

INFLUENCIA DE LA DIRECCION EN QUE SE COLOCA EL MINERAL SOBRE LA ESTABILIDAD DE LA PILA

POR ING. M.E. SMITH Y DR. J.P. GIROUD

AUTORES: M.E. Smith, Gerente General, Vector Perú S.A.C., Lima, Perú. smith@vectoreng.com; y J.P. Giroud, Director, GeoSyntec Consultants, Boca Raton, Florida, USA. jpg@jpgiroud.com

INTRODUCCION

La experiencia indica que las pilas tienden a ser más inestables durante el proceso de apilamiento, si el mineral es apilado inicialmente en la dirección descendente de la gradiente. Esta creencia ha sido algunas veces cuestionada, ya que según el entender del autor no existen pruebas que la demuestren. En este documento se presenta una prueba que confirma la validez de esta creencia.

DESCRIPCION Y OPERACION DE LA CANCHA DE LIXIVIACION

Las gradientes de la cancha de lixiviación raramente son uniformes. En algunos lugares la gradiente de la cancha puede incrementarse para adaptarse a la topografía natural del suelo, a la vez que se reducen los costos que generan las obras de movimiento de tierra, o simplemente las variaciones locales pueden ser el resultado de un control deficiente del estudio topográfico, o debido a los ajustes en el campo realizados para adaptarse a alguna condición imprevista. En consecuencia, la gradiente puede ser en algunos lugares significativamente mayor que la gradiente generalmente especificada.

La geomembrana utilizada para revestir la cancha tiene resistencias al rasgado en su interfase con el material superficial (usualmente mineral quebrado) y el material subyacente (usualmente suelo). Estas resistencias suelen ser mucho menores que la resistencia al rasgado interna del mineral. En consecuencia, las potenciales superficies de deslizamiento de la pila de mineral se extienden a lo largo de la cara superior o inferior de la geomembrana. El mineral es apilado de una manera muy suelta con taludes conformados en capas en el ángulo de reposo. El apilamiento puede proceder en la dirección descendente de la gradiente o en la dirección ascendente de la gradiente, o en una dirección paralela a los contornos.

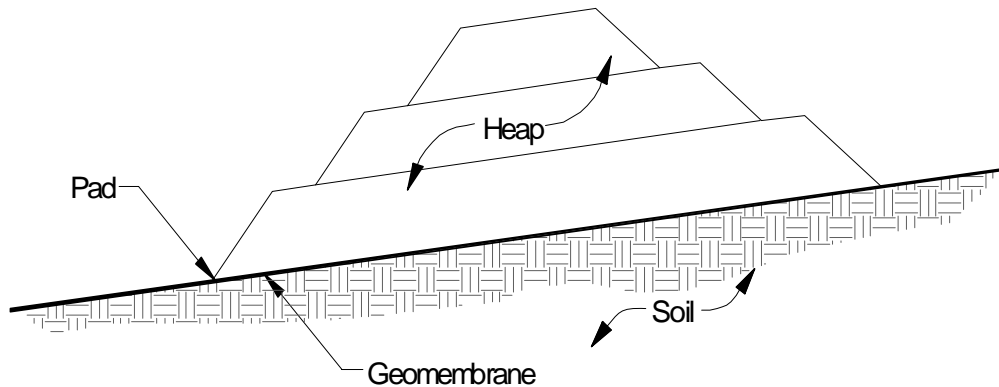


Figura 1. Sección transversal esquemática de una pila de lixiviación de mineral típica.

Nota: La pendiente del pad y el talud del mineral están exagerados.

Los bancos son usados comúnmente para reducir el promedio total del talud. Además, como el mineral suelto es lixiviado, hay un grado de compactación hidráulica y el peso adicional del levantamiento subsecuente compacta aún más el (los) levantamiento(s). La densidad aumentada resultante frecuentemente incrementa la resistencia al rasgado del mineral durante (los) levantamiento(s) más bajo(s). Finalmente, el peso de la carga del equipo con relación al peso de la pila del mineral es mayor en el primer levantamiento que en las etapas subsecuentes cuando la pila consta de varios levantamientos. Por ello, por las razones arriba mencionadas, una pila que comprende varios levantamientos con bancos es a menudo más estable que el primer levantamiento.

