



Metsolver.com

lmarin@metsolver.com
www.metsolver.com

Aglomerado y curado en el proceso de lixiviación de minerales

Luis Marín Escalona
Julio de 2007

Resumen

Se presentan a continuación los aspectos fenomenológicos, técnicos y operacionales, referidos a la utilización del proceso de aglomeración y curado en la práctica de la lixiviación de minerales de cobre, es decir, los fenómenos involucrados en el proceso, los reactores utilizados y disponibles para su aplicación, y algunos rangos operacionales.

Índice

Introducción	4
Curado ácido	5
Importancia de las especies de la ganga en la lixiviación	7
Efecto de la ganga en el grado de penetración de las partículas	9
Equipos para curado ácido.....	10
Aglomeración	11
Fenomenología del proceso	12
Tipos de aglomeración	16
Aglomeración por humedad	16
Aglomeración por adherentes.....	17
Características y factores de la aglomeración	17
Medio ácido	18
Medio alcalino	19
Equipos aglomeradores.....	20
Aglomeración de minerales de oro	22
Conclusiones	23
Referencias.....	24
Anexos.....	25
Plantas de lixiviación TL en Chile	25
Diagrama de flujo planta de lixiviación Radomiro Tomic	29
Diagrama de flujo planta de lixiviación Codelco Norte Hidro Sur Óxidos.....	30

Introducción

En la lixiviación en pilas a diferencia de otros tipos de lixiviación, el mineral a lixiviar tiene una ley relativamente alta y, por lo tanto, económicamente paga por un tratamiento más complejo a través de una planta de chancado al menos de tipo secundario y usualmente, terciario. Cuando se usa una granulometría más fina, entonces se hace necesario aglomerar los finos para restituir la permeabilidad al lecho de mineral que se va a lixiviar. Adicionalmente al agua, cuando se lixivian minerales de cobre, se aprovecha de agregar ácido concentrado, para efectuar el curado ácido.

Esta secuencia combinada de operaciones, en que la lixiviación en pilas, se realiza sobre un mineral finamente chancado, aglomerado con agua y curado con ácido concentrado, se conoce como Proceso de Lixiviación TL y su uso se ha generalizado para el tratamiento de minerales de cobre ya sean oxidados o sulfurados.

A continuación se hace una descripción detallada de las operaciones de aglomeración y curado en el proceso de lixiviación TL.

Curado ácido

Si se considera la adición de una solución lixivante en la parte superior de una pila de mineral, se puede ver que inicialmente esta solución presenta condiciones de Eh y de pH correspondientes al campo de estabilidad de ion Cu^{2+} .

Sin embargo, si el mineral que se está tratando presenta una ganga reactiva o moderadamente reactiva, a medida que progresa la lixiviación ácida en un frente descendente, el ácido se va consumiendo. Lo mismo ocurrirá si la altura del lecho de mineral es mayor, tal que el ácido se consuma antes de llegar a la parte inferior de la pila. En estos casos se tiene un frente de reacción que impone una acelerada variación, en sentido negativo, del valor de Eh y un aumento de pH.

Si la velocidad de la reacción de la solución con el mineral y la ganga es mayor que la velocidad de reposición del ácido, entonces se puede llegar a perder la totalidad de los iones férricos y, en breve, a consumir la totalidad de los iones hidrógeno (protones disponibles para la lixiviación). Con esto, las condiciones de Eh - pH de la solución de lixiviación ya dejarán de estar en el dominio del campo de estabilidad del ion Cu^{2+} , y pasarán al campo de estabilidad de la crisocola, el cobre nativo o la calcosina. En este punto la solubilidad del cobre es menor que 10^{-6} molar, es decir insignificante.

La rápida neutralización de ácido en la solución de lixiviación causado por la reactividad de la ganga provoca un verdadero frente de acidez descendente. En la parte superior de éste frente se tiene todavía acidez suficiente como para estar en el campo de estabilidad del ion Cu^{2+} . En la parte inferior el Eh ha cambiado desde 0.6 - 0.5 a 0.1 - 0 volt, y la solubilidad del cobre cae bruscamente desde 0.1 molar (unos 6/l), a 10^{-6} molar, es decir una caída de unos 5 ordenes de magnitud.

Si el frente de ácido se produce más bien arriba en el lecho del mineral, la baja solubilidad del cobre en las soluciones neutralizadas puede conducir a una precipitación de todo el cobre disuelto en la parte superior. Los precipitados más corrientes en estos casos incluyen cobre nativo, delafosita y calcosina. Solo si la neutralización se produce en la parte inferior del lecho del mineral puede ocurrir que el cobre disuelto no alcance a reprecipitarse, pero queda en evidencia que será muy difícil realizar la disolución del cobre remanente en las zonas de más abajo de la pila de mineral.

Resulta claro entonces que es indispensable que el ácido este distribuido lo más uniformemente posible a lo largo del camino de las soluciones de lixiviación. Idealmente debe haber un ambiente de acidez lo más uniforme posible, en todo el camino de las soluciones lixiviadas. Sin embargo, eso obligaría alternativamente a:

- Agregar exceso de ácido en las soluciones de entrada, con el riesgo de un mayor consumo global, o bien.
- Limitar la altura de las pilas del lecho del mineral que se someten a lixiviación, o bien, por último
- Aceptar menores recuperaciones en el conjunto.

Para solucionar este punto específico, se ha ideado incorporar un pretratamiento con ácido concentrado al mineral que se va a colocar en el lecho de minerales a lixiviar. Este ácido es uniformemente distribuido, previo a su ubicación en la pilas, logrando con esto una dosificación a la medida de cada requerimiento, ya sea por parte de los minerales del yacimiento, o parte de la ganga.

