

MATERIAL TIPO SUELO Y MÉTODO PARA FABRICAR UNA BARRERA PARA CONTENER RESIDUOS

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

[0001] La presente invención se refiere a un nuevo material predominantemente agregado, tipo suelo, y a métodos mejorados que usan este material para construir capas de barrera útiles para contener material de desecho, particularmente en áreas geológicas que carecen de suelos cohesivos de grano fino suficientemente impermeables como para formar barreras tradicionales, tales como sitios mineros.

[0002] Los suelos se clasifican tradicionalmente según una serie de criterios, que incluyen: (a) el tamaño del grano o la partícula (por ejemplo, grueso o fino); (b) la distribución del tamaño del grano (por ejemplo, bien graduado o mal graduado, y la presencia o ausencia de finos); y, (c) para suelos de grano más fino, también en base a propiedades que varían según el impacto del contenido de humedad (por ejemplo, índice de plasticidad, límite de líquido y otros límites de Atterberg). Las clases reciben nombres descriptivos específicos basados en estos criterios. El Sistema de Clasificación de Suelos de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) son dos sistemas bien establecidos para clasificar los suelos. Estos están representados en las Figuras 1A y 1B, respectivamente. El SUCS se usará en la presente para hacer referencia a distintos tipos de suelo.

[0003] Tradicionalmente, las barreras de baja permeabilidad para minimizar el transporte de fluidos en rellenos sanitarios, embalses y represas se han construido de suelos arcillosos naturales de grano fino clasificados como suelos CL, ML o SC. En algunas circunstancias, los suelos naturales se aumentan modificándolos con otros minerales arcillosos como la montmorillonita para incrementar los porcentajes de suelo de grano fino, reduciendo así la permeabilidad del material. Los sistemas de revestimiento del suelo recompactados construidos con suelos de grano fino pueden ser difíciles y costosos de construir. Además, muchos sitios geológicos, como las aplicaciones mineras, están desprovistos de suelos adecuados de grano fino local y, en cambio, tienen grandes cantidades de sobrecarga, roca residual y relaves que deben eliminarse. Y debido a que las operaciones mineras a menudo existen en áreas remotas, surgen desafíos logísticos y de costos para transportar grandes cantidades de suelos compactos adecuados al sitio, y transportar los materiales de desecho fuera del sitio.

[0004] Además, los sistemas de revestimiento sintético, como los revestimientos de membrana flexible de polietileno de alta densidad sin revestimientos de suelo adecuados, a menudo están sujetos a fallas dramáticas con el paso del tiempo como resultado de las esfuerzos de corte inducidas por el asentamiento, en particular cuando los productos de desecho superpuestos son agregados, con formas subangular o angulares que pueden exacerbar, perforar o desgarrar los revestimientos de membrana.

[0005] La publicación de patente estadounidense 2013/0272795 describe el uso de partículas compuestas (AquaBlok®) en cubiertas de vertederos. La patente estadounidense 7.438.500 de Hull describe capas de barrera que comprenden una mezcla (BlendedBarrier™) de partículas agregadas y partículas compuestas fabricadas (AquaBlok®) en una relación de aproximadamente 50 % a 50 % (1:1), en peso. Estas capas de barrera pueden formar una capa de barrera subacuática que es muy impermeable al agua y resistente a la erosión. La baja permeabilidad al agua evita que los contaminantes en una superficie submarina se desplacen por advección en la columna de agua suprayacente. El material AquaBlok® es autocompactante cuando se hidrata con agua y puede lograr permeabilidades en el rango de 10^{-9} cm/s. Sin embargo, la ubicación alejada de los vertederos de desechos y de los yacimientos mineros a menudo plantea los mismos desafíos logísticos que implica el transporte de grandes cantidades de partículas compuestas.

[0006] Más allá de la falta de disponibilidad, otro problema con el uso de suelos arcillosos de grano fino y cohesivo clasificados como CL, ML o SC, es que pueden no tener la resistencia al corte para soportar las cargas de sobrecarga significativas que a menudo se encuentran en los sitios de relave o de escombros de la mina. Las mismas propiedades del suelo que contribuyen a la impermeabilidad relativa son aquellas que también contribuyen a una alta plasticidad y moldeabilidad. Además, bajo presiones (cargas) normales mayores, los materiales granulares exhiben una resistencia al corte mucho mayor que los suelos cohesivos de grano fino que se utilizan normalmente en revestimientos de suelo recompactados.

[0007] Además, si la arcilla en polvo como la bentonita o la atapulgita simplemente se mezcla con el agregado y la arena en un intento de sellar los huecos de aire para formar una capa impermeable, la vibración que se produce durante la colocación y la compactación de las capas tenderá a segregar la bentonita y otros finos presentes en las partes inferiores de la capa, creando una barrera no homogénea susceptible de fugas. Los agregados típicos y las mezclas de arena con bajo contenido de arcilla rara

vez pueden lograr permeabilidades compactadas menores de 1×10^{-6} cm/s.

[0008] Por lo tanto, sería ventajoso formar capas de barrera impermeables en sitios geológicos remotos que usen agregados y arenas predominantemente disponibles a nivel local (u otros suelos de grano fino), que sirven tanto para hacer uso de materiales fácilmente disponibles para sitios específicos como para minimizar la importación de materiales manufacturados.

SÍNTESIS DE LA INVENCION

[0009] La invención hace referencia a un nuevo material artificial tipo suelo que tiene propiedades únicas. En un primer aspecto, la invención se refiere a un material tipo suelo, hecho por el hombre, de baja permeabilidad, que comprende

alrededor de 20 a alrededor de 50 % en peso de agregado grueso con número de tamaño estándar de AASHTO de 4 a 10;

alrededor de 20 a alrededor de 50 % en peso de partículas finas;

alrededor de 20 a alrededor de 40 % en peso de una partícula compuesta, teniendo la partícula compuesta un núcleo agregado recubierto con una capa de recubrimiento hidratable de arcilla hinchable;

el material tipo suelo tiene una permeabilidad de 1×10^{-7} cm/s o menos cuando se compacta dentro del 95 % de su densidad seca máxima con un contenido de humedad óptimo usando una densidad de Proctor estándar o el 90 % usando una densidad de Proctor modificado.

[0010] En otro aspecto, la invención se refiere a capas o revestimientos de barrera que comprenden el material artificial tipo suelo descrito anteriormente compactado a una densidad que logrará una permeabilidad deseada.

[0011] En otro sentido, la invención se refiere a un método para hacer capas o revestimientos de barrera que comprenden el material artificial tipo suelo descrito anteriormente, al aplicar una pluralidad de levantamientos sueltos del material tipo suelo de acuerdo con la reivindicación 1 a un cimiento de base; agregar humedad a cada levantamiento suelto; y compactar cada levantamiento dentro del 90 % o 95 % de su densidad seca máxima antes de aplicar la levantamiento suelto posterior.

[0012] En otro orden, la invención se refiere a un método para contener materiales de desecho contaminados utilizando una capa de barrera y/o revestimiento que comprende el material artificial tipo suelo descrito anteriormente. Los residuos contaminados ejemplares incluyen relaves de las minas.

[0013] Otras características y ventajas de la invención se harán evidentes a partir de la descripción detallada que sigue.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0014] Los dibujos adjuntos, incorporados en la presente y que forman parte de la especificación, ilustran la presente invención en sus diversos aspectos y, junto con la descripción, sirven para explicar los principios de la invención. En los dibujos, el espesor de las líneas, capas y regiones puede ser exagerado para mayor claridad.

[0015] Las Figuras 1A y 1B son representaciones de los sistemas de clasificación de suelos AASHTO y SUCS, respectivamente.

[0016] Las Figuras 2A y 2B son curvas de compactación Proctor generalizadas.

[0017] La Figura 3 es un diagrama de bloques de un método de acuerdo con la invención.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

[0018] La invención se refiere a métodos de usar partículas compuestas para instalar una capa de barrera por encima o debajo de los desechos contaminados que se encuentran típicamente en lugares de minería, tales como relaves de minas, subproductos de refinación de mineral que, cuando se exponen a la precipitación, pueden crear flujos contaminados que podrían impactar de manera adversa en aguas superficiales o subterráneas.

