

SELECCIÓN DE MATERIALES CEMENTOSOS COMPLEMENTARIOS PARA UNA CARACTERÍSTICA DE RENDIMIENTO ESPECÍFICA

ANTECEDENTES

[0001] En la cementación de pozos, así como en la construcción de pozos y la cementación correctiva, se utilizan normalmente composiciones de cemento. Las composiciones de cemento se pueden usar en una variedad de aplicaciones subterráneas. Por ejemplo, en la construcción de pozos subterráneos, una sarta de tuberías (por ejemplo, una tubería de revestimiento, tuberías de revestimiento cortas, tubulares expandibles, etc.) puede introducirse en un pozo y cementarse en su lugar. El proceso de cementación de la sarta de tubería en su lugar puede denominarse comúnmente "cementación primaria". En un método de cementación primaria típico, se puede bombear una composición de cemento a un espacio anular entre las paredes del pozo y la superficie exterior de la sarta de tubería dispuesta en su interior. La composición de cemento puede fraguarse en el espacio anular, lo que forma una vaina anular de cemento endurecido y sustancialmente impermeable (es decir, una vaina de cemento) que puede soportar y colocar la sarta de tubería en el pozo y puede unir la superficie exterior de la sarta de tubería a la formación subterránea. Entre otras cosas, la función de la vaina de cemento que rodea la sarta de tubería es evitar la migración de fluidos en el anillo, así como proteger la sarta de tubería de la corrosión. Las composiciones de cemento también pueden usarse en métodos de cementación correctiva, por ejemplo, para sellar grietas u orificios en sartas de tubería o vainas de cemento, para sellar fracturas o zonas de formación altamente permeables, para colocar un tapón de cemento y similares.

[0002] Un desafío particular en la cementación de pozos puede ser el desarrollo de propiedades mecánicas satisfactorias en una composición de cemento dentro de un período de tiempo razonable después de su colocación en la formación subterránea. A menudo, se evalúan varias composiciones de cemento con diversos aditivos para observar si cumplen con los requisitos de ingeniería de materiales para un pozo particular. El proceso de seleccionar los componentes de la composición de cemento suele realizarse con un enfoque de mejor estimación mediante el uso de lechadas anteriores que se modifican hasta alcanzar una solución satisfactoria. El proceso puede llevar tiempo y la lechada resultante puede ser compleja. Además, la composición de los componentes de cemento disponibles en cualquier región

particular puede variar respecto de las de otra región, lo que complica adicionalmente el proceso de selección de una composición de cemento correcta.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0003] Estos dibujos ilustran ciertos aspectos de algunas de las formas de realización de la presente divulgación y no deben utilizarse para limitar o definir la divulgación.

[0004] La Figura 1 es un gráfico que muestra resultados simulados para cálculos del índice de resistencia a la compresión.

[0005] La Figura 2 es un gráfico que muestra resultados simulados para cálculos del índice de resistencia a la compresión.

[0006] La Figura 3 es un gráfico de paridad de reactividades previstas en comparación con reactividades reales de los componentes de cemento.

[0007] La Figura 4 es una ilustración esquemática de un sistema de ejemplo para analizar componentes de cemento.

[0008] La Figura 5 es una ilustración esquemática de un sistema de ejemplo para generar composiciones de cemento.

[0009] La Figura 6 es una ilustración esquemática que muestra la introducción de una composición de cemento en un pozo.

[0010] La Figura 7 es una ilustración esquemática de un sistema de tratamiento de información de ejemplo.

[0011] La Figura 8 ilustra detalles adicionales de un sistema de tratamiento de información.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0012] La presente divulgación puede en general referirse a métodos y sistemas de cementación. Se proporcionan en la presente métodos que pueden incluir identificar y categorizar fuentes de sílice, cementos y otros materiales en función de propiedades fisicoquímicas. En algunos ejemplos, las fuentes de sílice pueden considerarse partículas inorgánicas. Las partículas inorgánicas pueden incluir sílice o no y pueden incluir otros minerales, tal como alúmina, y otros óxidos. Las partículas inorgánicas también pueden incluir un componente de cemento. Las propiedades fisicoquímicas de cada componente de cemento de una composición de cemento pueden afectar las propiedades mecánicas de fraguado final de la lechada, así como las propiedades dinámicas o basadas en el tiempo tales como la capacidad de mezcla, reología, viscosidad y otras. Cada componente de cemento puede afectar una o más de las propiedades mencionadas, a veces de manera impredecible. Por ejemplo, se

pueden agregar cenizas volantes de fuentes locales a una composición de cemento. Las cenizas volantes agregadas pueden aumentar la resistencia a la compresión de la composición de cemento y pueden no tener efecto alguno sobre, por ejemplo, el tiempo de espesamiento de la composición de cemento. En otra región, las cenizas volantes de fuentes locales también pueden aumentar la resistencia a la compresión de la composición de cemento, pero también pueden aumentar el tiempo de espesamiento. El comportamiento impredecible de una composición de cemento puede pasar desapercibido hasta que se hayan realizado múltiples pruebas de laboratorio.

