_2} + \delta G^{\circ}_{quim} + \delta G^{\circ}_h + \delta G^{\circ}_{solv} \quad [3]$$

Donde:  $\delta G^{\circ}_{ads}$  = energía libre de adsorción Kcal/mol, por unidad de área.  
 $\delta G^{\circ}_{elec}$  = energía libre por fenómenos electrostáticos.  
 $\delta G^{\circ}_{HM}$  = energía libre, debido al enlace entre cadenas hidrocarbonadas.  
 $\delta G^{\circ}_{CH_2}$  = energía libre, debido a la interacción entre hidrocarburos.  
 $\delta G^{\circ}_{quim}$  = energía libre, por efectos de tipo químico.  
 $\delta G^{\circ}_h$  = energía libre, por enlaces de hidrógeno.  
 $\delta G^{\circ}_{solv}$  = energía libre, por efectos de solvatación.

Bajo estas condiciones es posible que para un compuesto no polar el  $\delta G^{\circ}_{ads}$ , este dado por la siguiente relación:

$$\delta G^{\circ}_{ads} = \delta G^{\circ}_h + \delta G^{\circ}_{CH_2} \quad [4]$$

Y la energía libre de adsorción debido a los efectos de interacción entre hidrocarburos, puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$\delta G^{\circ}_{ads} = \delta G^{\circ}_{HM} \quad [5]$$

El valor de  $\delta G^{\circ}_{HM}$ , permitirá explicar la contribución del enlace hidrofóbico entre las cadenas hidrocarbonadas.

**MATERIAL**

Se ha seleccionado para la aglomeración carbón vegetal industrial de producción nacional, con las siguientes características: carbón fijo 72.7 %, humedad 1.0 %, materia volátil 20.5 %, cenizas 5.8 %.

El diesel oil utilizado es un producto corriente del productor nacional YPF sin tratamiento particular.

El análisis microscópico de las menas utilizadas da los resultados siguientes: la arena aurífera tratada contiene mayormente cuarcitas y variedades criptocristalinas de cuarzo como ser calcedonita y sílice coloidal entremezclado con ocre de hierro amarillo, el oro se presenta en láminas delgadas con bordes irregulares y su presencia en la muestra es esporádica. El proceso en estudio se orienta al tratamiento de partículas en un rango de tamaño de  $-100 + 9 \mu\text{m}$  ( $-150 \#Ty + 9\mu\text{m}$ ). En la tabla 1, se presentan el análisis químico y granulométrico de la muestra.

Tabla 1. Análisis granulométrico de la arena aurífera

TAMAÑO #Ty	PESO %	LEY Au g/t	UNIDADES %	DISTRIBUCION %
-150 + 200	24.97	2.15	53.68	16.57
-200 + 38 m	22.16	2.95	65.37	20.46
- 38 + 28 m	37.04	2.75	101.86	31.36
- 28 + 18 m 9.24	6.55	60.52	18.90	
- 18 + 9 m 5.61	6.95	38.99	12.62	
CAB.CAL.	100.00	3.20	320.42	100.00
CAB.ENS.		3.18		

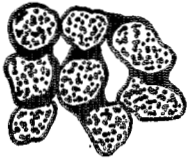
**EXPERIMENTACION Y RESULTADOS****AGLOMERACION DE CARBON**

Respecto a las propiedades eléctricas desarrolladas por el diesel oil y el carbón vegetal, se hicieron mediciones electroforéticas. Se encontró que el potencial que desarrolla el diesel oil es negativo en todo el rango de pH medible, como consecuencia de la adsorción de iones  $\text{OH}^-$  y el punto isoeléctrico(IEP) del carbón vegetal es de 6.3, por encima de este pH el potencial que desarrolla es negativo. Considerando que el pH de trabajo en la etapa de aglomeración es de 8.0, en principio se puede observar que no existe una relación lógica en la formación de aglomerados, lo que debería suceder en realidad es una repulsión entre las partículas de carbón vegetal y el diesel oil, los resultados experimentales no evidencian tal situación. Considerando los efectos encontrados experimentalmente, se podría considerar que el diesel oil se adsorbe sobre las partículas de carbón a través de las fuerzas de capilaridad y a las impurezas activas presentes en el diesel oil.