[0019] Las personas del oficio de nivel medio se darán cuenta de que la siguiente descripción detallada de las formas de realización es solo ilustrativa y no pretende ser limitante en modo alguno. Otras se sugerirán fácilmente a aquellas personas expertas que tengan el beneficio de esta divulgación. La referencia a una "forma de realización", "aspecto" o "ejemplo" en la presente indica que las formas de realización de la invención así descritas pueden incluir una cualidad, estructura o característica particular, pero no todas las formas de realización incluyen necesariamente la cualidad, estructura o característica particular. Además, el uso repetido de la frase "en una forma de realización" no se refiere necesariamente a la misma forma de realización, aunque puede hacerlo.

[0020] A menos que se defina lo contrario, todos los términos técnicos y científicos usados en la presente tienen el mismo significado que entiende comúnmente una persona capacitada en la técnica a la que pertenece la invención. Aunque cualquier método y materiales similares o equivalentes a los descritos en la presente se pueden usar en la práctica o ensayo de la presente invención, los métodos y materiales preferidos se describen en la presente. Todas las referencias citadas en la presente, incluidos libros, artículos de revistas, solicitudes de patentes publicadas estadounidenses o extranjeras, patentes estadounidenses o extranjeras emitidas y

cualquier otra referencia, se incorporan por referencia en su totalidad, incluidos todos los datos, tablas, figuras y textos presentados en las referencias citadas.

[0021] Los rangos numéricos, las mediciones y los parámetros utilizados para caracterizar la invención (por ejemplo, grados angulares, cantidades de ingredientes, pesos moleculares de polímeros, condiciones de reacción (pH, temperaturas, niveles de carga, etc.), dimensiones físicas, etc., son necesariamente aproximaciones; y, aunque se informan con la mayor precisión posible, contienen inherentemente imprecisiones derivadas de sus respectivas mediciones. En consecuencia, todos los números que expresan rangos de magnitudes como se usan en la especificación y las reivindicaciones deben entenderse como modificados en todos los casos por el término "alrededor de". Se entiende que todos los rangos numéricos incluyen todos los subrangos incrementales posibles dentro de los límites externos del rango. Por lo tanto, un rango de 30 a 90 unidades revela, por ejemplo, 35 a 50 unidades, 45 a 85 unidades y 40 a 80 unidades, etc. A menos que se defina lo contrario, los porcentajes son peso/peso%.

[0022] Además, se puede esperar que las formulaciones precisas varíen para reflejar las características específicas de los agregados de origen local y los suelos destinados a usarse en la producción del producto.

Propiedades físicas del suelo y estándares de ensayos

[0023] Muchas propiedades del suelo dependen del tamaño del grano o partícula del suelo. AASHTO y SUCS (véanse las Figuras 1A y 1B) ilustran esto. El primer paso en ambos sistemas es la determinación del tamaño de la partícula y la distribución de tamaño que se realiza mediante tamizado. En general, cuanto mayor es el tamaño de la partícula, más grandes son los espacios de aire entre las partículas, lo que resulta en un material más permeable. Los suelos bien graduados son aquellos que tienen distribuciones de tamaño más amplias, de modo que se representan todos los tamaños dentro de los límites de rango. En contraste, los suelos mal graduados (también llamados "uniformemente graduados") son aquellos que tienen una distribución de tamaño más estrecha. Los suelos se clasifican de esta manera según los parámetros "coeficiente de uniformidad", C_u , y el "coeficiente de curvatura", C_c , que se determinan de acuerdo con fórmulas basadas en los diámetros de grano a varios porcentajes de velocidad de paso. Para un rango de tamaño de partícula dado, un suelo bien graduado es menos permeable, ya que las partículas de tamaño más pequeño pueden llenar los espacios de aire entre las partículas de tamaño más

grande. Hasta cierto punto, los finos, si están presentes en cantidades mayores, también llenan los vacíos y contribuyen a la impermeabilidad.

[0024] La permeabilidad se define como conductividad hidráulica y es la velocidad a la que fluye el agua a través de un suelo. Se mide en cm/s o, a veces, en pies/día, y depende del gradiente de presión aplicado a la muestra. La norma ASTM D5084, Conductividad hidráulica de materiales porosos saturados con un permeámetro de pared flexible, proporciona detalles de la medición. La siguiente Tabla A proporciona las permeabilidades de agua subterránea de algunos suelos naturales.

[0025] Tabla A: Conductividad hidráulica de suelos seleccionados

K (cm/s)	10^2	10^1	$10^0=1$	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}
K (ft/día)	10^5	10.000	1.000	100	10	1	0,1	0,01	0,001	0,0001	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
Permeabilidad relativa	Permeable			Semipermeable				No permeable					
Acuífer	Bueno			Malo				Ninguno					
Arena y Grava no consolidadas	Grava bien seleccionada		Arena o Arena y grava bien seleccionadas		Arena muy fina, limo, loess y marga								
Arcilla no consolidada y orgánica				Turba		Arcilla en capas		Arcilla grasa/desgastada					
Rocas consolidadas	Rocas altamente fracturadas			Rocas de yacimientos petrolíferos		Arenisca fresca		Piedra caliza, dolomita frescas		Granito fresco			

Fuente: modificado de Bear, 1972

L

[0026] Si bien la conductividad hidráulica es obviamente un continuo de más de 10 órdenes de magnitud, para los fines de esta invención, un material se considera "impermeable" si tiene una conductividad hidráulica de 1×10^{-6} cm/s o menos (por ejemplo, a la derecha de la línea etiquetada L), y permeable si la conductividad es mayor de 1×10^{-6} cm/s (a la izquierda de la línea etiquetada L). Las notaciones 1×10^{-n} y $10E-n$ se entienden como expresiones equivalentes del mismo número.

[0027] Para el doble propósito de contener los lixiviados de los materiales residuales y/o minimizar la infiltración de la precipitación que puede resultar en la producción de lixiviados, es deseable una permeabilidad de 1×10^{-7} cm/s. Se entenderá que el uso de capas y revestimientos altamente impermeables puede resultar en la reducción del espesor de la capa y/o el revestimiento general sin pérdida de rendimiento, lo que reduce potencialmente los costos. En la Tabla A, se puede ver que muy pocos suelos naturales tienen suficiente impermeabilidad para formar barreras para los residuos.

[0028] Se pueden usar varios métodos para determinar el contenido de agua de los suelos. En el laboratorio, se utiliza un método de calentamiento por microondas de

acuerdo con: Determinación del contenido de agua en el suelo mediante calentamiento por horno microondas (ASTM D4643). En el campo, las muestras de suelo *in situ* pueden analizarse, incluso en compactación, para determinar la densidad (es decir, el peso unitario) y el contenido de agua mediante: Densidad y contenido de agua del suelo y el agregado de suelo en su lugar mediante métodos nucleares (ASTM D6938). La densidad y el peso unitario de los suelos mediante el método del cono de arena (ASTM D1556) es un método de ensayo alternativo utilizado durante los ensayos de compactación para determinar la densidad del suelo *in situ* y el peso unitario.

[0029] Características de compactación de laboratorio del suelo utilizando esfuerzo estándar (ASTM D698-12) es un método de ensayo de laboratorio comúnmente denominado Ensayo Proctor estándar. Es un método para determinar experimentalmente el contenido óptimo de humedad (OMC) en % en peso, en el que un tipo de suelo dado se volverá más denso y alcanzará su densidad seca máxima (MDD), medida en libras/pie cúbico, con una entrada de energía fija. Un Ensayo Proctor modificado (ASTM D1557-09) es un ensayo muy similar, pero utiliza una fuerza o esfuerzo de energía mucho más alto para compactar la muestra. Estos ensayos consisten en compactar el suelo con un contenido de humedad conocido en un molde cilíndrico utilizando un patrón controlado de golpes de esfuerzo conocido. El proceso se repite para otros contenidos de humedad y las densidades después del secado se representan en función del contenido de humedad para establecer la curva de compactación. La MDD se obtiene a partir del punto máximo de la curva de compactación; su contenido de humedad correspondiente se conoce como el contenido de humedad óptimo (OMC).

[0030] La Figura 2A es una curva de compactación de Proctor representativa para suelos de diferentes tipos. Sugiere que, de los cuatro tipos, la MDD más alta es alcanzable con limos arenosos en el OMC más bajo, seguido en segundo lugar por las arcillas limosas. A la inversa, la MDD más baja se logró con arenas mal graduadas. La Figura 2B es un gráfico similar que indica los resultados relativos esperados comparando un Ensayo Proctor modificado con un Ensayo Proctor estándar.