[0013] Las composiciones de cemento pueden incluir generalmente agua y un aditivo de cemento. El aditivo de cemento puede incluir dos o más componentes de cemento, que pueden mezclarse en seco para formar el aditivo de cemento antes de combinarse con el agua. Alternativamente, los componentes de cemento pueden no combinarse hasta mezclarse con el agua. Los componentes de cemento pueden describirse por lo general como solubles en álcali.

[0014] Los componentes de cemento también pueden ser de naturaleza cementosa. Una composición de cemento puede incluir agua y un aditivo de cemento, tal como cemento hidráulico, polvo de horno de cemento y/o vidrio natural, entre otros. Como se describe con mayor detalle en la presente, las personas del oficio de nivel medio pueden espumar y/o extender las composiciones de cemento según se desee.

[0015] Las composiciones de cemento pueden tener una densidad adecuada para una aplicación particular. Las composiciones de cemento pueden tener cualquier densidad adecuada, incluso, entre otras, en el rango de alrededor de 8 libras por galón ("ppg") a alrededor de 16 ppg (de 1 g/cm^3 a $1,9 \text{ g/cm}^3$). En los ejemplos espumados, las composiciones de cemento pueden tener una densidad en el rango de alrededor de 8 ppg a alrededor de 13 ppg (de 1 g/cm^3 a $1,6 \text{ g/cm}^3$) (o incluso menos).

[0016] El agua usada en las composiciones de cemento puede incluir, por ejemplo, agua dulce, agua salada (por ejemplo, agua que contiene una o más sales disueltas), salmuera (por ejemplo, agua salada saturada producida en formaciones subterráneas), agua de mar o combinaciones de estas. Generalmente, el agua puede provenir de cualquier fuente siempre que no contenga un exceso de compuestos que puedan afectar indeseablemente a otros componentes de la composición de cemento. El agua puede incluirse en una cantidad suficiente para formar una lechada bombeable. El agua puede incluirse en las composiciones de cemento en cualquier rango adecuado, incluso, entre otros, en el rango de alrededor de 40 % a alrededor de

200 % en peso del aditivo de cemento ("bwoc"). En algunos ejemplos, el agua puede incluirse en una cantidad en el rango de alrededor de 40 % a alrededor de 150 % bwoc.

[0017] El aditivo de cemento puede incluir dos o más componentes de cemento. Uno de los componentes de cemento puede incluir un cemento hidráulico. Se puede utilizar una variedad de cementos hidráulicos de acuerdo con la presente divulgación, incluso, entre otros, los que comprenden calcio, aluminio, silicio, oxígeno, hierro y/o azufre, que se fraguan y endurecen mediante la reacción con el agua. Los cementos hidráulicos adecuados pueden incluir cementos Portland, yeso y cementos de alto contenido de alúmina, entre otros. Los cementos Portland que son adecuados para su uso en la presente divulgación pueden clasificarse como cementos de clases A, C, G y H de acuerdo con el Instituto Americano del Petróleo (*American Petroleum Institute*), API Specification for Materials and Testing for Well Cements, Especificación API 10, quinta ed., 1 de julio de 1990. Además, en algunos ejemplos, los cementos adecuados pueden clasificarse como ASTM tipo I, II o III. Se pueden diseñar composiciones de cemento que pueden considerarse "de bajo Portland" mediante las técnicas divulgadas en la presente.

[0018] Cuando está presente, el cemento hidráulico puede incluirse por lo general en las composiciones de cemento en una cantidad suficiente para proporcionar la resistencia a la compresión y/o la densidad deseadas. El cemento hidráulico puede estar presente en las composiciones de cemento en cualquier cantidad adecuada, incluso, entre otras, en el rango de alrededor de 0 % a alrededor de 99 % bwoc. En algunos ejemplos, el cemento hidráulico puede estar presente en una cantidad que varía entre cualesquiera de, y/o que incluye cualesquiera de, alrededor de 1 %, alrededor de 5 %, alrededor de 10 %, alrededor de 20 %, alrededor de 40 %, alrededor de 60 %, alrededor de 80 % o alrededor de 90 % bwoc. Se puede usar una composición de cemento considerada "de bajo Portland", en el sentido de que el cemento Portland (cuando se lo usa) puede estar presente en la composición de cemento en una cantidad de alrededor de 40 % o menos bwoc y, alternativamente, alrededor de 10 % o menos. Además, también se pueden diseñar composiciones de cemento libres (o esencialmente libres) de cemento Portland. Las personas del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, podrán seleccionar una cantidad adecuada de cemento hidráulico para una aplicación particular.

[0019] Además del cemento Portland, se pueden usar componentes de cemento adicionales que puedan considerarse solubles en álcali. Un componente de

cemento puede considerarse soluble en álcali cuando es al menos parcialmente soluble en una solución acuosa de pH 7,0 o más. Algunos de los componentes de cemento solubles en álcali pueden incluir un cemento de geopolímero, que puede incluir una fuente de aluminosilicato, una fuente de silicato de metal y un activador. El cemento de geopolímero puede reaccionar para formar un geopolímero. Un geopolímero puede ser un polímero inorgánico que forma redes de rango largo, unidas de manera covalente y no cristalinas. Los geopolímeros pueden formarse mediante la disolución química y la posterior recondensación de diversos aluminosilicatos y silicatos para formar una red tridimensional o un polímero mineral tridimensional.