CONSIDERACIONES BASICAS DE ESTABILIDAD

Primero se considera una cancha revestida en geomembrana con una gradiente i uniforme ideal. Si sobre esta cancha se construye una pila de mineral con taludes idénticos en el lado de la gradiente ascendente y en el lado de la gradiente descendente (en adelante denominados talud de la gradiente ascendente y talud de la gradiente descendente, respectivamente), el factor de seguridad del talud de la gradiente descendente es menor que el factor de seguridad del talud de la gradiente ascendente, por ejemplo:

$$FS_d < FS_u \quad (1)$$

donde: FS_d = factor de seguridad del talud de la gradiente descendente cuando la gradiente de la cancha es i ; y FS_u = factor de seguridad del talud de la gradiente ascendente cuando la gradiente de la cancha es i . La ecuación 1 es una relación obvia que puede ser fácilmente verificada mediante cálculos elementales de estabilidad de taludes para el caso donde la superficie de deslizamiento se extiende a lo largo de la geomembrana.

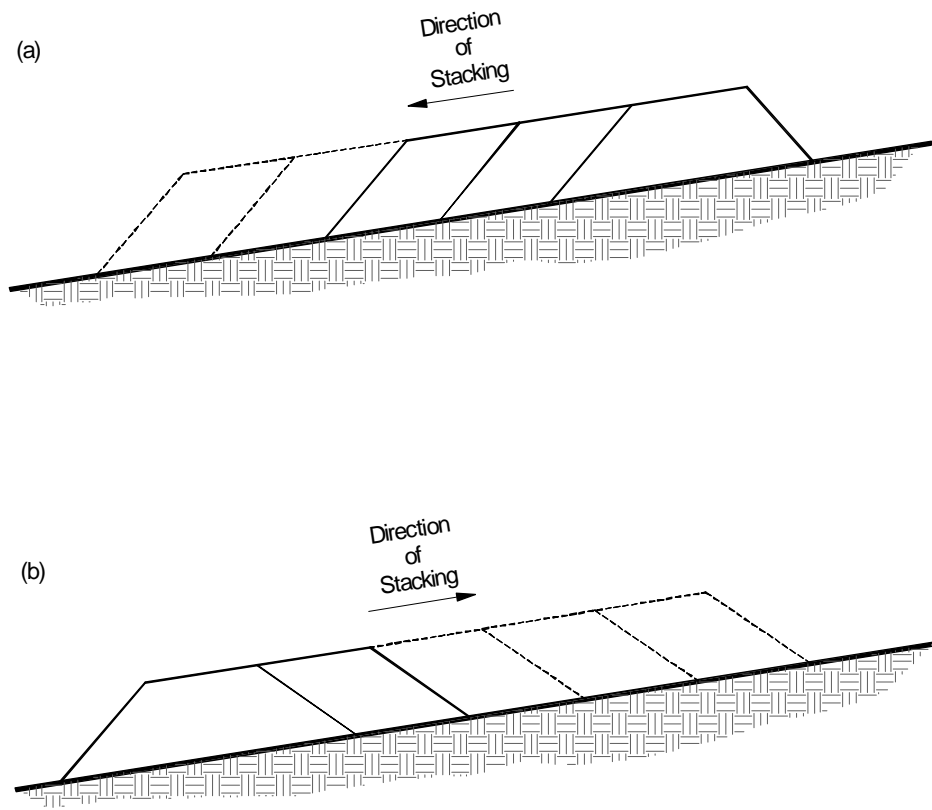


Figura 2. Apilamiento de mineral: (a) apilamiento pendiente abajo; (b) apilamiento pendiente arriba.

Nota: La pendiente del pad y los taludes del mineral están exagerados.