Material mezclado tipo suelo único

[0031] El término "material tipo suelo", como se usa en la presente, se refiere a una mezcla de tres materiales predominantemente agregados que produce un nuevo material tipo suelo con propiedades únicas. Los tres materiales agregados son: (1) agregado de grano grueso; (2) material particulado de grano fino, como arena; y (3)

partículas compuestas, como las partículas AquaBlok®, que son típicamente un núcleo de agregado recubierto con un recubrimiento de arcilla mineral. Cada uno de los tres ingredientes principales se trata con más detalle en las secciones a continuación.

[0032] Las proporciones de los tres ingredientes son variables según la disponibilidad de materiales específicos del sitio y las propiedades deseadas. La Tabla B a continuación proporciona algunos rangos y ejemplos típicos de relaciones de mezcla útiles. En la Tabla B, se supone que la arcilla es ~20 % en peso de la partícula compuesta y se informa en la Tabla como un % en peso del peso total de la mezcla; está comprendida dentro del % del peso de la partícula compuesta, y no como un aditivo de este.

[0033] Tabla B. Proporciones de composición de la mezcla (en % en peso)

Ingrediente	Rango	Ej. 1	Ej. 2	Ej. 3	Ej. 4	Ej. 5
Agregado grueso	20-50	35	30	32,5	30	35
Partículas finas	20-60	35	30	32,5	40	25
Partícula compuesta	20-50	30	40	35	30	40
% arcilla		~6	~8	~7	~6	~8

[0034] El agregado grueso y las partículas finas son preferentemente materiales fácilmente disponibles, específicos del sitio o pueden prepararse a partir de ellos. Las partículas compuestas se pueden preparar de acuerdo con la literatura descrita en la presente. La mezcla es una simple cuestión de mezclar los tres materiales de las tolvas de celdas de carga, utilizando la carga del transportador directamente en una tolva de mezcla, que se descarga directamente en un transportador de colocación que atraviesa la superficie sobre la cual se construirá la barrera.

[0035] El material tipo suelo puede caracterizarse por varias cualidades. Al ser similares a los suelos, pueden clasificarse como tales usando, por ejemplo, el Sistema de SUCS que se describe en la Figura 1B, que se siguió en gran medida para la clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (D2487 ASTM). En función del análisis del tamaño de grano según este sistema, el material tipo suelo de la invención se puede caracterizar como un material granular no plástico, que se compone de una arena mal graduada con limo y grava (SP-SM), arena mal graduada con grava (SP), arena bien graduada con limo y grava (SW-SM).

[0036] Dado que son materiales particulados, la graduación de los materiales de tres ingredientes es aplicable, al igual que lo es para los suelos. Por ejemplo, un agregado uniformemente (mal) graduado podría ir mejor con una arena bien graduada, o viceversa. Las partículas compuestas tienden a ser más uniformemente graduadas, pero pueden coincidir con partículas finas bien graduadas o uniformemente (mal)

graduadas y/o bien graduadas o uniformemente (mal) graduadas. En relación con el componente de partículas compuestas, el tamaño y el volumen pueden variar según el contenido y el tipo relativos de arena/suelo.

[0037] El nuevo material tipo suelo de la invención también se puede caracterizar por la distribución del tamaño de los agregados. Debido a que el material es predominantemente un producto de grano grueso, en algunas formas de realización, alrededor de un 50 % o más del material será retenido por un tamiz #50. En algunas formas de realización, alrededor de 70 % o más, por ejemplo 80 % o más, es retenido por un tamiz #100. En algunas formas de realización, alrededor de 80 % o más, por ejemplo 90 % o más, es retenido por un tamiz #200. Como resultado de su naturaleza gruesa, se espera que el material tenga propiedades de resistencia al corte similares a un material granular (por ejemplo, cohesión relativamente pequeña y mayor ángulo de fricción interna).

[0038] La resistencia al corte del suelo (es decir, la magnitud de la tensión de corte que puede soportar un suelo) depende del esfuerzo efectivo, las condiciones de drenaje, la densidad de las partículas y la velocidad de deformación. La resistencia al corte del suelo es el resultado de la fricción y el entrelazamiento de partículas. Debido a este entrelazamiento, las partículas del suelo pueden expandirse o contraerse en volumen, ya que está sujeto a deformaciones por cizallamiento. Si el suelo expande su volumen, la densidad de las partículas disminuirá y la resistencia disminuirá. Según las observaciones de los ensayos de permeabilidad realizados en el material tipo suelo, no parece que el material exhibiera cambios/expansión de volumen y parece haberse consolidado con un aumento en las presiones de confinamiento (probado hasta aproximadamente 100 psi). Esto sugiere que hay un contacto sustancial de partícula a partícula, proporcionando así un ángulo de fricción relativamente alto (por ejemplo, como material granular), que se corrobora por el hecho de que el producto es un material granular.

[0039] A modo de comparación, los rellenos sanitarios, las lagunas y otras instalaciones de contención de desechos, que normalmente utilizan un revestimiento de suelo de grano fino y compactado para lograr los requisitos de permeabilidad, requieren suelos de grano fino y altamente cohesivos (por ejemplo, suelos con CL, CL-ML, GC, SC o Designaciones SM SUCS) para el revestimiento o la capa. Los suelos cohesivos y de grano fino recompatados suelen tener ángulos de fricción interna más bajos, pero mayores resistencias al corte por cohesión, en comparación con los materiales granulares. Además, la resistencia al corte de los suelos cohesivos de

grano fino es una función del contenido de humedad del suelo; un suelo con un contenido de humedad mucho más húmedo (o más seco) que el contenido de humedad óptimo suele tener una resistencia al corte más baja en comparación con los suelos cercanos a la humedad óptima. Los valores típicos de resistencia al corte a largo plazo (drenados) para materiales de revestimiento de suelo de grano fino cohesivos y compactados tienen cohesiones de 100 a 750 libras por pie cuadrado (psf) o más (alrededor de 5 a 36 kPa o más) con ángulos de fricción interna normalmente entre 15 y 28 grados; y las resistencias al corte típicas a corto plazo (no drenadas) pueden variar de 1.000 a 4.000 psf (de alrededor de 48 a 190 kPa).

[0040] En contraste, el material tipo suelo de acuerdo con la invención, que es en gran parte un agregado grueso, tiene un mayor ángulo de fricción interna, que se espera que proporcione mayores resistencias al corte a mayores resistencias al corte en comparación con los suelos de grano fino. Ventajosamente, el contenido de humedad no suele ser un factor significativo en la resistencia al corte para el material granular, por lo que se minimiza o evita la sensibilidad a la humedad demostrada por los suelos cohesivos de grano fino. Por último, se anticipa que el material tipo suelo según la invención tendrá ángulos de fricción interna que oscilarán entre 27 y 35 grados (*Soil Mechanics*, 6.^a ed., por R.F. Craig) y probablemente no tendrá cohesión. Cuando se consideran rellenos de terraplenes relativamente grandes (por ejemplo, a una presión/esfuerzo de corte normales de aproximadamente 25.000 psf (alrededor de 1197 kPa) para 200 pies (alrededor de 61 m) de relleno de sobrecarga), la resistencia al corte relativa del nuevo material tipo suelo en comparación con el material de revestimiento del suelo recompactado puede ser al menos un 10 % mayor, y quizás un 25 % mayor.

[0041] También se debe tener en cuenta que la capacidad de carga del relleno del terraplén para revestimientos del suelo recompactados puede verse afectada por la cantidad de asentamiento que experimenta el material de relleno. Para 200 pies (alrededor de 61 m) de relleno de terraplén, el asentamiento del material de revestimiento del suelo recompactado puede ser de hasta varias pulgadas por pie de revestimiento del suelo. Este asentamiento ocurre con el tiempo (por ejemplo, de meses a años) a medida que las presiones del agua de los poros se disipan y las partículas del suelo se deslizan y reorientan bajo cargas sostenidas (*Principles of Foundation Engineering*, 3.^a Ed., por Braja M. Das). En contraste, el asentamiento de relleno de roca o agregado grueso suele ocurrir inmediatamente y tiene lugar durante o inmediatamente después de la colocación del relleno del terraplén, lo que permitirá

que los ajustes de la clasificación se realicen en tiempo real durante la colocación del relleno, de modo que el asentamiento no sea un problema de diseño. Aunque el material tipo suelo tiene un pequeño componente de suelo de grano fino, cuando se coloca en el sitio, la bentonita se hidratará parcialmente y continuará hidratándose con el tiempo. Sin embargo, se espera que el material mantenga la capacidad de carga y las propiedades de resistencia, ya que la bentonita se confinará en función de las cargas anticipadas, mientras que las partículas de arena y grava mantendrán el contacto partícula a partícula para proporcionar la resistencia al corte; y tiene la oportunidad de volverse más fuerte con el tiempo y con presiones de confinamiento más altas (es decir, con alturas de terraplén y cargas más grandes).