[0020] El activador para el cemento de geopolímero puede incluir, entre otros, hidróxidos metálicos, sales de cloruro tales como KCl, CaCl_2 , NaCl, carbonatos tales como Na_2CO_3 , silicatos tales como silicato de sodio, aluminatos tales como aluminato de sodio, e hidróxido de amonio.

[0021] La fuente de aluminosilicato para el cemento de geopolímero puede incluir cualquier aluminosilicato adecuado. El aluminosilicato puede ser un mineral que comprende aluminio, silicio y oxígeno, además de contracciones. Hay potencialmente cientos de minerales adecuados que pueden ser una fuente de aluminosilicato, en el sentido de que pueden incluir minerales de aluminosilicato. Cada fuente de aluminosilicato puede usarse potencialmente en un caso particular si se pueden conocer las propiedades específicas, tales como la composición. Algunos minerales tales como andalucita, cianita y sillimanita son fuentes naturales de aluminosilicato que tienen la misma composición, Al_2SiO_5 , pero una estructura cristalina diferente. Cada mineral de andalucita, cianita o sillimanita puede reaccionar más o menos rápidamente y en grados diferentes a la misma temperatura y presión debido a las diferentes estructuras cristalinas. Otras fuentes adecuadas de aluminosilicato pueden incluir, entre otras, arcillas calcinadas, arcillas parcialmente calcinadas, arcillas de caolinita, arcillas lateríticas, arcillas de illita, vidrio natural, relaves mineros, escoria de alto horno y cenizas volantes de carbón.

[0022] La fuente de silicato de metal puede incluir cualquier silicato de metal adecuado. Un silicato puede ser un compuesto que contenga un compuesto de silicio aniónico. Algunos ejemplos de silicato incluyen el anión de ortosilicato también denominado anión de tetróxido de silicio, SiO_4^{4-} , así como hexafluorosilicato $[\text{SiF}_6]^{2-}$. Otros silicatos comunes incluyen silicatos cíclicos y monocatenarios que pueden tener la fórmula general $[\text{SiO}_{2+n}]^{2n-}$ y silicatos formadores de láminas $([\text{SiO}_{2.5}]^-)_n$. Cada ejemplo de silicato puede tener uno o más cationes de metal asociados con cada

molécula de silicato. Algunas fuentes de silicato de metal adecuadas pueden incluir, entre otras, silicato de sodio, silicato de magnesio y silicato de potasio.

[0023] Cuando está presente, el cemento de geopolímero puede incluirse por lo general en las composiciones de cemento en una cantidad suficiente para proporcionar la resistencia a la compresión y/o la densidad deseadas. El cemento de geopolímero puede estar presente en las composiciones de cemento en cualquier cantidad adecuada, incluso, entre otras, una cantidad en el rango de alrededor de 0 % a alrededor de 99 % bwoc. En algunos ejemplos, el cemento de geopolímero puede estar presente en una cantidad que varía entre cualesquiera de, y/o que incluye cualesquiera de, alrededor de 1 %, alrededor de 5 %, alrededor de 10 %, alrededor de 20 %, alrededor de 40 %, alrededor de 60 %, alrededor de 80 % o alrededor de 90 % bwoc. Las personas del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, podrán seleccionar una cantidad adecuada de cemento de geopolímero para una aplicación particular.

[0024] Otros componentes de cemento solubles en álcali pueden considerarse una fuente de sílice. Como se usa en la presente, la sílice tiene el significado simple y habitual de dióxido de silicio (SiO_2). Mediante la inclusión de la fuente de sílice, se puede usar una vía diferente para obtener un producto similar al obtenido con cemento Portland. Por ejemplo, puede inducirse una reacción puzolánica en donde ácido silícico (H_4SiO_4) y portlandita (Ca(OH)_2) reaccionan para formar un producto de cemento (hidrato de silicato de calcio). Si otros compuestos, tales como aluminato, están presentes en la fuente de sílice, pueden ocurrir reacciones adicionales para formar productos de cemento adicionales, tales como hidratos de aluminato de calcio. Adicionalmente, puede haber alúmina en la fuente de sílice. Como se usa en la presente, se entiende que alúmina tiene el significado simple y habitual de óxido de aluminio (Al_2O_3). El hidróxido de calcio necesario para la reacción puede proporcionarse a partir de otros componentes de cemento, tales como cemento Portland, o puede agregarse por separado a la composición de cemento. Los ejemplos de fuentes de sílice adecuadas incluyen cenizas volantes, escoria, humo de sílice, sílice cristalina, harina de sílice, polvo de horno de cemento ("CKD"), vidrio natural, perlita, metacaolín, tierra de diatomeas, zeolita, esquisto y cenizas cementosas complementarias de fuente agrícola (por ejemplo, cenizas de cáscara de arroz, cenizas de caña de azúcar y cenizas de bagazo), entre otros. A continuación se analizarán con mayor detalle algunos ejemplos específicos de la fuente de sílice. Cuando está presente, la fuente de sílice puede incluirse por lo general en las

composiciones de cemento en una cantidad suficiente para proporcionar la resistencia a la compresión y/o la densidad deseadas. La fuente de sílice puede estar presente en las composiciones de cemento en cualquier cantidad adecuada, incluso, entre otras, una cantidad en el rango de alrededor de 0 % a alrededor de 99 % bwoc. En algunos ejemplos, la fuente de sílice puede estar presente en una cantidad que varía entre cualesquiera de, y/o que incluye cualesquiera de, alrededor de 1 %, alrededor de 5 %, alrededor de 10 %, alrededor de 20 %, alrededor de 40 %, alrededor de 60 %, alrededor de 80 % o alrededor de 90 % bwoc. Las personas del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, podrán seleccionar una cantidad adecuada de fuente de sílice para una aplicación particular.