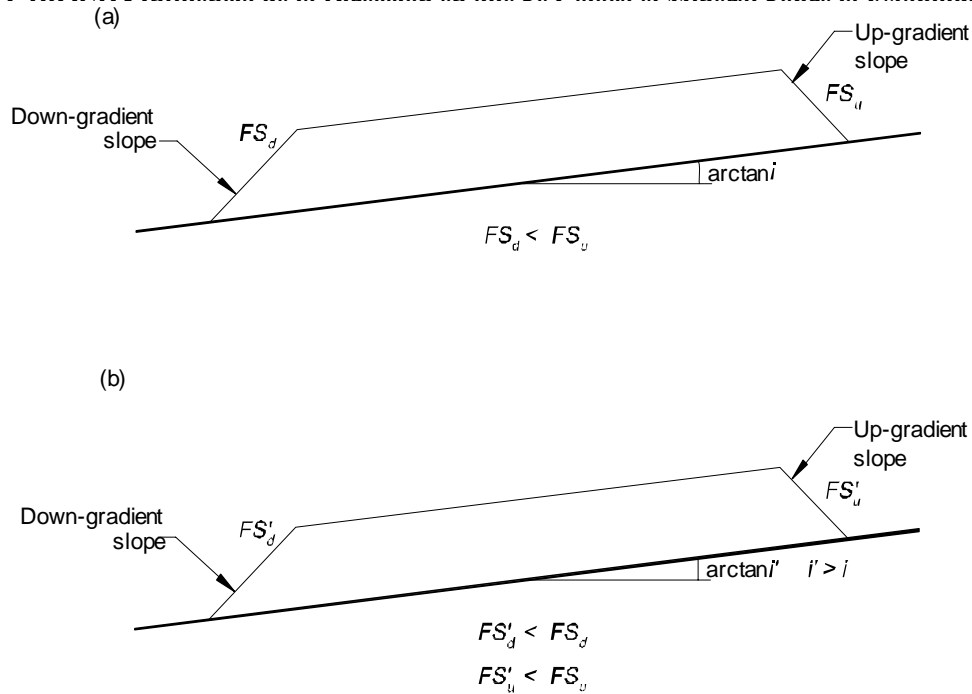


Figura 3. Influencia de la pendiente del pad en el factor de seguridad: (a) pad con pendiente uniforme i ; (b) pad con pendiente uniforme i' .

Nota: Los cuatro taludes de mineral son iguales.

Si la misma pila con los mismos taludes fuera construida sobre una cancha revestida con la misma geomembrana y tuviera una gradiente mayor ($i' > i$), las relaciones entre los factores de seguridad serían las siguientes:

$$FS'_d < FS_d \quad (2)$$

$$FS'_u > FS_u \quad (3)$$

donde: FS'_d = factor de seguridad del talud de la gradiente descendente cuando la gradiente de la cancha es i' ; y FS'_u = factor de seguridad del talud de la gradiente ascendente cuando la gradiente de la cancha es i' . Las ecuaciones 2 y 3 son relaciones obvias que pueden ser fácilmente verificadas mediante cálculos elementales de estabilidad de taludes para el caso donde la superficie de deslizamiento se extiende a lo largo de la geomembrana.

Según las ecuaciones 2 y 3, el incremento de la gradiente de la cancha reduce la estabilidad de un talud de gradiente descendente e incrementa la estabilidad de un talud de gradiente ascendente. Las ecuaciones 1, 2 y 3 constituyen la base de la demostración presentada en la siguiente sección.

Por razones prácticas, muchas pilas son diseñadas con taludes de gradiente ascendente promedio más empinados que los taludes de gradiente descendente promedio (mediante el uso de bancos más angostos sobre los taludes de gradiente ascendente) de tal manera que los factores de seguridad de diseño resultantes son casi iguales en los taludes de gradiente ascendente y de gradiente descendente.

ESTABILIDAD DURANTE LA CONSTRUCCION

El objetivo de este documento es considerar el caso de una cancha revestida con geomembrana con una gradiente que varía localmente. La gradiente es en todas partes igual o mayor a un valor mínimo especificado. Se asume que en la cancha existen “zonas críticas” que son suficientemente grandes y donde la gradiente es suficientemente alta que el factor de seguridad de un talud de gradiente descendente construido en una zona de ese tipo sería menor a 1.0. En otras palabras, un talud de gradiente descendente en una “zona crítica” se deslizaría. Se asume que, para obtener un impacto en la estabilidad del mineral, una zona crítica debe tener una extensión del orden de la altura del primer levantamiento de mineral. (El mismo concepto se aplica a la altura total de la pila, pero el análisis es en cierto modo diferente y va más allá de los alcances de este documento.)