Además, la distribución anticipada del ácido permite que este reaccione sobre todas y cada una de las partículas del mineral, logrando una acción de transformación de las especies minerales de cobre que están próximas a la superficie, normalmente en sulfato de cobre. Con este método se ha logrado inhibir la disolución de algunas especies indeseables de la ganga como el aluminio y la sílice (SiO_2).

Cuando, una vez armada la pila, se aplican las soluciones de lixiviación apropiadamente tales, estas se encuentran en toda la trayectoria a través del lecho de mineral, ya acidulada y, en muchos casos, sin consumir una mayor cantidad de ácido se limitan a disolver el sulfato de cobre ya producido por el pretratamiento ácido. Este pretratamiento con ácido concentrado ha recibido el nombre de curado ácido.

Por otra parte, la influencia de la ganga sobre el proceso de lixiviación de minerales de cobre, puede manifestarse principalmente a través del grado de consumo de ácido, la cinética de disolución y el grado de penetración de las partículas, fenómenos que describiremos a continuación.

Importancia de las especies de la ganga en la lixiviación

Cuando se lixivian en ambiente ácido sulfúrico los minerales de cobre, sean estos oxidados o sulfurados, la velocidad y la cantidad de cobre efectivamente disueltos no dependen exclusivamente de las condiciones del sistema completo visto desde fuera, como si fuese una caja negra, ni de las condiciones de Eh y pH de la solución lixivante. Por otro lado tampoco la mineralogía de las especies de cobre del yacimiento es la única determinante para pronosticar los resultados de la efectiva extracción de cobre que se desea procesar.

En efecto, existen una variedad de otras reacciones posibles que pueden ocurrir, y de hecho ocurren en cada momento, entre las soluciones lixiviantes y la ganga que hospeda y recubre el yacimiento, antes de que esta pueda ser alcanzada por las condiciones lixiviantes impuestas desde el exterior, Eh - pH, y que son modificadas, continua y progresivamente en su camino hacia el yacimiento objetivo.

Se distinguen así los micro-ambientes que ocurren en el interior de un trozo de roca, con el paso de la solución a través de una ganga porosa para alcanzar un grano mineralizado ocluido. A medida que avanza la solución, ésta puede ver totalmente alteradas sus condiciones originales e incluso inhibirse y/o detenerse totalmente su capacidad químicamente lixiviadora, expresada en términos de su Eh - pH, por ejemplo a causa de un cambio de pH por hidrólisis u otra reacción con constituyentes del mineral. También puede ocurrir la detención completa de la reacción por razones físicas, produciéndose un bloqueo irreversible de su avance, como ocurriría al precipitar un producto de hidrólisis de carácter insoluble, como la jarosita o la gestita, que detengan el avance de la solución.

Están también los macro-ambientes, correspondientes a la reacción con la ganga en áreas extensas que incluyen numerosos trozos de roca, las que, en los casos en que fueran altamente reactivos, pueden reaccionar causando la formación de bolsones ciegos, a donde las soluciones no pueden acceder, sustrayéndose así del proceso de lixiviación un volumen que puede llegar a ser en algunos caso muy importante. Este fenómeno puede tener un origen tanto de tipo químico (reacciones y productos de hidrólisis), como de tipo físico (desplazamiento de finos, efecto paraguas de una roca más grande o hidratación de arcillas plásticas) o bien mixto (físico y químico a la vez).

Ambas situaciones, la de los fenómenos del micro y macro-ambiente, son fenómenos reales, que pueden ocurrir independientemente o en conjunto, y en

todos los casos son causadas por la ganga, y pueden ser determinantes del éxito o fracaso económico de un proceso de lixiviación determinado.

Efecto de la ganga en el grado de penetración de las partículas

Existe una influencia de la ganga a nivel microscópico, correspondiente a la penetración al interior de los poros de una partícula individual. De esta manera, es habitual observar un frente de reacción hacia el interior de una partícula, tal como se muestra en la figura 1.

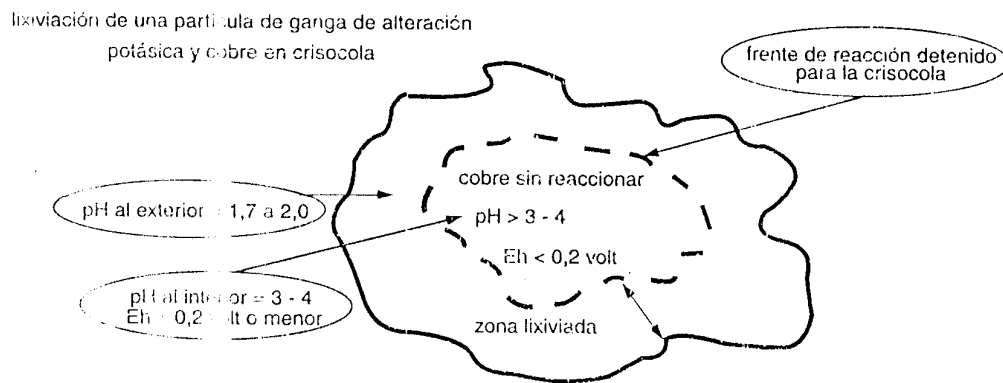


Figura 1: Recuperación de cobre en presencia de ganga consumidora de cobre

En efecto, si se tiene por ejemplo, una lixiviación que requiere ácido solo, o bien, ácido y férrico, puede ocurrir que la partícula se vea completamente atacada en términos de las especies que contienen hierro y éste se haya disuelto enteramente, incluso hasta el interior de ella. Sin embargo, en estos casos es frecuente observar que el cobre se ha lixiviado sólo hasta cierto límite, donde se ve un contorno, en forma de anillo, hasta el cual se limita la reacción, y más allá de él, hacia el interior de la partícula, el cobre permanece intacto. Esto ocurre cuando la ganga va consumiendo el reactivo, sea este H^+ solamente o bien H^+ y Fe^{3+} .