[0025] También puede haber sílice amorfa. La sílice amorfa puede impedir la retrogresión de la resistencia. En general, la sílice amorfa puede no requerir temperaturas por encima de 235 °F para participar en las hidrataciones de cemento. La sílice amorfa puede proteger contra la retrogresión de la resistencia y maximizar la eficacia del diseño al eliminar la necesidad de múltiples diseños a diferentes temperaturas. La sílice amorfa también puede reemplazar la sílice cristalina en algunas aplicaciones.

[0026] Un ejemplo de una fuente de sílice adecuada puede incluir cenizas volantes. Puede ser adecuada una variedad de cenizas volantes, que incluye las cenizas volantes clasificadas como cenizas volantes de clase C y clase F de acuerdo con American Petroleum Institute, API Specification for Materials and Testing for Well Cements, API Specification 10, quinta ed., 1 de julio de 1990. Las cenizas volantes de clase C incluyen sílice y cal, por lo que pueden fraguar para formar una masa endurecida al mezclarse con agua. Las cenizas volantes de clase F no contienen por lo general una cantidad suficiente de cal para inducir una reacción cementosa, por lo que se puede necesitar una fuente adicional de iones de calcio para una composición de cemento de fraguado retardado que comprenda cenizas volantes de clase F. En algunas formas de realización, se puede mezclar cal con cenizas volantes de clase F en una cantidad en el rango de alrededor de 0,1 % a alrededor de 100 % en peso de las cenizas volantes. En algunos casos, la cal puede ser cal hidratada.

[0027] Otro ejemplo de una fuente de sílice adecuada puede incluir escoria. La escoria puede ser generalmente un subproducto de la producción de diversos metales a partir de sus minerales correspondientes. A modo de ejemplo, la producción de hierro fundido puede producir escoria como un subproducto de alto horno y granulado, en donde la escoria comprende generalmente las impurezas oxidadas que se

encuentran en el mineral de hierro. Generalmente, la escoria no contiene material básico suficiente, por lo que se puede usar cemento de escoria que puede incluir además una base para producir una composición endurecible que puede reaccionar con agua para formar una masa endurecida. Los ejemplos de fuentes adecuadas de bases incluyen, entre otros, hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, cal y combinaciones de estos.

[0028] Otro ejemplo de una fuente de sílice adecuada puede incluir CKD. Polvo de horno de cemento o "CKD", como puede usarse en la presente, se refiere a una alimentación de horno parcialmente calcinada que puede retirarse de la corriente de gas y recolectarse, por ejemplo, en un colector de polvo durante la fabricación de cemento. Por lo general, se recolectan grandes cantidades de CKD en la producción de cemento que normalmente se desechan. El CKD puede ser otro componente que puede incluirse en los ejemplos de las composiciones de cemento.

[0029] Otro ejemplo de una fuente de sílice adecuada puede incluir vidrio natural. Cierta vidrio natural puede exhibir propiedades cementosas, ya que puede fraguar y endurecerse en presencia de cal hidratada y agua. El vidrio natural también se puede moler, por ejemplo. Generalmente, el vidrio natural puede tener cualquier distribución de tamaño de partícula que se desee para una aplicación particular. En ciertas formas de realización, el vidrio natural puede tener una media de tamaño de partícula en un rango de alrededor de 1 micrómetro a alrededor de 200 micrómetros. La media de tamaño de partícula corresponde a valores d50 medidos con analizadores de tamaño de partícula tales como los fabricados por Malvern Instruments, Worcestershire, Reino Unido. Una persona del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, debería poder seleccionar un tamaño de partícula para el vidrio natural adecuado para una aplicación seleccionada.

[0030] Otro ejemplo de una fuente de sílice adecuada puede incluir metacaolín. Generalmente, el metacaolín puede ser una puzolana blanca que puede prepararse al calentar arcilla de caolín, por ejemplo, hasta temperaturas en el rango de alrededor de 600 °C a alrededor de 800 °C.

[0031] Otro ejemplo de una fuente de sílice adecuada puede incluir esquisto. Entre otras cosas, el esquisto incluido en las composiciones de cemento puede reaccionar con el exceso de cal para formar un material de cementación adecuado, por ejemplo, silicato de calcio hidratado. Varios esquistos son adecuados, incluso los que comprenden silicio, aluminio, calcio y/o magnesio. Un ejemplo de un esquisto adecuado incluye esquisto vitrificado. Generalmente, el esquisto puede tener cualquier

distribución de tamaño de partícula que se desee para una aplicación particular. En ciertas formas de realización, el esquistos puede tener una distribución de tamaño de partícula en el rango de alrededor de 37 micrómetros a alrededor de 4.750 micrómetros.