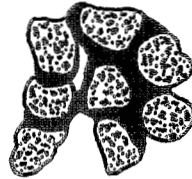
Debido a que el diesel oil es un orgánico de carácter industrial, contiene impurezas activas, en virtud al cual las moléculas de orgánico se convierten en compuestos heteropolares actuando como colectores eventuales.

En esta etapa las variables más significativas son:

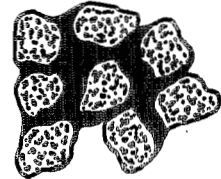
- Consumo de diesel oil, hallándose su consumo óptimo de 120 a 135 l/t de carbón vegetal, rango en el que el sistema se encuentra en la región capilar (Tabla 2, fig. 3).



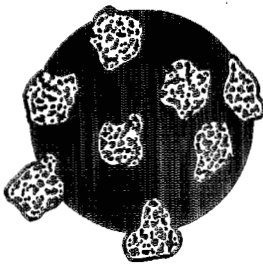
i) Región Pendular



ii) Región Funicular



iii) Región Capilar



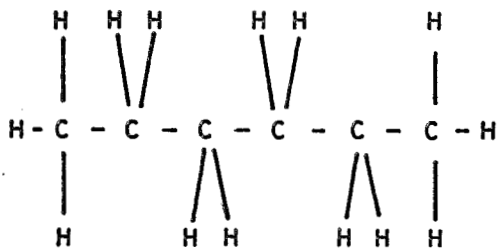
iv) Dispersión de partículas de carbón en diesel oil



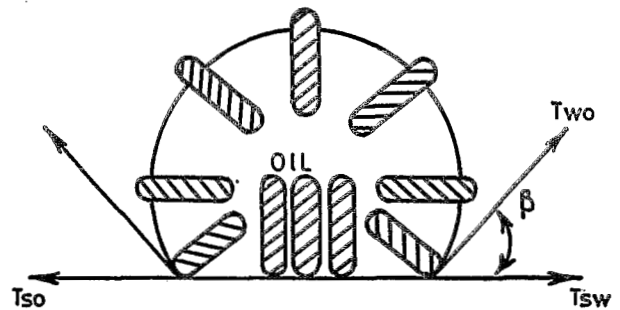
Partículas de carbón vegetal



Molécula de orgánico (Diesel Oil)



MOLECULA DE ORGANICO (DIESEL OIL).



SOLIDO

INTERFASES: Two (Diesel Oil - Agua).

Tsw (Sólido - Agua), Tso

(Sólido - Diesel Oil).

Fig. 3: Distribución del Diesel oil. pH 8.0, 18°C, 60% Sólidos en peso, -100 + 325 # Ty y 500 rpm.

Tabla 2: Efecto del consumo específico del diesel oil

PRUEBA No.	DIESEL OIL l/t AGLOM.	TIPO DE AGLOMERACION
1	30.00	-
2	50.00	-
3	60.00	PENDULAR
4	70.00	PENDULAR
5	80.00	PENDULAR
6	90.00	FUNICULAR
7	100.00	FUNICULAR
8	110.00	FUNICULAR
9	120.00	CAPILAR
10	125.00	CAPILAR
11	130.00	CAPILAR
12	135.00	CAPILAR
13	140.00	MASA PASTOSA
14	145.00	DISPERSION EN LIQUIDO
15	150.00	DISPERSION EN LIQUIDO
16	155.00	DISPERSION EN LIQUIDO

- Tamaño de partículas, el tamaño de partículas de carbón vegetal en la alimentación, además de influir en el tamaño de aglomerado, tal cual se observa en la figura 4, influye decisivamente en el tipo de aglomerado que se obtiene, ya que las fuerzas de capilaridad son mayores en las partículas finas. Los aglomerados de 2.2  $\mu\text{m}$  de diámetro, formados con partículas en el rango de -74 + 44  $\mu\text{m}$  y aplicando una velocidad de 450 rpm, son óptimos para el proceso en estudio (Tabla 3).