Equipos para curado ácido

Para la distribución uniforme con ácido se podría usar un sistema de regadores dispuesto sobre la correa transportadora que taren los minerales hacia las pilas. Sin embargo, esta ventaja de carácter químico se ha incorporado en conjunto con otro desarrollo destinado a mejorar la permeabilidad de los lechos de mineral, mediante una modalidad de aglomeración de las partículas finas en torno a las más gruesas.

Por esta razón, finalmente se ha concluido en la conveniencia generalizada de realizar ambas operaciones en una misma unidad mezcladora, consistente en un tambor rotatorio dentro del cual se adiciona tanto el agua para la aglomeración, como el ácido concentrado para el acondicionamiento uniforme del lecho del mineral.

Aglomeración

El proceso de aglomeración tiene como objetivo preparar el material mineralizado por la lixiviación, de manera de asegurar un buen coeficiente de permeabilidad de la solución.

Un factor crítico a veces no suficientemente investigado y que en muchos casos ha conducido a fallas o al cierre de las plantas en operación, es la permeabilidad.

La permeabilidad es dependiente de las características físicas del material en cuanto a proporción de poros, la que depende a su vez, de la proporción entre lamas (granulometrías inferiores a 5-10 micrones) finos (granulometrías inferiores a 100-150 micrones) y gruesos, y del método de formación de las pilas o depósitos.

Con proporciones del 10-20% de estos materiales finos, pueden existir problemas de permeabilidad y si no se asegura la permeabilidad en los lechos de lixiviación, no hay percolación, ni contactos, disolución ni extracción de valores, debido a que los finos segregan y forman áreas ciegas que disminuyen la percolación, se favorece la compactación en la formación de las pilas y puede ocurrir que estas partículas se vayan al fondo de la pila impidiendo el flujo uniforme de la solución enriquecida.

De esta forma, los efectos de una proporción inadecuada de finos pueden influir en aumentar innecesariamente el tiempo de lixiviación y con ello aumentar el consumo de reactivos, provocar una menor extracción de soluciones mineralizadas y hasta hacer que un proyecto sea inviable.

Para solucionar estos inconvenientes y asegurar un buen proceso de lixiviación es recomendable la eliminación de finos. Para ello se puede proceder de la siguiente manera:

- Realizar un análisis granulométrico y químico del metal valioso por fracciones, y realizar cortes teóricos a diferentes tamaños. Un rechazo del 40-50 % en peso del material, con sólo una pérdida de 5-10% en metal (dependiendo de su valor), podría ser económicamente viable, aunque no es normal. Por ejemplo, si en un yacimiento el oro y la plata están bastante distribuidos en todas las fracciones, se pierde valor con cualquier corte y rechazos de peso aceptables.
- Realizar la separación de tamaños finos y gruesos, efectuándose la lixiviación estática sólo en estos últimos, normalmente con leyes más bajas y la lixiviación dinámica con los finos, normalmente enriquecidos. Existen casos en que por este sistema se ha logrado una mayor y más rápida recuperación que por una íntegra lixiviación estática.
- Realizar una aglomeración, que es el procedimiento más empleado en la actualidad. En términos generales, la aglomeración consiste en un procedimiento que permite la unión de varias partículas finas a otras de mayor tamaño.

Fenomenología del proceso

En forma general, se puede afirmar que la aglomeración se debe a la tendencia de un sistema, compuesto principalmente por partículas y en menor proporción por líquido, a disminuir su energía libre superficial mediante la reducción del área interfacial agua-aire, por fuerzas de adhesión originadas debido a cualquiera de los siguientes mecanismos:

- Fuerzas de adhesión del tipo Van der Waals que aparecen por dipolos permanentes o instantáneos originados en las moléculas. Estas fuerzas son similares a las que se presentan entre capas de silicatos de estructuras laminar, tales como la pirofilita, talco o sulfuros como la molibdenita.
- Fuerzas atractivas electrostáticas que aparecen como consecuencia de potenciales de contacto o de interfase.
- En adición a la fuerza de Van der Waals los materiales diferentes en contacto, desarrollan un contacto potencial el cual, de vez en cuando, da vida a la atracción electrostática; igual es el caso de materiales parecidos. El estado de la energía local de la superficie y las funciones de trabajo de electrones, que depende en los materiales, son factores decisivos que desarrollan el contacto potencial.
- Exceso de carga en las partículas, que para el caso específico de materiales no conductores, produce fuerzas de tipo coulómbico.
- Fuerzas de atracción magnética, originados por las características ferromagnéticas de las sustancias.
- Uniones líquidas o puentes líquidos entre partículas denominados pendular y funicular. Aparecen debido a fenómenos de "mojabilidad" o tensión superficial. Es decir, los sólidos, al tener una energía libre por unidad de área (tensión superficial) debido a los enlaces desbalanceados de su superficie (proceso de mojado), forman los puentes o uniones líquidas que pueden ser de forma tal que el líquido cubra parcialmente o totalmente a las partículas, envolviéndolas o no. Tal como se muestra en la Figura 2.

- Presión capilar en espacios porosos llenos de líquidos: La fuerza y la propiedad de formación de la aglomeración son dependientes en la tensión interfacial; sin embargo, la formación de enlaces líquidos sea por drenaje o inhibición es de decisiva importancia.

- Agentes enlazantes de alta viscosidad de uso generalizado en la industria farmacéutica para aglomerar en tabletas. Básicamente la unión entre partículas se origina al poner estas en contacto con un líquido viscoso, el cual al solidificarse cristaliza y atrapa las partículas de maneras diferentes:
 - a) Por cristalización de sales, en la que soluciones al cristalizar forman los puentes o enlaces.

 - b) Por fusión, en que los puntos de contacto de partículas se forman ligaciones de materiales fundidos.