[0032] Otro ejemplo de una fuente de sílice adecuada puede incluir zeolita. Las zeolitas son generalmente minerales de aluminosilicato porosos que pueden ser un material natural o sintético. Las zeolitas sintéticas se basan en el mismo tipo de celda estructural que las zeolitas naturales y pueden incluir hidratos de aluminosilicato. Como se usa en la presente, el término "zeolita" se refiere a todas las formas naturales y sintéticas de zeolita. Los ejemplos de zeolitas pueden incluir, entre otros, mordenita, zsm-5, zeolita x, zeolita y, zeolita a, etc. Además, los ejemplos que comprenden zeolita pueden incluir zeolita en combinación con un catión tal como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc. Las zeolitas que comprenden cationes tales como sodio también pueden proporcionar fuentes de cationes adicionales a la composición de cemento a medida que las zeolitas se disuelven.

[0033] Las composiciones de cemento pueden incluir además cal hidratada. Como se usa en la presente, se entenderá que la expresión "cal hidratada" significa hidróxido de calcio. En algunos ejemplos, la cal hidratada puede proporcionarse como cal viva (óxido de calcio) que se hidrata cuando se mezcla con agua para formar la cal hidratada. La cal hidratada puede incluirse en los ejemplos de las composiciones de cemento, por ejemplo, para formar una composición hidráulica con la fuente de sílice. Por ejemplo, la cal hidratada puede incluirse en una relación en peso de fuente de sílice con respecto a cal hidratada de alrededor de 10:1 a alrededor de 1:1 o una relación de alrededor de 3:1 a alrededor de 5:1. Cuando está presente, la cal hidratada puede incluirse en las composiciones de cemento en una cantidad en el rango de alrededor de 10 % a alrededor de 100 % en peso de la fuente de sílice, por ejemplo. En algunos ejemplos, la cal hidratada puede estar presente en una cantidad que varía entre cualesquiera de, y/o que incluye cualesquiera de, alrededor de 10 %, alrededor de 20 %, alrededor de 40 %, alrededor de 60 %, alrededor de 80 % o alrededor de 100 % en peso de la fuente de sílice. Una persona del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, debería reconocer la cantidad adecuada de cal hidratada que se ha de incluir para una aplicación elegida.

[0034] En algunos ejemplos, las composiciones de cemento pueden incluir una fuente de calcio distinta de la cal hidratada. En general, puede necesitarse calcio y un pH alto, por ejemplo, un pH de 7,0 o más para que ocurran ciertas reacciones

cementosas. Una ventaja potencial de la cal hidratada puede ser que se suministran iones de calcio e iones de hidróxido en la misma molécula. En otro ejemplo, la fuente de calcio puede ser $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ o CaCl_2 , con el hidróxido suministrado por NaOH o KOH , por ejemplo. Una persona del oficio de nivel medio entendería que la fuente de calcio y la fuente de hidróxido alternativas pueden incluirse en una composición de cemento de la misma manera que la cal hidratada. Por ejemplo, la fuente de calcio y la fuente de hidróxido pueden incluirse en una relación en peso de fuente de sílice con respecto a cal hidratada de alrededor de 10:1 a alrededor de 1:1 o una relación de alrededor de 3:1 a alrededor de 5:1. Cuando está presente, la fuente de calcio y la fuente de hidróxido alternativas pueden incluirse en las composiciones de cemento en una cantidad en el rango de alrededor de 10 % a alrededor de 100 % en peso de la fuente de sílice, por ejemplo. En algunos ejemplos, la fuente de calcio y la fuente de hidróxido alternativas pueden estar presentes en una cantidad que varía entre cualesquiera de, y/o que incluye cualesquiera de, alrededor de 10 %, alrededor de 20 %, alrededor de 40 %, alrededor de 60 %, alrededor de 80 % o alrededor de 100 % en peso de la fuente de sílice. Una persona del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, debería reconocer la cantidad adecuada de fuente de calcio y fuente de hidróxido alternativas que se ha de incluir para una aplicación elegida.

[0035] Se puede definir una relación diana de sílice y cal y se puede identificar un aditivo de cemento que comprende dos o más componentes de cemento que cumpla con la relación de sílice y cal. En algunos ejemplos, la relación diana de sílice y cal puede variar de alrededor de 80/20 de sílice con respecto a cal libre en peso a alrededor de 60/40 de sílice con respecto a cal libre en peso, por ejemplo, puede ser de alrededor de 80/20 de sílice con respecto a cal libre en peso, alrededor de 70/30 de sílice con respecto a cal libre en peso o alrededor de 60/40 de sílice con respecto a cal libre en peso. La relación de sílice y cal puede determinarse al medir la sílice y la cal disponibles para un componente de cemento dado.

[0036] También pueden incluirse en formas de realización de las composiciones de cemento otros aditivos adecuados para su uso en operaciones de cementación. Los ejemplos de tales aditivos incluyen, entre otros, agentes densificantes, retardadores, aceleradores, activadores, aditivos de control de gas, aditivos ligeros, aditivos generadores de gas, aditivos que mejoran las propiedades mecánicas, materiales de pérdida de circulación, aditivos de control de filtración, aditivos de control de pérdida de fluido, agentes antiespumantes, agentes espumantes, dispersantes, aditivos tixotrópicos, agentes de suspensión y

combinaciones de estos. Una persona del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, podrá seleccionar un aditivo adecuado para una aplicación particular.