Agregado grueso

[0042] Los agregados gruesos son pequeños fragmentos de roca y pueden ir desde una pequeña piedra a una roca de gran tamaño. Los agregados se clasifican generalmente por métodos de tamizado, según el tamaño del tamiz o malla que les permite pasar, generando así un parámetro de tamaño máximo. AASHTO utiliza este último método y atribuye un "número de tamaño" estándar a los agregados o partículas que tienen una distribución de tamaño particular como se establece en la Tabla C, parcialmente reproducida a continuación. Cuanto mayor sea el "número de tamaño", menor será la partícula. Por ejemplo, las partículas agregadas de tamaño estándar 8 tendrán una distribución de tamaño tal que todas pasarán un tamiz de 12,5 mm, la mayoría (85-100 %) pasará un tamiz de 9,5 mm, solo el 10-30 % pasará un tamiz de 4,75 mm, etc.

[0043] Tabla C: adaptada de los tamaños estándares de AASHTO del agregado procesado

AASHTO "N.º de tamaño"	Distribuciones de tamaño agregado, dadas como Porcentaje (masa) que pasa a través de cada tamiz de laboratorio estándar							
	37,5 mm (1,5 pulg.)	25 mm (1 pulg.)	19 mm (3/4 pulg.)	12,5 mm (1/2 pulg.)	9,5 mm (3/8 pulg.)	4,75 mm (N.º 4)	2,36 mm (N.º 8)	1,18 mm (N.º 16)
4	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-	-
5	100	90-100	20-55	0-10	0-5	-	-	-
6		100	90-100	20-55	0-15	0-5	-	-
7		-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	-
8		-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5
9		-	-	-	100	85-100	10-40	0-10
10		-	-	-	100	85-100	-	-

[0044] El agregado grueso útil en la invención puede variar desde un número de tamaño estándar de 6 a 9, o de 6 a 8. La disponibilidad de materiales locales

generalmente determinará la elección. Como se indica en la Tabla B, arriba, el material tipo suelo puede contener de 20 a 50 % de agregado grueso; por ejemplo, de 20 a 40 %, de 30 a 50 %, de 30 a 40 %, de 25 a 45 %, de 28 a 38 %, de 30 a 35 %, etc.

Partículas finas

[0045] Las partículas finas útiles en la invención pueden incluir una variedad de materiales de grano fino. "Grano fino", como se usa en la presente, generalmente incluye materiales que tienen un tamaño de grano de entre alrededor de 0,1 mm a alrededor de 1,0 mm y, por lo tanto, la mayoría de las "partículas finas" pasarán a un tamiz N.º 10, pero muy poco pasará a un tamiz N.º 200. Se incluyen en este rango las arenas con grados de Wentworth de arena gruesa, arena media, arena fina y arena muy fina. Los suelos naturales clasificados según SUCS como arena limosa (SM), arena arcillosa (SC) también son ejemplos de partículas finas. Las partículas finas también pueden incluir subproductos del material manufacturado capturado con equipos de control de contaminación del aire por polvo fugitivo que se utilizan a menudo en instalaciones de productos relacionados con la minería o con agregados. La forma de las partículas finas puede ser regular o irregular.

[0046] Una vez más, la disponibilidad de materiales en un sitio geológico remoto generalmente determinará la elección de partículas finas específicas. El tamaño, más que la composición, es el factor determinante. Como se indica en la Tabla B, arriba, el material tipo suelo puede contener de 20 a 60 % de partículas finas; por ejemplo, de 20 a 50 %, de 30 a 60 %, de 30 a 50 %, de 25 a 45 %, de 30 a 45 %, de 25 a 55 %, etc.

Partículas compuestas

[0047] Las partículas compuestas útiles para poner en práctica la invención son conocidas y están descritas en la técnica junto con varias formas de realización específicas y/o sistemas de protección de sedimentos que contienen las mismas. Las partículas compuestas comercialmente disponibles de AquaBlok, Ltd, y conocidas como AquaBlok® o Blended Barrier™ son partículas compuestas ejemplares. Tales partículas compuestas generalmente tienen una dimensión de eje mayor de alrededor de 1/4 pulgada a 1 pulgada (6,3 a 25 mm) o más; más típicamente de alrededor de 3/8 pulgada a alrededor de 1/2 pulgada (9,5 a 13 mm). Alternativamente, las partículas compuestas de la invención pueden dimensionarse como agregados según los tamaños estándares de AASHTO, y las partículas que tengan un número de tamaño

estándar de 6 a 9, o de 6 a 8 deberían ser adecuadas. Como se indica en la Tabla B, arriba, el material tipo suelo puede contener de 20 a 50 % de partículas compuestas; por ejemplo, de 20 a 40 %, de 30 a 50 %, de 30 a 40 %, de 25 a 45 %, de 30 a 45 %, de 30 a 35 %, etc.

[0048] Alternativamente, las partículas compuestas se describen en la patente estadounidense 5.538.787, concedida a Nachtman et al. el 23 de julio de 1996, la patente estadounidense 5.897.946, concedida a Nachtman et al. el 27 de abril de 1999, la patente estadounidense 6.386.796, concedida a Hull el 14 de mayo de 2002, la patente estadounidense 6.558.081, concedida a Hull el 6 de mayo de 2003, la patente estadounidense 7.011.766 concedida a Hull el 14 de marzo de 2006, la patente estadounidense 7.438.500, concedida a Hull el 21 de octubre de 2008 y WO 2012/048215 publicada el 12 de abril de 2012, cada una de las cuales se incorpora en la presente por referencia en su totalidad. Las partículas compuestas comprenden un núcleo duro y una capa de recubrimiento hidratable alrededor de núcleo.

Núcleos

[0049] El núcleo de la partícula compuesta puede estar formado por casi cualquier material. Puede comprender alrededor de 10 a alrededor de 80 % de la dimensión del eje mayor y alrededor de 30 a alrededor de 80 % del peso total de la partícula compuesta. Los núcleos también pueden dimensionarse como agregados según los tamaños estándares de AASHTO, y se pueden usar los números de tamaño de 7 a 10 o de 8 a 9, que corresponden generalmente a dimensiones mayores de alrededor de 3/16 a alrededor de 1/2 pulgada (5 a 13 mm), o de 1/4 a alrededor de 3/8 pulgada (6,3 a 9,5 mm). Los núcleos pueden comprender un núcleo de piedra o roca sólida como un agregado fino y/o un agregado grueso. Dependiendo del uso y la disponibilidad final de los materiales, la piedra caliza o la dolomita también pueden servir como material de núcleo, al igual que el mineral de hierro o las bolitas de taconita, la escoria de acero o los finos.

[0050] El núcleo puede ser más denso, menos denso o igual de denso que la capa de recubrimiento. En una forma de realización ejemplar, el núcleo tiene una densidad relativamente mayor en comparación con la de la capa de recubrimiento.

Capa de recubrimiento o sellante

[0051] La capa de recubrimiento de las partículas compuestas puede encapsular parcial o completamente el núcleo. El recubrimiento es un material sellante hidratable

que puede incluir opcionalmente fibras para refuerzo. El recubrimiento es generalmente un mineral de arcilla o una mezcla de minerales de arcilla que puede incluir minerales de arcilla expansiva como la bentonita o la montmorillonita.

[0052] La capa sellante puede comprender alrededor de 5 a alrededor de 60 % del peso total de la partícula, por ejemplo de alrededor de 10 a alrededor de 45 %, de alrededor de 15 a alrededor de 35 %, o de alrededor de 15 a alrededor de 30 %, todo en peso de la partícula. Dependiendo de las proporciones relativas de agregados gruesos, partículas finas y partículas compuestas en el material tipo suelo, y del porcentaje de capa sellante de arcilla en la partícula compuesta, el material tipo suelo en general puede contener de alrededor de 1 % a alrededor de 30 % de arcilla. Más típicamente, el material tipo suelo comprenderá de alrededor de 4 % a alrededor de 15 % de arcilla, por ejemplo, de alrededor de 5 % a alrededor de 10 %.