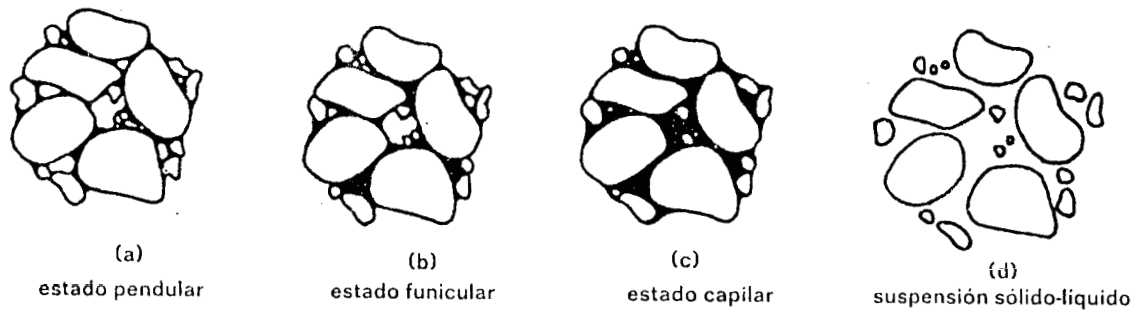
- Cristalización de ligante inorgánico, por ejemplo, el cemento.

- Por adhesión, debido a reacciones químicas.

- Por crecimiento de granos cristalinos.

Todos los mecanismos citados tendrán diferentes grados de importancia de acuerdo con los procesos para los cuales son empleados.

En el caso de la aglomeración de minerales de oro, plata y cobre, son varios mecanismos los que intervienen; pero los más importantes son las uniones líquidas y sólidas debidas al crecimiento de ligantes inorgánicos y orgánicos tales como la cal, el cemento, carbonatos, sulfatos, residuos de petróleo, dextrina, almidón, pulpas de papel, etc.



Representación esquemática de los aglomerados a) antes b) durante la lixiviación no-inundada

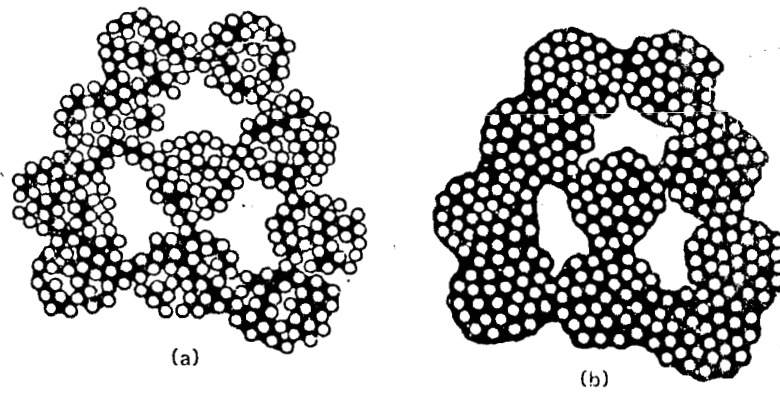


Figura 2: Diferentes estados de equilibrio en la formación de aglomerados

Tipos de aglomeración

Aglomeración por humedad

Este es el proceso más simple de aglomeración y consiste en humedecer el material con líquido, hasta alcanzar un contenido de agua que origine una tensión superficial suficiente, para que al colisionar las partículas entre sí, los finos se adhieran a los gruesos. Esta aglomeración suele ser muy débil y sólo se emplea en casos fáciles, con bajo contenido de finos.

El procedimiento más sencillo de lograr la aglomeración por humedad es el riego, el que puede efectuarse de la siguiente manera:

- Sobre las transferencias de las cintas que transportan el mineral a la pila, con la dificultad de mojar la correa.
- Al caer el material de la cinta en la formación de la pila. Adaptando el riego a los tamaños más gruesos (mayor desviación en la caída) la aglomeración puede ser más selectiva.
- Sobre la superficie de la pila, conforme vayan formándose los lechos o capas de mineral.

La práctica y la experiencia definirán la humedad óptima y el sistema de riego más apropiado.

A veces, cuando el proceso en sí, se necesita de un medio alcalino (lixiviación de oro y plata por cianuración) se puede emplear como aglomerante la cal en solución.

Aglomeración por adherentes

Existen ciertos materiales que pueden mejorar la adherencia de las partículas finas a las gruesas, prolongando esta unión tanto en la manipulación como en la operación de lixiviación. Estos materiales adherentes o aglomerantes han sido ampliamente estudiados, principalmente por el USBM de EE.UU., determinando experimentalmente tres parámetros principales del proceso:

- El tipo y cantidad de aglomerante añadido a la alimentación seca.
- La humedad necesaria en la mezcla mineral / aglomerante.
- El período de curado para favorecer los puentes de silicato cálcico.

Teóricamente, la aglomeración con aglutinantes es un proceso no bien definido. Parece ser que es similar a la floculación, es decir, se forma una especie de coagulación por unión de las partículas arcillosas coloidales con los agentes y electrolitos en solución. Se forman así aglomerados porosos muy estables y resistentes a la manipulación y condiciones de lixiviación.

Características y factores de la aglomeración

Para que el proceso de aglomeración sea efectivo, es necesario disponer de una serie de dispositivos y equipos, algunos de los cuales pueden formar parte de la propia planta. Es el caso de una trituración con una serie de cintas transportadoras, para descarga del producto triturado, en donde puede aplicarse la aglomeración en las transferencias son equipos adicionales.

Para que se realice una buena aglomeración, especialmente en los minerales de cobre, se deben considerar ciertas características del material mineralizado, entre las que se tiene el tamaño y geometría de las partículas,

granulometría, características geológicas, ley de cobre en el yacimiento, condiciones ambientales, evaporación del agua, humedad del curado, tiempo de curado, entre otras.