[0037] Como se mencionó anteriormente, para determinar si dos o más de los componentes de cemento mencionados anteriormente son compatibles, se pueden realizar varias pruebas de laboratorio. Además, los efectos sinérgicos potenciales del componente de cemento pueden no conocerse a menos que se realicen varias pruebas de laboratorio. Por lo general, una composición de cemento conocida puede formularse en primer lugar y evaluarse para determinar propiedades tales como, por ejemplo, la pérdida de fluido, el tiempo de espesamiento y la resistencia a la compresión a las 24 horas. Luego, se pueden agregar cantidades variables de aditivos a un lote nuevo de composiciones de cemento y se vuelven a realizar las pruebas. Se recopilan los resultados de cada prueba y se los compara. Luego se puede realizar un nuevo conjunto de pruebas con nuevas concentraciones de aditivos, por ejemplo, para ajustar las propiedades de la composición de cemento. El proceso de evaluar diversos aditivos a diversas concentraciones puede continuar por varios ensayos hasta poder formular una composición o composiciones de cemento aceptables. Una composición de cemento aceptable puede ser una que cumpla con ciertos requisitos de diseño, tales como resistencia a la compresión, pérdida de fluido y tiempo de espesamiento. El proceso de diseño de la composición de cemento puede realizarse de manera heurística, que conduce a una composición de cemento que puede tener las propiedades de ingeniería requeridas, pero que puede no estar optimizada en lo que respecta a complejidad. Además, se han usado anteriormente fuentes de sílice tales como, por ejemplo, CKD, ya sea como agentes de relleno puros o, en algunos ejemplos, como componentes reactivos, en composiciones de cemento a base de Portland. CKD contribuirá una porción de sílice que requiere una porción de cal para reaccionar. En los métodos de formulación de composición de cemento descritos anteriormente, el proceso heurístico no toma en cuenta la relación de sílice con respecto a cal de una composición.

[0038] El método descrito en la presente puede reducir o eliminar la búsqueda heurística de un proceso que identifique partículas inorgánicas (por ejemplo, un aditivo de cemento) mediante un proceso de medir y categorizar una variedad de partículas inorgánicas denominado mapeo de reactividad. El mapeo de la reactividad puede generar una correlación entre las propiedades de las partículas inorgánicas. La correlación puede ser cualquier tipo de correlación, incluso, entre otros, una regresión lineal multivariante. El mapeo de la reactividad puede incluir varias etapas. Una etapa

puede incluir analizar cada una de un grupo de partículas inorgánicas diferentes para generar datos sobre las propiedades fisicoquímicas de cada una de las partículas inorgánicas. A modo de ejemplo, el análisis puede incluir medir las propiedades fisicoquímicas de diferentes partículas inorgánicas mediante pruebas estandarizadas. Otra etapa puede incluir categorizar los materiales mediante el análisis de los datos recolectados y el efecto previsto sobre las propiedades de la lechada de cemento. Aun otra etapa puede incluir utilizar los datos para estimar la reactividad del material, mejorar el rendimiento del cemento, predecir matemáticamente propiedades mecánicas de la mezcla en función de resultados analíticos y/o predecir cuánto depende la resistencia a la compresión de la densidad de la lechada.

[0039] La medición de las propiedades fisicoquímicas de cada componente de cemento seleccionado puede incluir muchas técnicas y procedimientos de laboratorio, incluso, entre otros, microscopía, espectroscopía, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, análisis de tamaño de partícula, análisis de requisito de agua, microscopía electrónica de barrido, espectroscopía de rayos X de energía dispersiva, análisis de gravedad específica, área de superficie, análisis termogravimétrico, análisis de morfología, espectroscopía infrarroja, espectroscopía ultravioleta visible, espectroscopía de masas, espectrometría de masas de iones secundarios, espectroscopía de masas de energía electrónica, espectroscopía de rayos X dispersiva, espectroscopía electrónica Auger, análisis de plasma acoplado inductivamente, espectroscopía de masas de ionización térmica, espectroscopía de masas de descarga luminiscente, espectroscopía fotoelectrónica de rayos X, pruebas de propiedades mecánicas, pruebas de módulo de Young, propiedades reológicas, coeficiente de Poisson. Una o más de las pruebas de procedimientos anteriores pueden considerarse pruebas API, como se establece en la práctica recomendada por el API para evaluar cementos de pozo (publicada como la práctica recomendada por el ANSI/API 10B-2). También se pueden usar para las mediciones pruebas API adicionales no enumeradas anteriormente de manera específica. Las propiedades fisicoquímicas pueden medirse para un grupo de componentes de cemento. Dos o más de los componentes de cemento medidos pueden ser diferentes tipos de componentes de cemento (por ejemplo, vidrio natural, CKD, cenizas volantes, etc.). Dos o más de los componentes de cemento pueden ser del mismo tipo pero de diferentes fuentes (por ejemplo, vidrio natural de la fuente 1, vidrio natural de la fuente 2, etc.).