Si se realiza un apilamiento en la dirección descendente de la gradiente se producirá un deslizamiento de mineral cuando el frente activo alcance una zona crítica. En contraste, si se realiza un apilamiento en la dirección ascendente de la gradiente, realmente aumentará la estabilidad del frente activo al alcanzar una zona crítica (tomando como base la ecuación 3). Se producirá un deslizamiento de mineral en el caso del apilamiento en la dirección descendente de la gradiente, sólo si una zona crítica se ubica en el borde de la gradiente descendente de la cancha, en cuyo caso el deslizamiento de mineral se produciría en la dirección descendente de la gradiente.

Si se ignoran los factores ajenos a la gradiente de la cancha, la probabilidad de que se produzca un deslizamiento es igual a la probabilidad de que exista una zona crítica (lo cual depende únicamente de la topografía de la cancha y, por ello, es independiente de la dirección del apilamiento) multiplicada por la probabilidad de que dicha zona esté ubicada en un área donde ocasione impacto sobre la estabilidad. Esta última es 1.0 en caso de un apilamiento en la dirección descendente de la gradiente y H/L en caso de un apilamiento en la dirección ascendente de la gradiente. Esto es cierto siempre y cuando se asuma que la distancia desde el borde de la cancha, donde una zona crítica puede provocar un deslizamiento en la dirección descendente de la gradiente, es casi igual a la altura, H , del levantamiento de mineral (donde L es la distancia entre los bordes de la cancha de la gradiente descendente y la gradiente ascendente siempre y cuando los taludes se ubiquen en una sola dirección, o donde L es la distancia entre el borde de la cancha que se esta tomando en consideración y el centro de la cancha siempre y cuando los taludes de la cancha se ubiquen en dos direcciones). Por ello, la probabilidad de que se produzca un deslizamiento es L/H veces mayor si el apilamiento es realizado en la dirección

descendente de la gradiente que si el apilamiento es realizado en la dirección ascendente de la gradiente. Evidentemente, existe un riesgo mucho mayor de que ocurra un deslizamiento si el apilamiento es realizado en la dirección descendente de la gradiente.

Sin embargo, debe observarse que los parámetros, excepto los relativos a la dirección del apilamiento, ejercen influencia sobre la estabilidad del mineral. Estos incluyen factores como las características del mineral y el contenido del agua, lo cual puede variar significativamente de un punto a otro y de tiempo en tiempo. Dichas variaciones pueden disminuir la gradiente requerida para que una zona se vuelva “crítica”. Debido a que siempre hay incertidumbres en dichos parámetros, no es posible “eliminar” totalmente el riesgo de falla en el caso del apilamiento de la gradiente ascendente, pero al menos este riesgo puede ser reducido en gran medida.

En los análisis anteriores, en ningún momento se ha hecho mención de las fuerzas impulsoras que probablemente ocasionen inestabilidad en el mineral. Las típicas fuerzas impulsoras constituyen el peso propio del mineral y la carga (incluyendo los componentes verticales y horizontales) aplicada por el equipo de apilamiento. La carga del equipo juega un papel importante, ya que frecuentemente se utilizan equipos muy grandes sobre un levantamiento de mineral relativamente delgado. Es importante observar que las conclusiones extraídas de los análisis anteriores son aplicables independientemente del tipo de fuerza impulsora. En el caso del apilamiento por medio de camiones y tractores niveladores, puede ocurrir que las acciones del equipo apliquen una fuerza impulsora sustancial a la pila, y la dirección de esa fuerza esté en la misma dirección que la dirección del apilamiento.

ESTABILIDAD A LARGO PLAZO

Los análisis anteriores muestran claramente que la estabilidad durante el apilamiento se ve afectada por la dirección del apilamiento. También es posible que la dirección del apilamiento afecte a largo plazo la estabilidad de la pila de mineral, no obstante esta hipótesis no es apoyada por ninguna evidencia clara de campo ni por la experiencia. Esta hipótesis está basada en los siguientes aspectos:

Una pila de mineral completa, o en una etapa avanzada de apilamiento, contiene muchos planos internos inclinados en el mismo ángulo en que se encuentra el mineral en reposo. Estos planos inclinados vienen a ser los taludes de mineral temporales presentes en cada fase de construcción.