En términos generales, para una buena aglomeración es recomendable que:

- La adición del o los aglomerantes se realice sobre el mineral relativamente seco.
- Por ejemplo, realizarla en la trituración o chancado si está incluida en el esquema de tratamiento.
- La mezcla entre mineral y aglomerantes sea lo más íntima posible.
- Adicionar la cantidad de líquido o de solución que sea necesaria para alcanzar la humedad óptima de aglomeración.
- Se considere un cierto tiempo de reposo o curado, antes de proceder a la lixiviación. A mayor cantidad de finos, se necesitarán más aglomerantes y más tiempo de curado. Como mínimo debe existir un período de reposo de unas 24 horas.

La aglomeración se puede efectuar tanto en medio ácido como en medio alcalino (básico), con las particularidades que se describen a continuación:

Medio ácido

Este medio es típico de la lixiviación de minerales de cobre y uranio, el mismo lixivante ácido se puede emplear como aglomerante, generalmente en forma de ácido sulfúrico concentrado. Se ha propuesto también el empleo de aglomerantes

ácidos sólidos, como los sulfatos (yeso), pero no es normal, aparte de los efectos perniciosos de las posibles incrustaciones por precipitación posterior en pilas y tuberías.

Medio alcalino

El caso más típico es la aglomeración de minerales de oro y plata. En este caso los aglomerantes son normalmente cemento y cal. El cianuro en forma líquida y a alta concentración, se emplea más bien como agente de humedecimiento durante la aglomeración.

En la siguiente tabla se resume los sistemas de aglomeración más comunes:

Tipo de mineral	Granulometría	Sistema de aglomeración	Aglomerante
Oro y plata	Gruesa (15mm o similar) Sin arcillas	Sistema de cinta simple con descarga en pila o depósito de lixiviación	Solución de cal
Oro y plata	Fina (-15mm o más fino) Sin arcillas	Sistema de tres cintas o una cinta y artesa vibratoria	Cal
Oro y plata	Gruesa (-15mm o similar) Con arcillas	Sistema de tres cintas en cascada como mínimo y barras mezcladoras	Cemento y cal
Residuos de oro y plata	Menor de 0.2mm o más fino	Tambor rotatorio. Artesa inclinada vibratoria.	Cemento y cal
Cobre-uranio	Gruesa de 15mm o similar	Sistema simple de cinta transportadora	Ácido sulfúrico
Cobre - uranio	Fina (-15mm o similar) Limitada cantidad de arcillas	Tambor rotatorio	Ácido sulfúrico

Equipos aglomeradores

Aún cuando hay operaciones que agregan el agua y el ácido directamente sobre el mineral en una correa, esta práctica no resuelve el problema de lograr una buena mezcla y efectivamente aglomerar en forma homogénea las partículas más finas en torno a las más gruesas. En efecto esto se puede lograr en forma muy eficiente si se establece una rotación de las partículas húmedas en torno a sí mismas, lo que permite a las fuerzas cohesivas de tensión superficial, correspondientes a los estados de cohesión, por puentes líquidos denominados pendular y funicular, mantener a las partículas unidas entre sí, facilitando su transporte y apilamiento. Una vez formada la pila de lixiviación, se observa que el lecho conserva la mayor parte de estas virtudes de alta permeabilidad, líquida y gaseosa correspondientes al producto poroso originalmente formado durante la aglomeración.

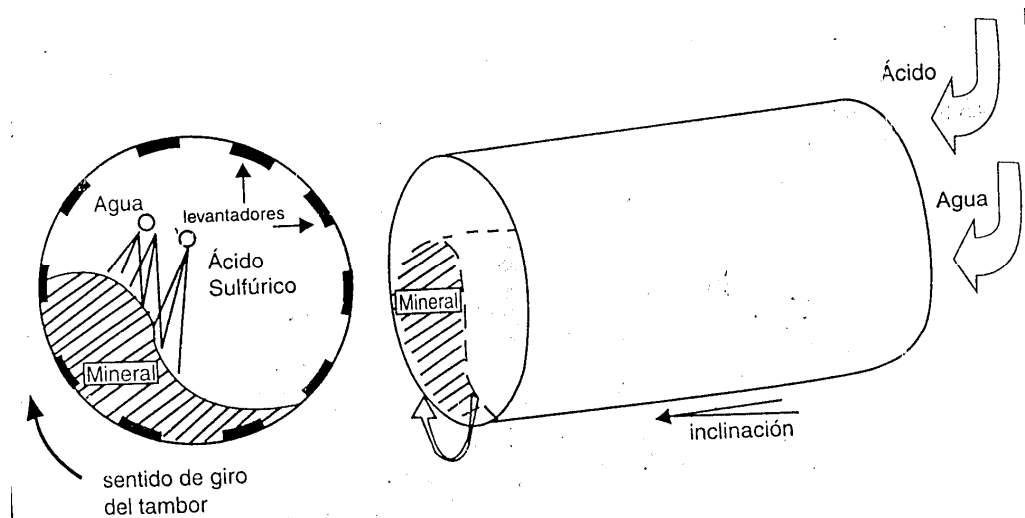


Figura 3: Representación esquemática de la operación de un tambor aglomerador

El mejor equipo para lograr estos efectos, de mezcla y de aglomeración, es el tambor aglomerador. Éste consiste en un cilindro metálico revestido interiormente con neopreno o goma antiácida provisto de levantadores para lograr una más efectiva acción de rodado de la carga, e incluyendo en el centro

las tuberías perforadas para el suministro del agua, siempre agregada primero, para humedecer el mineral, y luego, algo más al interior del tambor, para el suministro del ácido con concentrado, tal como se muestra en la figura 3.