[0040] La difracción de rayos X en polvo puede ser una técnica de análisis que

puede usarse para medir las propiedades fisicoquímicas de los componentes de cemento. La difracción de rayos X en polvo puede ser una técnica para exponer una muestra a rayos X, neutrones o electrones y para medir la cantidad de difracción interatómica. La muestra actúa como una rejilla de difracción, por lo que produce una señal diferente en ángulos diferentes. Las propiedades típicas que pueden medirse son la identificación de fase para la identificación y caracterización de un sólido cristalino. Otras propiedades pueden ser cristalinidad, parámetros de red, tensores de expansión, módulo a granel y transiciones de fase.

[0041] La fluorescencia de rayos X puede ser otra técnica de análisis que puede usarse para medir las propiedades fisicoquímicas de los componentes de cemento. La fluorescencia de rayos X puede usar rayos X de onda corta para ionizar átomos en una muestra, lo que causa su fluorescencia a ciertas longitudes de onda características. La radiación característica liberada por una muestra puede permitir una identificación precisa de los átomos componentes en la muestra, así como sus cantidades relativas.

[0042] El análisis de tamaño de partícula puede ser otra técnica de análisis que puede usarse para medir las propiedades fisicoquímicas de los componentes de cemento. El análisis de tamaño de partícula puede llevarse a cabo con análisis mediante diversas técnicas de laboratorio, que incluyen, entre otras, difracción láser, dispersión de luz dinámica, análisis de imágenes estáticas y análisis de imágenes dinámicas. El análisis de tamaño de partícula también puede proporcionar información sobre la morfología de una muestra particular. La morfología puede incluir parámetros tales como esfericidad y redondez, así como la forma general de una partícula, tal como disco, esferoide, cuchilla o rodillo. Al conocer la morfología y el tamaño de partícula, se puede estimar el área de superficie y volumen promedio. El área de superficie y el volumen pueden ser importantes para determinar el requisito de agua, así como la reactividad. En general, un tamaño de partícula relativamente menor puede reaccionar más rápidamente que un tamaño de partícula relativamente mayor. Asimismo, el tamaño de partícula relativamente menor puede tener un mayor requisito de agua para hidratarse por completo que un tamaño de partícula relativamente mayor.

[0043] La espectroscopía de rayos X de energía dispersiva puede ser otra técnica de análisis que puede usarse para medir las propiedades fisicoquímicas de los materiales cementosos complementarios. La espectroscopía de rayos X de energía dispersiva puede ser una técnica analítica usada para analizar los elementos

presentes en una muestra y determinar la caracterización química de una muestra. Otras técnicas pueden incluir espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, espectroscopía ultravioleta visible, espectroscopía de masas, espectrometría de masas de iones secundarios, espectroscopía de masas de energía electrónica, espectroscopía de rayos X dispersiva, espectroscopía electrónica Auger, espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), espectroscopía de masas de ionización térmica, espectroscopía de masas de descarga luminiscente y espectroscopía fotoelectrónica de rayos X.

[0044] Los componentes de cemento pueden analizarse para determinar su requisito de agua. El requisito de agua puede definirse por lo general como la cantidad de agua de mezcla que puede ser necesario agregar a un material sólido en polvo para formar una lechada de una consistencia especificada. El requisito de agua para un componente de cemento particular puede determinarse mediante un proceso que incluye a) preparar una mezcladora Waring con una cantidad especificada de agua, b) agitar el agua a unas rpm especificadas de la mezcladora, c) agregar el sólido en polvo que puede estar bajo investigación al agua hasta obtener una consistencia especificada, y d) calcular el requisito de agua en función de la relación de agua con respecto a sólidos necesaria para lograr la consistencia deseada.

[0045] Los componentes de cemento pueden analizarse para determinar su área de superficie específica. Área de superficie específica se refiere por lo general al área de superficie total y puede informarse como el área de superficie total por masa unitaria. Los valores obtenidos para un área específica dependen de la técnica de análisis. Se puede usar cualquier técnica de análisis adecuada, incluso, entre otras, métodos basados en adsorción tales como análisis de Brunauer-Emmett-Teller (BET), tinción con azul de metileno, adsorción de monoetil éter de etilenglicol y un método de retención de proteínas, entre otros.

[0046] El análisis termogravimétrico puede ser otra técnica de análisis que puede usarse para medir las propiedades fisicoquímicas de los componentes de cemento. El análisis termogravimétrico puede ser un método de análisis térmico en donde se pueden medir los cambios de las propiedades fisicoquímicas de una muestra. En general, las propiedades pueden medirse como una función del aumento de la temperatura, tal como con una velocidad de calentamiento constante, o como una función del tiempo con una temperatura constante o un cambio de masa constante. Las propiedades determinadas mediante análisis termogravimétrico pueden incluir transiciones de fase de primer orden y transiciones de fase de segundo orden,

tales como reacciones de vaporización, sublimación, adsorción, desorción, absorción, quimisorción, desolvatación, deshidratación, descomposición, oxidación y reducción, transición ferromagnética, transición superconductora y otras.

[0047] Además de determinar las propiedades fisicoquímicas de los componentes de cemento en sí, también se pueden realizar pruebas de laboratorio para determinar el comportamiento de los componentes de cemento en una composición de cemento. Por ejemplo, los componentes de cemento pueden analizarse en una composición de cemento para determinar el desarrollo de su resistencia a la compresión y sus propiedades mecánicas. Por ejemplo, una cantidad preseleccionada del componente de cemento puede combinarse con agua y cal (de ser necesario para el fraguado). Luego se pueden determinar las propiedades mecánicas de la composición de cemento, incluso la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción y el módulo de Young. Se puede usar cualquier de una variedad de condiciones diferentes para las pruebas siempre que las condiciones sean consistentes para los diferentes componentes de cemento.