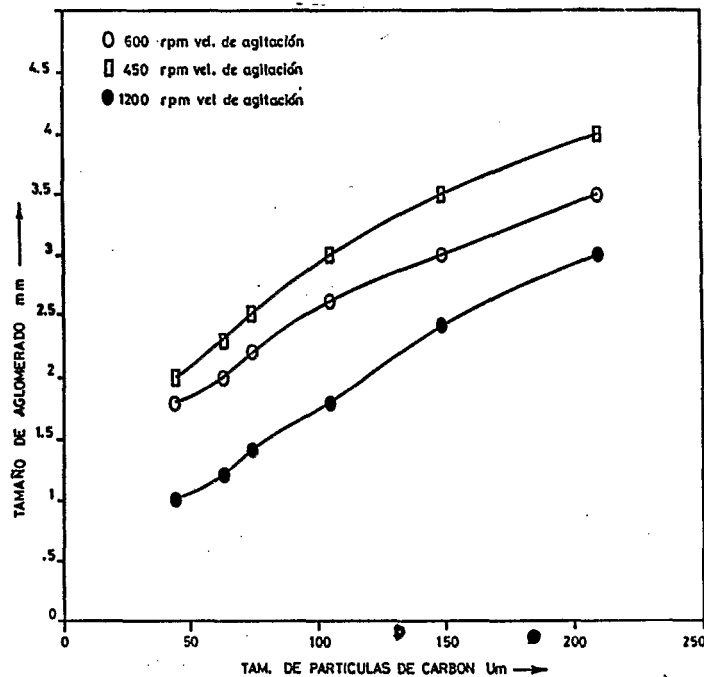


Fig. 4: Influencia del tamaño de partículas de carbón de alimentación en el tamaño de aglomerado. pH 8.0, 18°C, 60% sólidos consumo de diesel oil  $1.30 \times 10^5 \text{ cm}^3/\text{t}$  de carbón vegetal 500 rpm.

Tabla 3: Influencia de la velocidad de agitación

PRUEBA N°	AGITACION rpm	DIAMETRO DE AGLOMERADO mm	
		tamaño de partícula $\mu\text{m}$ -200 + 325	-150 + 325
1	400	2.40	2.80
2	500	2.20	2.50
3	550	2.00	2.20
4	600	1.80	2.00
5	650	1.60	1.80
6	750	1.40	1.60
7	850	1.20	1.50
8	950	1.00	1.40
9	1100	0.80	1.20
10	1200	0.80	1.20

### CONTACTO - EXTRACCION

En ésta etapa, las variables más significativas son:

- Tiempo de acondicionamiento. El tiempo de acondicionamiento es determinante en la adsorción selectiva de los colectores sobre la superficie de las partículas de oro, dando lugar a la formación de puentes líquidos por la interacción de la cadena hidrocarbonada de estos con la molécula no polar del diesel oil que esta controlada por los efectos de interacción entre hidrocarburos y las fuerzas débiles de Van der Waals. Se obtiene un puente líquido bastante estable con una mezcla de Z-4:Z -11 (1:2) 110 g/t y un tiempo de acondicionamiento de 15 min.

### Condiciones de operación, etapa contacto - extracción

Sólidos en peso	30 %
Velocidad de agitación	650 rpm
Granulometría del carbón vegetal	- 74 + 44 $\mu\text{m}$
Temperatura	18 °C
pH	6.5
Acondicionamiento	15 min
Z-4:Z-11 (1:2)	110 g/t
Consumo de aglomerados	20 kg/t
Tiempo de contacto	40 min

- Velocidad de agitación. Debido a que la posibilidad de fijación o desprendimiento de los compuestos activos depende de las interacciones físico-químicas y de la gradiente de velocidad imperante en la pulpa. La velocidad de agitación debe ser moderada en el rango de 450 a 550 rpm, la cual permite la formación de puentes líquidos bastante estables y una extracción selectiva.

- El tiempo de contacto. Es un factor que depende de la velocidad de agitación y el tiempo de acondicionamiento. Se ha encontrado que un tiempo de contacto adecuado es de 40 min



- El tiempo de contacto. Es un factor que depende de la velocidad de agitación y el tiempo de acondicionamiento. Se ha encontrado que un tiempo de contacto adecuado es de 40 min (Tabla 4). A tiempos mayores si bien la recuperación se mantiene constante la extracción ya no es selectiva, como se observa en la figura 5, posiblemente se deba a que el material valioso ya ha sido casi totalmente extraído y el valor que no se recupera se encuentre diseminado en la matriz del material oxidado.