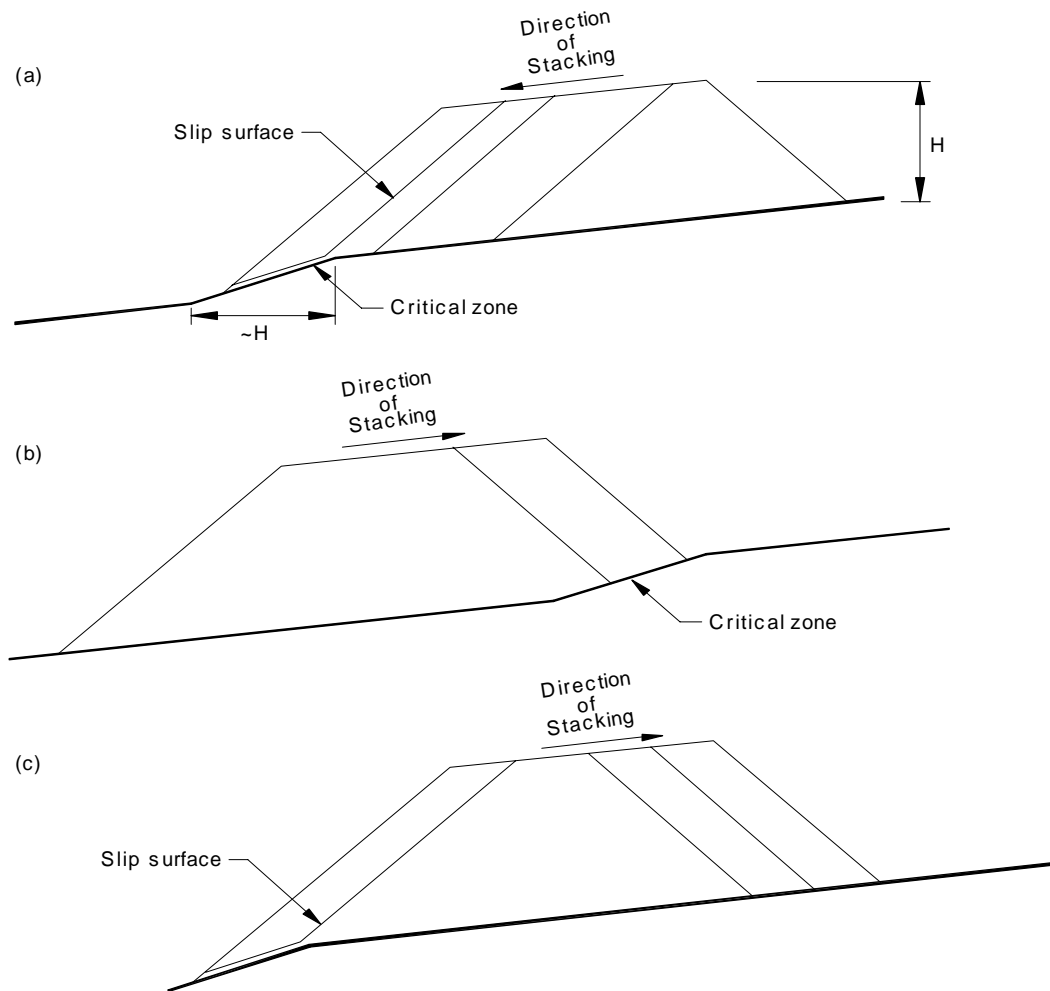


Figura 4. Influencia de la alta pendiente localizada en la estabilidad del mineral durante la construcción: (a) apilamiento pendiente abajo; (b) apilamiento pendiente arriba; (c) apilamiento pendiente arriba con una zona crítica en el extremo pendiente abajo del pad.

Nota: La línea continua más gruesa representa el revestimiento de geomembrana. Las líneas continuas representan etapas sucesivas de apilamiento. La línea discontinua representa la superficie de deslizamiento.