[0053] Por "hidratable" o "hinchable" se entiende que el material sellante absorbe agua en una cantidad sustancial, aumentando el volumen a medida que lo hace; es decir, es expansivo. Por ejemplo, en comparación con un volumen de arcilla seca, una arcilla hidratada puede hincharse hasta al menos 1,5 veces su volumen, al menos 2,0 veces su volumen, al menos 3,0 veces su volumen, al menos 5,0 veces su volumen, o al menos 10 veces su volumen.

[0054] En muchas formas de realización, el material hidratable es un mineral de arcilla o una mezcla de minerales de arcilla que, aunque no se endurece, genera una fuerza de cohesión por el proceso de hidratación. La arcilla es un nombre común para una amplia variedad de minerales o rocas ígneas desgastadas. Varios esquemas de clasificación, como la clasificación Nickel-Strunz, dividen las arcillas minerales de acuerdo con su composición y/o estructura. Se pueden encontrar arcillas adecuadas en el grupo de caolinita, el grupo de esmectita o montmorillonita, el grupo de atapulgita y el grupo de zeolita. En general, estos grupos contienen láminas o capas formadas por estructuras tetraédricas y/u octaédricas específicas de óxidos de aluminio y silicio. Las capas o plaquetas se mantienen unidas por enlaces iónicos con iones cargados (generalmente cationes) ubicados entre las capas. Las arcillas ejemplares de estos grupos incluyen caolinita, montmorillonita (también llamada esmectita y bentonita), talco, mondorita, nontronita, paligorskita o atapulgita, moscovita, vermiculita, saponita, hectorita, rectorita y minicina. La bentonita es una arcilla impura útil que contiene en gran medida montmorillonita.

Otros aditivos en las partículas compuestas

[0055] Cualquier aditivo opcional en la partícula compuesta se considera parte del peso de la partícula para los fines de los rangos de relación de mezcla analizados anteriormente. Puede estar presente un aglutinante en la partícula compuesta en cantidades de alrededor de 2 % a alrededor de 10 % en peso, por ejemplo, de alrededor de 3 % a alrededor de 7 %, o alrededor de 5 % en peso.

[0056] Un revestimiento protector opcional está diseñado para facilitar el manejo, envío y almacenamiento de las partículas. Debe ser un recubrimiento duradero, pero soluble o permeable al agua, como un recubrimiento polimérico. El recubrimiento debe ser de un espesor que, bajo las condiciones de uso previstas y el período de tiempo para la formación de la matriz, no impida la hidratación de la capa de material hidratable. Los materiales poliméricos adecuados incluyen látex y resinas acrílicas. También puede ser adecuada una suspensión de yeso en agua. El recubrimiento se puede aplicar por cualquier medio, como el recubrimiento de tambores o la pulverización. El recubrimiento opcional puede comprender de 0 % a alrededor de 5 % del peso de las partículas.

[0057] Otros componentes opcionales de partículas compuestas pueden incluir fibras para refuerzo y/o recubrimientos protectores sobre la capa hidratable. Si se incluyen fibras, pueden ser naturales o sintéticas y pueden estar adheridas al núcleo, dentro de la capa sellante, o entre una capa sellante y una capa protectora de recubrimiento. Las fibras pueden impartir una o más propiedades de refuerzo, tales como (a) resistencia a la tracción, (b) resistencia al corte y (c) resistencia a la abrasión de la barrera. Las fibras útiles en partículas compuestas se describen con más detalle en la publicación de la patente estadounidense. 2013/0272795.

[0058] La resistencia a la tracción representa la resistencia a una fuerza que separa la composición, produciendo un fallo de separación generalmente transversal a la fuerza de tracción. La resistencia al corte representa la resistencia a una fuerza que tiende a fracturar la composición a lo largo de un plano generalmente paralelo a la fuerza de corte. La resistencia a la abrasión representa la resistencia a la degradación y al fallo que surgen del movimiento de un fluido como el aire o el agua (por ejemplo, la acción de las olas o el flujo de la corriente) y las partículas (por ejemplo, arena) que puede contener el fluido.

[0059] Como se usa en la presente, "fibra", "material fibroso" y "fibra de refuerzo" se usan indistintamente e incluyen cualquier tipo de material fibroso que tenga un eje largo, equivalente a una longitud, y un eje corto, equivalente a un diámetro en muchas formas de fibra, incluyendo fibras, filamentos, microfibras y otros. La relación de

aspecto de eje largo a eje corto puede ser de alrededor de 5 a decenas de miles, más típicamente de alrededor de 100 a alrededor de 10.000. El material de fibra generalmente tiene un tamaño acorde con el tamaño de la partícula compuesta, por lo que puede ser lo suficientemente grande como para ser visible a simple vista (por ejemplo, de alrededor de 0,1 mm a alrededor de 100 mm) o lo suficientemente pequeño como para ser clasificado como nanomaterial.

[0060] Las fibras pueden estar compuestas por muchos tipos diferentes de materiales, naturales o sintéticos, que incluyen, por ejemplo, plástico, metal, carbono, mineral, cerámica, vidrio, celulosa, otros materiales inorgánicos y materiales orgánicos. El término "fibra natural" se refiere a las fibras vegetales extraídas de cualquier parte de una planta, incluidos, entre otros, el tallo, las semillas, las hojas, las raíces o el floema. Entre los ejemplos de fibras naturales adecuadas para usar como material de fibra de refuerzo se incluyen el algodón, el yute, el bambú, el ramio, el bagazo, el cáñamo, el bonote, el lino, el kenaf, el sisal, el lino, el henequén, el esfagno, la turba, el musgo español, y las combinaciones de estos. Entre los ejemplos de fibras inorgánicas adecuadas se incluyen las fibras de vidrio, las fibras de lana de vidrio, las fibras cerámicas y otras fibras minerales. "Fibras minerales" se refiere a cualquier material mineral que pueda fundirse para formar un mineral fundido que pueda ser extraído o atenuado en fibras. El vidrio es la fibra mineral más comúnmente utilizada, pero entre otras fibras minerales útiles se incluyen la roca, la escoria y el basalto. "Fibras sintéticas" incluye fibras poliméricas artificiales que incluyen, entre otras, polímeros como el poliéster, el polietileno, el tereftalato de polietileno, el polipropileno, la poliamida, la aramida y/o la poliamida. Las "fibras metálicas" pueden estar compuestas por cualquier elemento metálico solo o en combinaciones de aleaciones con otros elementos y/o minerales. Algunas fibras metálicas útiles incluyen hierro, acero, acero inoxidable, aluminio, cobre, níquel, cobalto, zinc y aleaciones de estos. Los materiales fibrosos útiles en la invención pueden ser homogéneos, es decir, que están compuestos por un solo tipo de fibra, o pueden ser mezclas heterogéneas de tipos de fibras mixtas.

[0061] Las fibras se pueden disponer en la partícula compuesta en una o más variedades de ubicaciones. En general, las fibras se encuentran dentro de las capas o en las interfaces entre las capas. Las fibras dentro de las capas pueden dispersarse de manera sustancialmente homogénea a lo largo de la capa, o concentrarse en regiones específicas de la capa. Por ejemplo, en algunas formas de realización, las fibras se adhieren al núcleo antes de aplicar la capa de recubrimiento hidratable. Las

fibras pueden adherirse al núcleo mediante el uso de aglutinantes convencionales. Alternativamente, las fibras se pueden interdispersar dentro del material de recubrimiento hidratable en la capa. Esta dispersión puede ser homogénea o no, y, si no, las fibras se pueden concentrar más cerca del núcleo o más cerca del borde exterior, si se desea. Si se forma una capa protectora opcional alrededor de la partícula compuesta, las fibras también se pueden colocar allí. Las fibras también se pueden colocar en cualquier combinación de estos lugares.

[0062] Dependiendo de la elección de la fibra y la aplicación prevista, el material fibroso puede constituir alrededor de 1 % al 20 % en peso (seco) de la partícula compuesta. Las fibras pueden variar en gravedad específica desde menos de 1 (por ejemplo, fibras de carbono) hasta más de 7 (por ejemplo, fibras de hierro).

Composiciones de barrera y aplicaciones mineras

[0063] Las partículas compuestas de la invención pueden instalarse como capas de barrera por encima, por debajo o adyacentes a ubicaciones de residuos mineros para contener los desechos contaminados. Se sabe que las operaciones mineras, típicamente en áreas montañosas, producen materiales de desecho como relaves de minas y residuos del proceso de extracción de minerales, los cuales, sin la contención adecuada, podrían contaminar la cuenca local de ríos, arroyos y acuíferos con materiales tóxicos.