Tabla 4: Contacto - Extracción (40 min)

PRODUCTO	PESO %	LEY g/t	FINOS g	DIST %	r.e.	Ef %
CONCENT.	0.27	930.89	1.20*10 <sup>-3</sup>	80.00	292.73	73.42
COLAS	99.73	0.69	3.00*10 <sup>-4</sup>	20.00		
CAB.CAL.	100.00	3.03	1.50x10 <sup>-3</sup>	100.00		
CAB.ENS.	3.18					

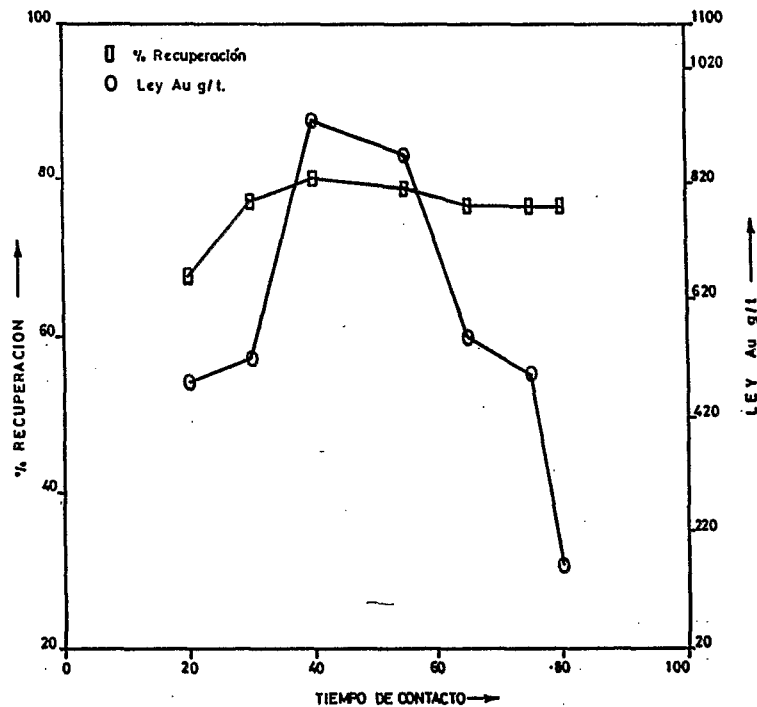


Fig. 5: Influencia del tiempo de contacto sobre el % extracción de oro. pH 6.5, 18°C, -150# Ty + 9 rpm, aglomerados 2.2 mm y consumo  $2.0 \times 10^4$  g/t de colas tratadas, Z-4: Z-11 (1:2) 110, tiempo de acondicionamiento 20 min, 550 rpm.

## FLOTACION

La recuperación de aglomerados cargados por flotación, presenta las mismas características de la flotación espumante. Se obtuvo los mejores resultados (930 Au g/t y 80% Recuperación) bajo las siguientes condiciones de operación: pH 7.0, Z-4:Z-11(1:2) 110 g/t y Dow Froth 250, 40 g/t como espumante.

## AGRADECIMIENTOS

La ejecución de las pruebas, ensayos químicos y la evaluación se ejecutaron en los laboratorios de la carrera de Metalurgia de la U.T.O. - Agradecemos a los colegas no mencionados por su apoyo en este trabajo.

## REFERENCIAS

BP. MINERALS INTERNATIONAL. 1988. New Process for the Recovery of fine Gold, Coal-Gold-Agglomeration (CGA), Vol. 33, N°9, P. 13-19.

CAPES EDWARD. 1977. Agglomeration from liquid suspension - Research and Applications, 2nd Ed., Editorial Baltimore, 910 - 927.

DARKOVICH K. 1988. A Survey of oil agglomeration in Wet fine coal Processing, Vol. 28, N°918, P. 54-56.

TORAL M. 1973. Físico Química de Superficies y Sistemas dispersos, 1st. Ed., Editorial URMO/Spain, P. 93 -273.

SHAW DUNCAN. 1970. Introduction to Colloid and Surface Chemistry, 2nd Ed., London, Editorial Alhambra S.A., P. 126 -242.

VERBEEK J. 1952. Colloid Science chr. Kruyt, Volumen I, Amsterdam, Elsevier, P. 79 - 110