La resistencia al rasgado del mineral a lo largo de estos planos internos puede ser menor que a lo largo de cualquier otra superficie en el mineral. Esto puede deberse a que existe un menor entrelazamiento entre las partículas de mineral a lo largo de estos planos que dentro de la masa de mineral, o debido a la concentración de partículas más finas a lo largo de estos planos, ya que las piedras más grandes tienden a rodar hasta la base de la pila. Si bien es cierto que no existe evidencia directa documentada acerca de que la segregación origina

planos débiles, es bien conocido que dicha segregación conduce a un flujo no uniforme de soluciones dentro de la pila y, en casos extremos, origina zonas de inestabilidad debido a superficies de agua colgada y erosión de los taludes laterales.



Figure 5. Vista lateral de una capa de mineral mostrando planos paralelos con un talud igual al ángulo de reposo.

Debido a que es más probable que la inestabilidad de la pila tenga lugar en la dirección descendente de la gradiente, tal como se ha expuesto, existe mayor posibilidad de que los planos internos que tienen baja resistencia al rasgado ocasionen inestabilidad si se deslizan en la dirección descendente de la gradiente que si se deslizan en la dirección ascendente de la gradiente. En una pila apilada en la dirección descendente de la gradiente todos los planos internos se deslizan en la dirección descendente de la gradiente.

Sobre la base de la razón fundamental expuesta líneas arriba, las pilas de mineral apiladas en la dirección descendente de la gradiente tienen mayor probabilidad de ser inestables a largo plazo que las pilas de mineral apiladas en la dirección ascendente de la gradiente. Sin embargo, debe observarse que la razón fundamental expuesta líneas arriba se basa en la suposición de que los planos internos que tienen baja resistencia al rasgado sean el resultado de las fases de apilamiento, suposición que no ha sido evaluada experimentalmente.

Existe otro mecanismo a través del cual la dirección del apilamiento puede causar impacto sobre la estabilidad a largo plazo de la pila de mineral. Las fallas localizadas que se producen durante el apilamiento, si no son tan serias como para requerir reparación del revestimiento, pueden convertirse en desplazamientos de tal tipo que sólo quede una resistencia al rasgado post-pico para futuros deslizamientos potenciales a lo largo de la misma superficie de deslizamiento. Debido a que es más probable que las fallas localizadas, que se producen durante el apilamiento, y las fallas de la pila terminada, que se producen en una etapa posterior, tengan porciones de superficie de deslizamiento en común a lo largo del revestimiento de geomembrana, el factor de seguridad para la estabilidad a largo plazo de la pila de mineral se ve reducido si la falla local se produce durante el apilamiento. Debido a que la probabilidad de que se produzcan fallas localizadas durante el apilamiento es mayor con un apilamiento de gradiente descendente que con un apilamiento de gradiente ascendente, resulta que la probabilidad de que se reduzca el factor de seguridad para la estabilidad a largo plazo es mayor en el caso del apilamiento de gradiente descendente.

CONCLUSION

Se ha demostrado que, cuando la gradiente de la cancha no es rigurosamente uniforme (que generalmente es el caso), la probabilidad de un deslizamiento de mineral durante el apilamiento de mineral sobre una cancha de lixiviación es mucho mayor si el mineral es apilado en la dirección descendente de la gradiente que si es apilado en la dirección ascendente de la gradiente. Esto es compatible con la experiencia en la industria minera. También se ha demostrado que, si se toman precauciones simples, es posible minimizar (quizás eliminar) el riesgo de que se produzca un deslizamiento de mineral durante la construcción, en el caso del apilamiento en la dirección ascendente de la gradiente.

También se ha demostrado que existe una posibilidad de que una pila pueda presentar mayor inestabilidad a largo plazo si ha sido apilada en la dirección descendente de la gradiente que si ha sido apilada en la dirección ascendente de la gradiente. Sin embargo, esta posibilidad no ha sido evaluada experimentalmente. Asimismo, debe observarse que, en varios casos, es menos probable que se produzca una inestabilidad del mineral a largo plazo que durante el apilamiento del primer levantamiento, por diversas razones.