Una variante frecuente consiste en reemplazar el agua, y parte del ácido, usando soluciones pobres del proceso: refino de la plantado extracción por solventes y/o la sangría de electrolito de la electrodeposición. En estos casos debe cuidarse de evitar que restos de orgánico atrapado por arrastre en el SX, ingresen al tambor, pues suele degradarse con el ácido concentrado y termina por contaminar todo el circuito de SX. Para evitar este efecto indeseable previamente a su ingreso al tambor, las soluciones pobres deben pasarse por una columna de carbón activado.



Figura 4: Tambores aglomeradores planta de lixiviación Minera El Abra

Aglomeración de minerales de oro

Para el tratamiento de los minerales de oro también se usan pilas de lixiviación, con similares métodos de aglomeración, carguío, impermeabilización del sustrato receptor y regadío. En estos casos también se realiza un acondicionamiento y aglomeración previa, utilizando, eso si, agua con cal y frecuentemente cemento. De esta manera, se acondiciona el lecho en pH alcalino y se proporciona una excelente permeabilidad, incluso para el tratamiento en pilas de granulometrías muy finas como son los relaves de flotación. Después de fraguar la cal y el cemento, se termina de proporcionar una excelente rigidez a los aglomerados, ya que los puentes líquidos son eventualmente reemplazados por puentes sólidos formados con el cemento, que permite incluso el tránsito sobre ellos con equipos livianos. El resto de los sistemas, tanto de riego como de recolección de soluciones, son similares al caso de la lixiviación con ácido.

Conclusiones

Una de las principales características distintivas de la lixiviación en pilas según el concepto TL, es el pretratamiento de los minerales. Esta operación consiste generalmente en una trituration del mineral, a un alto grado de fineza - al punto que resulta imposible su procesamiento posterior con las tecnologías existentes. La aglomeración de los finos en torno a las partículas mayores con agua y ácido sulfúrico concentrado permite elevar la resistencia del material mientras se mantiene una buena permeabilidad del lecho de mineral con el fin de alcanzar alturas de pilas adecuadas, mejorar los índices de recuperación de cobre y acortar los ciclos de lixiviación.

En síntesis, la combinación de alta trituration y buena permeabilidad es uno de los aspectos claves del proceso de lixiviación en pilas TL.

Referencias

- Codelco Norte, Metallurgical Balance 2003, Hydrometallurgy Management, 2003.
- Esteban Domic M., "Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones", Agosto 2001.
- Codelco Norte, Business and Development Plan, PND- 2004.
- F. Tomic, J. Alvarez. Codelco Press Conference, Results January - December 2003.
- Jorge Beckel, El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera, Red de Reestructuración y Competitividad, División de Desarrollo Productivo y Empresarial CEPAL, Santiago de Chile, mayo 2000.
- Revista minería chilena, volumen 279, septiembre 2004.
- <http://www.iimp.org.pe/>
- <http://www.codelcoeduca.cl/>

Anexos

Plantas de lixiviación TL en Chile

	Cerro Colorado	Codelco Norte Hidro Norte (ex RT)	Codelco Norte Hidro Sur Óxidos (ex Mina Sur)
1. Chancado			
Tonelaje medio de mineral tratado.	48.000 ton/día en dos plantas. Planta 1: 22.500 ton/día Planta 2: 25.500 ton/día	160.000 ton/día	19.000 ton/día
Configuración de la planta y equipos involucrados.	<p>Planta 1: Chancado 2º: 1 harnero Linatex 8'x24' tipo banana, doble bandeja en serie con 1 chancador de cono estándar Allis Chalmers de 84"x3".</p> <p>Chancado 3º: 3 chancadores Allis Chalmers de cono short head 84"x3" funcionando en circuito cerrado con 3 harneros Linatex 8'x24' tipo banana doble bandeja.</p> <p>Planta 2: Chancado 2º: 1 harnero Nordberg 8'x24' tipo banana, doble bandeja, en serie con 1 chancador de cono estándar Nordberg MP-1000.</p> <p>Chancado 3º: 2 chancadores de cono short head Nordberg MP-1000 funcionando en circuito cerrado con 2 harneros Nordberg 12'x27' tipo banana de una bandeja.</p>	<p>Chancado 1º: Fuller de 60"x110", OSS 254 mm.</p> <p>Chancado 2º: 7 líneas, cada una con un harnero y un chancador estándar Nordberg Symons de 7'.</p> <p>Chancado 3º: 5 líneas, cada una con un harnero y un chancador Hydrocone.</p>	<p>Chancado 1º: Allis Chalmer 54"</p> <p>Chancado 2º: 3 chancadores de cono estándar Nordberg de 7'; cada línea tiene un harnero de barra Tyler F-900 de 12'x6'.</p> <p>Chancado 3º: 6 chancadores de cono cabeza corta Norberg Symons de 7'.</p>
Granulometría típica del producto.	90% -1/2" y 12% -malla 100	16% +1"	30% -3/8"
2. Aglomeración-curado			
Características de los equipos	<p>Planta 1: 4 tambores de 2,7 m de diámetro por 8,0 m de largo, de 400 ton/hr. Velocidad 6 rpm e inclinación 5,5°. Dosis de curado 10-12 kg de ácido por ton seca. Humedad del aglomerado 85 – 90 kg refino/ton</p> <p>Planta 2: 2 tambores de 2,9 m de diámetro por 9,0 m de largo, de 650 ton/hr. Velocidad 8 rpm e inclinación 5,5°. Dosis de curado 10-12 kg de ácido por ton seca. Humedad del aglomerado 85-90 kg refino/ton</p>	<p>Curado ácido en correas en 2 etapas con un traspaso de mezcla en inter-etapa. Adición de 80% del consumo de ácido</p>	<p>2 aglomeradores de 3,33 m diámetro y 9,95 m largo, con 12° inclinación. Tiempo de residencia de 40 segundos. Adición de 45 kg de ácido/ton mineral.</p>