[0064] La composición de barrera comprende capas o "levantamientos" del material mezclado tipo suelo descrito anteriormente, compactado con una cantidad calculada de humedad para lograr una densidad máxima, alta resistencia al corte y baja permeabilidad. La Figura 3 ilustra el proceso de fabricación de la barrera. En el paso 100, los tres ingredientes se mezclan, por ejemplo, transportándolos desde las tolvas de carga directamente a una tolva de mezcla. La tolva de mezcla funciona para lograr una mezcla homogénea de los tres ingredientes.

[0065] El paso 102 implica determinar cuántos levantamientos serán necesarios para construir la barrera. Esta es una decisión de ingeniería guiada por las propiedades específicas del suelo y los materiales del sitio, y por los ensayos de la muestra, por el espesor final previsto de la barrera y por el equipo disponible. Por ejemplo, si el equipo de compactación no es capaz de generar suficiente fuerza para compactar el espesor de levantamiento deseado, entonces podría indicarse un número mayor de levantamientos más delgados. En construcciones de barrera típicas, el número de levantamientos puede ser desde un mínimo de alrededor de dos, hasta un máximo de

alrededor de cuatro por pie de espesor. Cada levantamiento puede descargarse directamente de la tolva de mezcla a un transportador de colocación o canal de gravedad que atraviesa la superficie sobre la cual se construirá la barrera, paso 104.

[0066] En el paso 106, se agrega humedad al levantamiento. La cantidad de humedad será suficiente aproximadamente para lograr el contenido de humedad óptimo (OMC) para el suelo dado, según lo determinado mediante el ensayo previo con las curvas de compactación Proctor descritas anteriormente. Típicamente, un contenido de humedad que está dentro de alrededor de +/- 3 % del OMC calculado es aceptable para lograr una buena densidad y baja permeabilidad.

[0067] El levantamiento humedecido se compacta luego en el paso 108. Los pasos para agregar otro levantamiento o capa de material tipo suelo (104), humedecer ese levantamiento (106) y compactar el levantamiento (108) se repiten según sea necesario hasta que los levantamientos compactados acumulativos alcancen las dimensiones de barrera deseadas. En particular, una característica única de las barreras de compactación del material tipo suelo como se describe en la presente es la relación favorable entre el espesor del revestimiento y la permeabilidad. Con un contenido de humedad adecuado cerca del OMC y la compactación hasta el valor de densidad seca máxima (MDD), se pueden obtener permeabilidades muy bajas que requieren un espesor de barrera más bajo para lograr una tasa de filtración baja equivalente. Por ejemplo, una barrera de material tipo suelo de la invención se puede usar para lograr la permeabilidad de un revestimiento de suelo típico recompactado de grano fino, utilizando una barrera que sea de un espesor comparable al del revestimiento de suelo compactado.

[0068] Tras la compactación, las capas de barrera tipo suelo de acuerdo con la invención pueden hacerse “impermeables”, es decir, tener una conductividad hidráulica de 1×10^{-6} cm/s o menos. De hecho, la permeabilidad de tales capas de barrera ha sido tan baja como 1×10^{-7} cm/s o menos; 1×10^{-8} cm/s o menos e incluso 1×10^{-9} cm/s o menos. La Tabla D proporciona algunos datos de permeabilidad para muestras de formulaciones designadas Ej. 1 y Ej. 2 en la Tabla B, arriba.

[0069] Tabla D: Datos de permeabilidad

Ej. 1 – Bentonita ~6 %				Ej. 2 – Bentonita ~8 %			
Gradiente de presión (psi)	Contenido de humedad (% en peso)	Densidad (libras (ft³)	Permeabilidad (cm/s)	Gradiente de presión (psi)	Contenido de humedad (% en peso)	Densidad (libras (ft³)	Permeabilidad (cm/s)
Muestra 1 – A				Muestra 2 – A			
50,5	7,4	119,4	2,00E-05	50,5	6,9	119,6	1,10E-07
90,5	7,4	119,4	4,50E-09	90,5	6,9	119,6	2,20E-09
100	7,4	119,4	9,20E-09	100	6,9	119,6	7,20 E-09
Muestra 1 – B				Muestra 2 – B			
50,5	6,9	121,2	4,00 E-07	50,5	6,9	120	3,00E-07
90,5	6,9	121,2	8,00E-09	90,5	6,9	120	1,80E-09
100	6,9	121,2	3,50 E-08	100	6,9	120	9,70E-10

[0070] Otra característica clave de estas barreras es que requieren muy poco de los suelos arcillosos o limosos finos que tradicionalmente han formado tales barreras. El material tipo suelo generalmente contiene menos del 15 % (por ejemplo, menos del 10 % en peso) de materiales de grano fino más finos que el tamiz N.º 200 (por ejemplo, limos y arcillas con altos límites de líquidos y alto índice de plasticidad). El nuevo material tipo suelo se prepara predominantemente con agregados, en parte, a partir de subproductos específicos del lugar fácilmente disponibles. Esto es importante cuando se necesita construir una barrera en áreas remotas que no tienen suelos autóctonos adecuados. Las operaciones mineras montañosas a menudo también se ubican en áreas remotas, que típicamente poseen suelos rocosos, no suelos arcillosos o limosos adecuados para las barreras convencionales.

[0071] Además, mientras que los suelos convencionales de grano fino utilizados en barreras de suelo recompatadas aumentarán la permeabilidad en el momento de la desecación y no se recuperarán en el momento de la rehidratación, el material manufacturado tipo suelo de acuerdo con la invención se rehidratará y expandirá cuando se exponga a la humedad nuevamente y, por lo tanto, podrá recuperarse de cualquier aumento en la permeabilidad como resultado de la desecación temporal. Los nuevos materiales tipo suelo son capaces de soportar múltiples ciclos de congelación y descongelación sin perder sus propiedades de baja permeabilidad. Estos materiales tipo suelo también son resistentes a la erosión y al desgaste como se muestra en los datos de los ejemplos.

[0072] En un ejemplo más detallado de una forma de realización, hay otras consideraciones opcionales. Inicialmente, los ensayos de permeabilidad (ASTM D5084) y los ensayos de compactación Proctor (ASTM D698) deben realizarse simultáneamente en materiales específicos del lugar para determinar las mezclas, los

criterios de compactación y el OMC necesarios para lograr la MDD deseada y la permeabilidad de la barrera de material tipo suelo. Una vez que se determinan los criterios de mezcla de diseño y compactación, se puede construir una plataforma de ensayo para verificar que los métodos de construcción produzcan una barrera de material tipo suelo que cumpla con los criterios de permeabilidad y densidad deseados.

[0073] Si bien los criterios de compactación deberían buscar la MDD de manera óptima, en la práctica, un rango definido por una densidad umbral mínima y la MDD es suficiente. Típicamente, el rango abarca de 90 % de la MDD a la MDD, preferentemente con un umbral de alrededor de 95 % de la MDD. Del mismo modo, el contenido de humedad se esfuerza por llegar al OMC, ya que prácticamente un contenido de humedad dentro de alrededor de 5 % del OMC, o dentro de alrededor de 3 % del OMC, es un umbral adecuado. Si se desea una permeabilidad diferente, se pueden ajustar los criterios de compactación. Por ejemplo, una compactación mayor al 95 por ciento de MDD reduciría típicamente la permeabilidad de un suelo. De modo similar, un mayor contenido de humedad con un rango apropiado reduciría típicamente la permeabilidad de un suelo.

[0074] Se reparará cualquier brecha que se produzca en la barrera de material tipo suelo debido a los controles de compactación *in situ*. Las brechas deben repararse rellenándolas con partículas compuestas AquaBlok®. Para áreas fallidas con baja densidad, se pueden usar pasadas adicionales del compactador hasta que se cumplan los criterios de aprobación. Como alternativa, el material tipo suelo en el levantamiento fallido puede escarificarse, pueden añadirse partículas compuestas AquaBlok® adicionales y, si es demasiado seco, ajustar su contenido de humedad según sea necesario, y recom pactarse y volver a probarse hasta que pase la densidad.