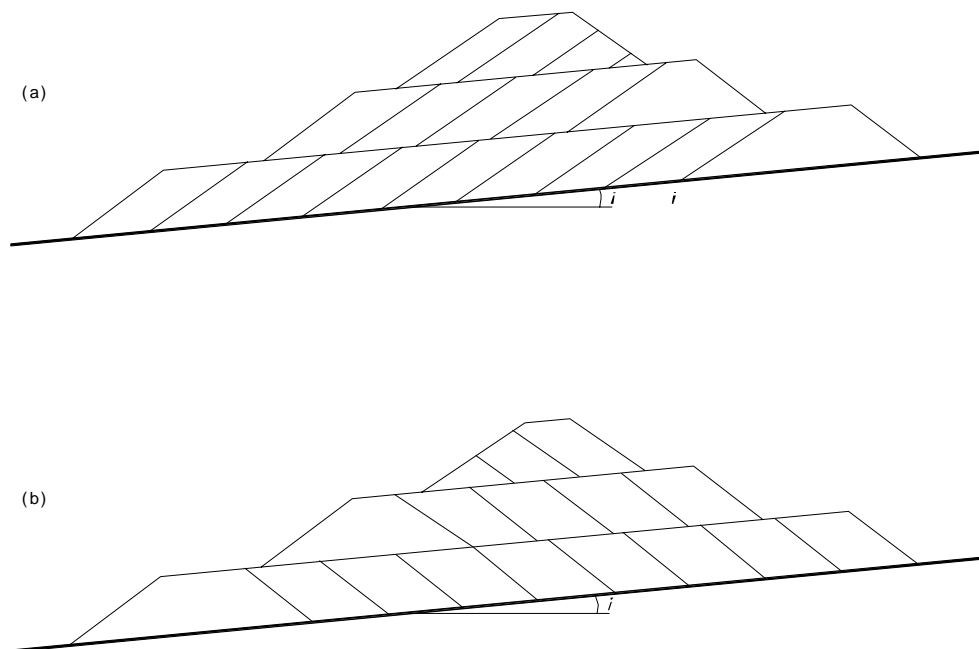


Figura 6: Planos internos en una pila de mineral: (a) apilamiento en la dirección pendiente abajo; (b) apilamiento en la dirección pendiente arriba.

Además, debe observarse que en algunos casos es más probable que se produzca la inestabilidad de la pila de mineral durante la colocación del mineral que a largo plazo, pues el primer levantamiento de mineral tiene un talud más inclinado que el que tiene el talud promedio, incluyendo los bancos entre levantamientos.

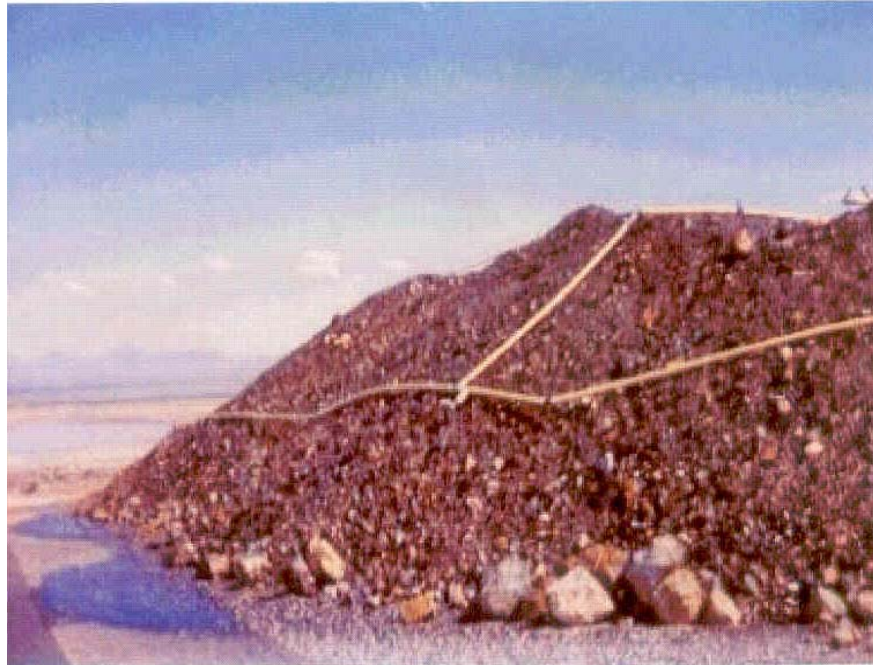


Figura 7: Segregación del mineral