Codelco Norte Hidro Sur Sulfuros (ex SBL)	Collahuasi	El Abra	Escondida
1. Chancado			
Botadero existente	17.300 ton/día	114.000 ton/día.	55.000 ton/día.
No usa chancado	<p>Chancado 1º: 1 chancador Fuller Traylor 60"x89", 5860-6010 ton/hr.</p> <p>Chancado 2º: 1 hamero Nordberg, DM140D 8'x24' seguido de 1 chancador de cono estándar Nordberg, Symons 7', HD700STD, 738 ton/hr.</p> <p>Chancado 3º: 4 chancadores cabeza corta Nordberg, Symons 7', HD700 SH, 195 ton/hr y 4 hameros Nordberg, DM140D 8'x24'.</p>	<p>Chancado 1º: chancador giratorio Fuller de 60"x110".</p> <p>Chancado 2º: 3 líneas paralelas, cada una compuesta por un scalper de barras elípticas y un chancador de cono estándar Nordberg MP-1000, funcionando en serie.</p> <p>Chancado 3º: 6 líneas paralelas, cada una compuesta por un hamero tipo banana de 8,3 x 3,7 m y un chancador de cono cabeza corta Nordberg MP-1000, funcionando en serie.</p>	<p>Chancado 1º: chancador giratorio Fuller Traylor de 60"x89", producto -8", con una capacidad de diseño de 6.000 ton/hr.</p> <p>Chancado 2º: 2 hameros en serie con 2 chancadores Nordberg MP-1000 estándar de 7', producto -50 mm y con una capacidad de diseño de 1.210 ton/hr por chancador.</p> <p>Chancado 3º: 4 hameros en circuito cerrado con 4 chancadores Nordberg MP-1000 cabeza corta de 7', producto -19 mm y con una capacidad de diseño de 530 ton/hr por chancador.</p>
Run-of-mine	35 a 40% +3/8"; 10 a 13% -100#, P ₈₀ : 11 a 14 mm.	P ₈₀ : 15 mm, con máximo 8% +3/4"	P ₈₀ : 13 mm.
2. Aglomeración-curado			
Sin aglomeración	Dos tambores de 650 ton/hr de capacidad nominal c/u. Con 3,1 m de diámetro, 9,4 m de largo, motor 200 HP. Dosificación de ácido promedio 22 kg/ton.	Agglomeración en 3 tambores, cada uno de: diámetro 4,27 m y largo 13,1 m, con capacidad nominal de 2.400 ton/hr para c/u.	2 tambores de aglomeración de 3,9 m de diámetro por 12,2 m de largo y 7° de inclinación. Se agrega ácido 16 a 17 kg de ácido por ton de mineral seco, más solución de refino 35 a 40 m³/ton seca.

	Lomas Bayas	Mantos Blancos	Mantoverde
1. Chancado			
Tonelaje medio de mineral tratado.	36.000 ton/día	13.000 ton/día	25.000 ton/día
Configuración de la planta y equipos involucrados.	<p>Chancado 1º: 1 chancador giratorio Allis Chalmers 74"x54" .</p> <p>Chancado 2º: 1 hamero tipo banana de 10'x20' en serie con 1 chancador de cono estándar Nordberg Symons 7'.</p> <p>Chancado 3º: 2 hameros de 10'x24' y 2 chancadores de cono cabeza corta Nordberg MP-1000.</p>	<p>Chancado 1º: 1 chancador giratorio Allis Chalmers 42"x65".</p> <p>Chancado 2º: hameros Nordberg 6'x12' con chancadores Nordberg Symons std 5 1/2 ft (etapa secundaria e intermedia).</p> <p>Chancado 3º: hameros Simplicity 6'x12' y chancadores Nordberg Symons 5 1/2 ft short head.</p>	<p>Chancado 1º: 1 chancador giratorio Fuller 42"x65".</p> <p>Chancado 2º: hameros Osborn 8'x24' y chancadores Nordberg Symons std 7 ft SHD.</p> <p>Chancado 3º: hameros Osborn 8'x24' y chancadores Nordberg Symons 7 ft short head, SHD.</p>
Granulometría típica del producto.	P ₈₀ : 19 mm	70% a 75% -1/4"	-15 mm
2. Aglomeración-curado			
Características de los equipos	Curado en correas tipo portables (2), de 33 mt c/u, adición de ácido en chutes de traspaso.	Curado y aglomerado en 2 tambores marca Inamar de 2,7 m de diámetro y 8,2 m de largo.	Curado y aglomerado en 2 tambores marca Inamar de 2,9 m de diámetro y 9,0 m de largo.