[0075] En aplicaciones típicas, los levantamientos de material tipo suelo no deben tener más de 1/4 del espesor total deseado o 6" (15,2 cm), lo que sea menor. El agua debe agregarse uniformemente por rociado en todas las interfaces de levantamiento. El levantamiento se compacta como se describe a continuación. Para obtener los mejores resultados, el material de la barrera debe someterse inicialmente a una primera pasada del compactador para sellar ligeramente la superficie del levantamiento para minimizar las pérdidas por evaporación de agua, luego dejarlo reposar durante 15-30 minutos para efectuar una hidratación inicial de las partículas compuestas en el material de mezcla tipo suelo. Esta hidratación ayudará a que las partículas compuestas se adhieran a las partículas de arena fina ayudando a mantener

su posición en los vacíos intersticiales de la grava durante el esfuerzo de compactación posterior. Esto produce una capa de barrera más homogénea, al no permitir que las partículas finas como arena se depositen durante la compactación.

[0076] Después del período de descanso, el levantamiento o capa debe someterse a varias pasadas más de un compactador estático. Un mínimo de 2 pasadas (4 contactos) de un rodillo de tambor liso estático (no vibratorio) con un peso efectivo mínimo de 10 toneladas (9072 kg) es generalmente una compactación suficiente. Si se utiliza un equipo que es más liviano que el recomendado anteriormente, el espesor del levantamiento debería ser lo más delgado posible. Siguiendo estos pasos estáticos, los compactadores dinámicos que usan una característica vibratoria pueden aplicarse si aún no se alcanzan las densidades específicas. Los resultados de la construcción del terreno de prueba se deben usar para determinar si se deben ajustar los esfuerzos de compactación (por ejemplo, si se debe reducir o aumentar el número de pasadas requeridas) o si se necesitan ajustes en el espesor del levantamiento.

[0077] Opcionalmente, si se requiere estabilidad adicional de la barrera, particularmente durante la construcción, o si se encuentra un subsuelo inestable durante la colocación del material tipo suelo, se puede instalar un geotextil en la capa de barrera, por encima de la capa de barrera, por debajo de la capa de barrera, o cualquier combinación de estos. Un geotextil es un textil sintético permeable hecho por el hombre que se utiliza en aplicaciones geotécnicas para mejorar la capacidad de carga y la estabilidad. Alternativamente, el refuerzo de fibra en las partículas compuestas como se trató anteriormente puede proporcionar una capacidad de soporte/resistencia al corte aún mayor.

[0078] Opcionalmente, ciertas soluciones de monómero/polímero pueden impartir una mayor permeabilidad cuando se rocían sobre el material tipo suelo durante o después de la deposición o colocación del levantamiento. Estos polímeros pueden incluir, por ejemplo, poliacrilamidas total o parcialmente hidrolizadas, o precursores monoméricos. Uno de estos productos comerciales es ESS-13 (fabricado por Seepage Control, Inc. Chandler, AZ) que está compuesto por tensioactivos y aceites vegetales emulsionados.

Ejemplos

[0079] Ejemplos 1-5

[0080] El material tipo suelo se prepara y se mezcla con las composiciones expuestas en la Tabla B, arriba. Los ejemplos 1 y 2 se compactan y la conductividad hidráulica

(permeabilidad) se midió con los resultados expuestos en la Tabla D, arriba.

[0081] Ejemplo 6

[0082] Un material tipo suelo denominado RockBlok™ se prepara a partir de piedra caliza triturada #8, arena y AquaBlok® 2080FW9 con ~20 % de bentonita. El material tipo suelo se evaluó de acuerdo con los diversos métodos estándares enumerados en la Tabla E, a continuación, y los resultados también se exponen en la Tabla E.

Tabla E: Propiedades físicas de RockBlok™

Ensayos ¹	Método ²	RockBlok ⁵
Clasificación visual – Práctica para la descripción e identificación de suelos	ASTM D2488	Grava mal graduada gris, con o sin recubrimiento de bentonita, con arena (GP)
Contenidos de humedad ⁶	ASTM D2216, AASHTO T265	5-15%*
Densidad a granel seca	ASTM C29	100-110 pcf*
Clasificación de suelos para fines de ingeniería	ASTM D2487, ASTM D3282, AASHTO M145	Material granular no plástico, compuesto por arena mal graduada con limo y grava (SP-SM), arena mal graduada con grava (SP), y arena bien graduada con limo y grava (SW-SM)
Gravedad específica ⁷	ASTM D854, AASHTO T100	2,67
Densidad relativa – Densidades máximas de suelos sin cohesión	ASTM D4253	1,62 g/cu cm, 101 pcf
Densidad relativa – Densidades mínimas de suelos sin cohesión	ASTM D4254	2,00 g/cu cm, 124,9 pcf
Permeabilidad - Permeámetro de pared flexible ¹³	ASTM D5084	1x10 ⁻⁷ a 1x10 ⁻⁹ cm/s*
Resistencia al corte – Corte directo	ASTM D3080, AASHTO T236	339 psf, 29,5°
Resistencia al corte – Compresión no confinada ¹⁷	ASTM D2166, AASHTO T208	500-900 psf
Resistencia al corte – No consolidado-no drenado triaxial (Q o UU)	ASTM D2850, AASHTO T296	1494 psf, 0,0° * ¹⁷
Resistencia al corte – Consolidado-no drenado triaxial (R o CU)	ASTM D4767, AASHTO T297	1300-1700 psf, 25-30° (total) 0 psf, 40-45° (efectivo)
Compactación – Proctor estándar	ASTM D698, AASHTO T99	114 psf (MDD), 15% (OMC)
Relación de soporte California	ASTM D1883, AASHTO T193	5-10 (0,1 pulg.), 9-16 (0,2 pulg.)
Hinchamiento libre	ASTM D5890	500 ml/40g*

1. Los resultados son en función de ensayos de laboratorio para mezclas específicas. La variabilidad se puede experimentar debido a las tolerancias de fabricación, el cribado, la distribución de tamaños de grano, el control de calidad, etc.

2. Los ensayos se completaron de acuerdo con las normas de AASHTO cuando se determinó que eran equivalentes a las establecidas por el U.S. Army Corps of Engineers.

5. RockBlok comprende una mezcla de partículas AquaBlok 2080FW9 con finos (arena, limo o finos agregados) y material de relleno de grava. Las formulaciones típicas varían de 6-8% de bentonita en peso. La variabilidad se puede prever con diferentes fuentes de agregados o finos graduados.

6. Los valores de contenido de humedad son para material seco

7. Calculado usando un promedio ponderado de gravedades específicas para el material que se retuvo y que pasó a través del tamiz #4. Se supuso que el material retenido era agregado #8 de AASHTO nominal y tenía una gravedad específica de 2,62. El material que pasó se evaluó de acuerdo con ASTM D854 para determinar su gravedad específica.

13. Los valores de permeabilidad eran para escenarios de agua dulce. Los resultados variarán con otros permeantes, y el uso de otras mezclas de materiales puede ser adecuado para mantener la permeabilidad deseada.

17. El ensayo no consolidado-no drenado triaxial se realizó de acuerdo con ASTM D4767, saturado.

[0083] Ejemplo 7

[0084] Tres materiales similares al suelo, todos denominados RockBlok™, se preparan a partir de agregados de grava, finos de arena y AquaBlok® 2080FW9 para contener alrededor de 6 %, 7 % y 8 % de bentonita, respectivamente. Anticipándose al uso como barrera hidráulica, los ensayos de distribución del tamaño de partícula (Método ASTM D 422), conductividad hidráulica (Método ASTM D 5084), resistencia al corte no drenado consolidado (Método ASTM D 4767), resistencia a la compresión no confinada (UC) (Método ASTM D 2166), Proctor estándar (Método ASTM D 698) y relación de soporte California (CBR) se realizaron en mezclas representativas de diferentes formulaciones como ejemplos del rendimiento relativo.

[0085] La distribución del tamaño de partícula para las tres formulaciones de ejemplo

de RockBlok es muy similar (se muestra en la Tabla F, a continuación). Los aumentos en el contenido de bentonita corresponden a un mayor porcentaje de finos, como se esperaba. Basado en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Método ASTM D 2487), RockBlok puede clasificarse como un material granular no plástico, compuesto de arena mal graduada con limo y grava (SP-SM), arena mal graduada con grava (SP), y arena bien graduada con limo y grava (SW-SM).