Michilla	Quebrada Blanca	El Tesoro	Zaldívar
1. Chancado			
16.000 ton/día en dos plantas	21.000 ton/día	26.000 ton/día	55.000 ton/día
<p>Planta 1 Chancado 1º: 1 chancador Allis Chalmer, mandíbula 48"x60".</p> <p>Chancado 2º: 1 harnero Nordberg banana 8'x21' doble deck, seguido de 1 chancador Nordberg de cono HP-700.</p> <p>Chancado 3º: 2 chancadores de cono Allis Chalmer 2'x60" y 1 chancador de cono Nordberg HP-800 funcionando en circuito cerrado con 4 harneros Allis Chalmer SH 8'x16' doble deck.</p> <p>Planta 2 Chancado 1º: 1 chancador de mandíbula Kue-Ken 25'x50".</p> <p>Chancado 2º: 1 harnero Allis Chalmer XH 6'x14' doble deck seguido de 1 chancador Hydrocono Allis Chalmer, de 10'x60".</p> <p>Chancado 3º: 2 chancadores Nordberg Symons 5 1/2 funcionando en circuito cerrado con 1 harnero Allis Chalmer SH 8'x20' doble deck y 1 harnero Tyler 8'x20' doble deck.</p>	<p>Chancado 1º: chancador giratorio Allis Chalmer 54"x74".</p> <p>Chancado 2º: 1 harnero Tyler 8'x16' doble cubierta (32 mm) seguido por 1 chancador de cono Nordberg 7', estándar.</p> <p>Chancado 3º: 5 Chancadores de cono Nordberg 7', cabeza corta, funcionando en circuito cerrado con 5 harneros Tyler 8'x24' de doble cubierta (17 mm).</p>	<p>Chancado 1º: chancador giratorio Svedala, modelo 50'-65' Superior MKII.</p> <p>Chancado 2º: 2 harneros Svedala, triple deck, de 8'x20', seguido de 2 chancadores Hydrocono Svedala serie H6000 C.</p> <p>Chancado 3º: 4 chancadores Hydrocono Svedala, serie H6000 F en circuito abierto con 2 harneros Svedala, doble deck, de 8'x24'</p>	<p>Chancado 1º: chancador giratorio Nordberg 54"x75".</p> <p>Chancado 2º: 2 chancadores de cono estándar Nordberg MP-1000 seguidos de 2 harneros tipo banana Nordberg 10'x24'.</p> <p>Chancado 3º: 4 chancadores de cono Nordberg WF-800 y 2 chancadores Nordberg HP-500, en circuito cerrado con 4 harneros Allis de 10'x24'.</p>
99% -3/8", 85% -1/4" P ₈₀ : -6 mm	100% -1" y 80% -1/2"	93% -1/2"	80% -11,5 mm
2. Aglomeración-curado			
<p>Aglomeración en tambores con adición de ácido y agua. Tambores Nº 1 y Nº 2: 2,4 m diámetro y 8,3 m largo. Tambor Nº 3: 3,0 m diámetro y 7,0 m largo.</p>	<p>Curado y aglomerado en 2 tambores de 3 m de diámetro y 9 m de largo. Rotación 6 rpm e inclinación 7 °. Tiempo de residencia 55 seg. Capacidad de diseño: 525 ton secas/hr clu. Adición agua: 34,0 kg/ton seca, ácido: 5,4 kg/ton seca y humedad aglomerado: 9,3% Apilamiento con correas en cascada, transportador corto reversible (tripper) y apilador radial. Capacidad de diseño: 1.206 ton/h aglomeradas.</p>	<p>2 tambores de 3x9 m, rotación 6 rpm. Acido: entre 17 a 30 kg/t, dependiendo de las características del mineral.</p>	<p>Adición de ácido sulfúrico en correa a 12 kg/ton de mineral.</p>

Diagrama de flujo planta de lixiviación Radomiro Tomic

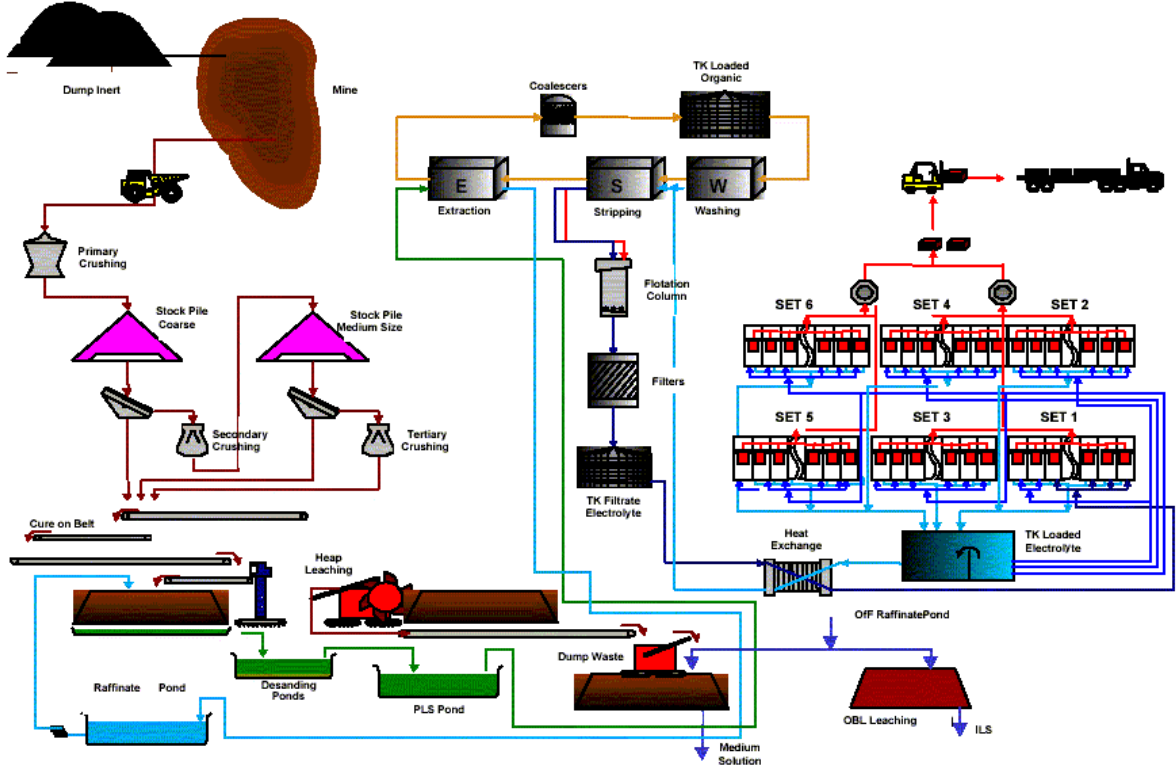


Diagrama de flujo planta de lixiviación Codelco Norte Hidro Sur Óxidos