Tabla F: Distribución del tamaño de partícula para mezclas de muestra

Tamaño de tamiz (pulgadas)	RockBlok 6% de bentonita % más fino	RockBlok 7% de bentonita % más fino	RockBlok 8% de bentonita % más fino
0,5	100	100	100
0,375	96,4	97,5	98,5
#4 – 0,187	56,5	60,9	57,6
#10 – 0,078	35,9	35,1	33,5
#20 – 0,033	26,9	26,1	26,1
#40 – 0,0165	18,7	18,3	18,7
#60 – 0,0098	10,7	11,3	12,1
#140 – 0,0041	7,6	8,3	9,3
#200 – 0,0029	7,3	8	9

[0086] Para evaluar la conductividad hidráulica, se adaptó un molde Proctor recubriendo las superficies internas con una pasta de bentonita para tratar los efectos de borde causados por la naturaleza angular de la grava. Las muestras se prepararon con 5 % de humedad añadida durante la compactación. Las presiones se aplicaron a 50, 90 y 100 psi (345, 620 y 690 KPa). Los resultados presentados en la Tabla G, a continuación, muestran que las mezclas compactadas RockBlok cumplen fácilmente con los criterios para una barrera hidráulica de baja permeabilidad con una conductividad hidráulica en el rango de 1×10^{-7} a 1×10^{-9} cm/s.

[0087] Tabla G: Conductividad hidráulica

RockBlok™ Formulación	Valores de conductividad hidráulica (cm/s)		
	50 psi	90 psi	100 psi
6 % de bentonita	$3,5 \times 10^{-7}$	$6,9 \times 10^{-9}$	$2,5 \times 10^{-8}$
7 % de bentonita	$4,1 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-9}$	$4,1 \times 10^{-6}$
8 % de bentonita	$2,7 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-9}$	$8,7 \times 10^{-10}$

[0088] Las muestras se compactaron a la densidad seca máxima (MDD) en el contenido de humedad óptimo (OMC) según lo determinado por un Ensayo Proctor

estándar para cada formulación. Se llevó a cabo un ensayo de relación de soporte California (CBR) según los estándares. Los datos se presentan en la Tabla H.

[0089] Tabla H: datos de Proctor estándar y CBR

Formulación RockBlok™	MDD (pcf)	OMC (%)	CBR a una penetración de 0,1 pulgadas	CBR a una penetración de 0,1 pulgadas
6 % de bentonita	114,4	15,0	10,1	15,7
7 % de bentonita	114,3	15,3	6,6	11,9
8 % de bentonita	114,7	15,2	5,5	8,7

[0090] Ejemplo 8

[0091] Tres materiales tipo suelo, todos denominados RockBlok™, se preparan a partir de agregados de grava, finos de arena y AquaBlok® 2080FW9 para contener alrededor de 6 %, 7 % y 8 % de bentonita, etiquetados A, B y C, respectivamente. Los moldes cilíndricos Proctor se rellenan con el material tipo suelo y se compactan para un Ensayo Proctor modificado. El Ensayo Proctor modificado se realizó al compactar 5 capas de material, agregando 1 % de humedad a cada capa, para un total de 5 % de humedad agregada y una columna de 4,5 pulgadas (11,3 cm). Luego se calcula una densidad húmeda para cada muestra, dando como resultado: Muestra A = 2102,86 kg/m³; B = 2137,86 kg/m³; y C = 2131,50 kg/m³.

[0092] Antes, durante, y después de los ciclos de congelación/descongelación ininterrumpidos en un congelador horizontal, cada una de las tres columnas se sometió a ensayos de permeabilidad de cabeza variable con una columna renovada de agua de alrededor de 21 cm. Después de la tercera descongelación, las columnas Proctor quedaron intactas con las válvulas abiertas. Esto permitió que las muestras que se habían sometido a tres ciclos de congelación/descongelación se sometieran a un monitoreo continuo durante un período de tiempo. Con el tiempo, las columnas se hincharon a alrededor de 6 pulgadas (15,2 cm) de altura. La medición final de la permeabilidad se tomó a través de esta columna hinchada. Como se observa en los datos de la Tabla I, los datos de permeabilidad/conductividad permanecieron bastante bien después de tres ciclos de congelación y descongelación.

[0093] Tabla I: Conductividad después de tres ciclos de congelación/descongelación

	Tiempo después de la descongelación 3 (horas)	Conductividad (cm/s)
Muestra A	50 h	1,90 E-08
	120 h	1,52 E-08
	146 h	1,55 E-08
	-	-
	314 h	3,07 E-08
Muestra B	50 h	1,48 E-08
	120 h	1,43 E-08
	146 h	1,40 E-08
	-	-
	314 h	2,96 E-08
Muestra C	50 h	9,44 E-09
	120 h	1,06 E-08
	146 h	1,13 E-08
	-	-
	314 h	2,63 E-08

[0094] Ejemplo 9

[0095] Se diseñó y realizó un estudio para evaluar la resistencia a la erosión de RockBlok™ como barrera hidráulica en un yacimiento minero propuesto en Noruega. Para esta evaluación, se supone que se colocará una tapa RockBlok de aproximadamente seis pulgadas (15 cm) sobre los relaves de la mina. La erosión de la capa se evaluó para determinar la inclinación y la longitud de la pendiente solicitadas en el peor de los casos (45 % y 100 metros, respectivamente) y también para una condición modificada en la que se utilizarían bancos para reducir la longitud y la inclinación de la pendiente.

[0096] Antecedentes/ecuación de pérdida de suelo

[0097] Los cuatro factores principales que afectan la erosión incluyen el clima, el suelo, la topografía y el uso de la tierra. La pérdida de suelo se calcula comúnmente mediante el uso de la Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) desarrolló el programa RUSLE2 para estimar la erosión del suelo causada por la lluvia y su flujo terrestre asociado, y este programa utiliza una variación de USLE para calcular el desprendimiento neto (pérdida de suelo). Si bien los datos predeterminados se proporcionan para su uso en los EE.UU., fue necesario utilizar fuentes alternativas para obtener información relevante para esta evaluación. RUSLE2 calcula la separación neta estimada por año de la siguiente manera:

[0098] $A=R*K*L*S*C*P$

donde,

- A = desprendimiento neto (masa/unidad de área).
- R = factor de erosividad basado en las cantidades e intensidad de precipitación: se estimó en 340-610 según los datos de la cercana Suecia.
- K = factor de erosión del suelo, específico para el material de cobertura, RockBlok - se estimó en 0,11, según las referencias bibliográficas para arcillas similares que varían de 0,11 a 0,336, y en datos preliminares del componente AquaBlok® en ensayos de aparatos de canalización.
- L = factor de longitud de la pendiente: se supone que es de 100 m según la especificación del escenario del peor de los casos.
- S = factor de inclinación de la pendiente: se supone que es del 45 % según la especificación del escenario del peor de los casos.
- C = factor de gestión de la cubierta, se estimó en 0,005 según los datos de Ontario geográficamente similares.
- P = factor de prácticas de soporte, se asumió que era 1,0 basado en el supuesto de que no hay prácticas de soporte después de la instalación de RockBlok.

[0099] Con los supuestos y estimaciones anteriores, se calculó que la pérdida de suelo para el peor de los casos se situaría entre 6,22 toneladas/hectárea/año (con valor $K = 340$) y 11,16 toneladas/hectárea/año (con valor $K = 610$). Esta cantidad de pérdida de suelo se considera una erosión “baja” o “muy baja” según la clase de erosión del suelo publicada por el Ministerio de Agricultura de Ontario. (En el sistema de clases de erosión de Ontario, "Muy bajo" es inferior a 6,7 toneladas/hectárea/año, y "Bajo" es de 6,7 a 11,2 toneladas/hectárea/año). Al flexibilizar los supuestos del peor de los casos para L y S para permitir que $L = 50$ metros y/o $S = 33$ % mediante el uso de bancos, el cálculo arroja resultados de erosión que son de 29 % a 43 % menos de erosión, lo que es indicativo de un alto grado de resistencia a la erosión en comparación con otros suelos.

[00100] Estos datos sugieren que el material tipo suelo RockBlok™ es adecuado para aplicaciones a largo plazo, como la cobertura de relaves mineros, desechos peligrosos y operaciones de relleno sanitarios, debido a su muy baja permeabilidad y baja o muy baja erosionabilidad.

[00101] El principio y el modo de funcionamiento de esta invención se han

explicado e ilustrado en sus formas de realización preferidas. Sin embargo, debe entenderse que esta invención puede ponerse en práctica de manera diferente a la explicada e ilustrada específicamente sin apartarse del alcance de la invención.