[0048] La resistencia a la compresión puede ser generalmente la capacidad de un material o estructura para resistir fuerzas de empuje dirigidas axialmente. La resistencia a la compresión del componente de cemento puede medirse en un momento especificado después de mezclar el componente de cemento con agua, y la composición de cemento resultante puede mantenerse a condiciones especificadas de temperatura y presión. Por ejemplo, la resistencia a la compresión puede medirse en un momento en el rango de alrededor de 24 a alrededor de 48 horas (o más) después de mezclar el fluido y el fluido puede mantenerse a una temperatura de 100 °F a alrededor de 200 °F y presión atmosférica. La resistencia a la compresión puede medirse con un método destructivo o un método no destructivo. El método destructivo evalúa físicamente la resistencia de las muestras de fluido de tratamiento en diversos puntos en el tiempo al triturar las muestras en una máquina de prueba de compresión. La resistencia a la compresión puede calcularse a partir de la carga de falla dividida por el área de sección transversal que resiste la carga y puede informarse en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi). Por lo general, los métodos no destructivos pueden emplear un analizador de cemento ultrasónico ("UCA"), disponible a través de Fann® Instrument Company, Houston, TX. Las resistencias a la compresión pueden determinarse de acuerdo con API RP 10B-2, *Recommended Practice for Testing Well Cements*, primera edición, julio de 2005.

[0049] En general, la resistencia a la tracción puede ser la capacidad de un

material de resistir cargas con una tendencia al alargamiento, a diferencia de la resistencia a la compresión. La resistencia a la tracción del componente de cemento puede medirse en un momento especificado después de mezclar el componente de cemento con agua, y la composición de cemento resultante puede mantenerse a condiciones especificadas de temperatura y presión. Por ejemplo, la resistencia a la tracción puede medirse en un momento en el rango de alrededor de 24 a alrededor de 48 horas (o más) después de mezclar el fluido y el fluido puede mantenerse a una temperatura de 100 °F a alrededor de 200 °F y presión atmosférica. La resistencia a la tracción puede medirse con cualquier método adecuado, incluso, entre otros, de acuerdo con el procedimiento descrito en ASTM C307. Es decir, se pueden preparar muestras en moldes de briqueta que tengan la apariencia de galletas para perro con un área de sección transversal de una pulgada cuadrada en el medio. Luego se puede aplicar tensión en los extremos agrandados de las muestras hasta partir las muestras en el área central. La tensión en libras por pulgada cuadrada a la que la muestra se parte puede ser la resistencia a la tracción del material evaluado.

[0050] El módulo de Young, también denominado módulo de elasticidad, puede ser una medida de la relación entre una tensión aplicada y la deformación resultante. En general, un material (plástico) altamente deformable exhibirá un módulo menor cuando la tensión de confinamiento pueda aumentar. Por lo tanto, el módulo de Young puede ser una constante elástica que demuestre la capacidad del material evaluado de soportar las cargas aplicadas. Se pueden usar varias técnicas diferentes de laboratorio para medir el módulo de Young de un fluido de tratamiento que comprende un componente cementoso después de permitir que el fluido de tratamiento se fragüe durante un período de tiempo a condiciones especificadas de temperatura y presión.

[0051] Si bien pueden haberse mencionado solo algunas técnicas de laboratorio selectas, debe entenderse que puede haber muchas técnicas analíticas que pueden ser adecuadas o no adecuadas para una muestra determinada. Una persona del oficio de nivel medio con el beneficio de esta divulgación podrá seleccionar una técnica analítica adecuada para determinar una propiedad de interés determinada.

[0052] Una vez realizadas las técnicas analíticas sobre los componentes de cemento, los datos pueden categorizarse o correlacionarse. Algunas categorías pueden incluir, entre otras, área de superficie específica, morfología, gravedad específica, requisito de agua, etc. En algunos ejemplos, los componentes pueden

categorizarse en cantidades relativas, que incluyen la cantidad de al menos uno de los siguientes: sílice, alúmina, hierro, calcio, sodio, potasio, magnesio, azufre, óxidos de estos y combinaciones de estos. Por ejemplo, los componentes pueden categorizarse en función de un análisis de óxidos que incluye, entre otros, contenido de sílice, contenido de óxido de calcio y contenido de alúmina, entre otros óxidos que puedan estar presentes en el componente de cemento. Además, se pueden generar correlaciones entre los componentes de cemento en función de los datos o la categorización de los datos. Además, se pueden definir o generar correlaciones entre las propiedades de los componentes de cemento en función de los datos. Por ejemplo, las diversas categorías de propiedades pueden graficarse como una función de las otras. En algunos ejemplos, se puede graficar el requisito de agua en comparación con el área de superficie específica. En consecuencia, el requisito de agua del componente de cemento puede correlacionarse con el área de superficie específica, de modo que el área de superficie específica puede ser una función del requisito de agua. Se puede usar el área de superficie específica para predecir la reactividad de un componente (o componentes) de cemento. Sin embargo, el área de superficie específica puede no siempre estar disponible para cada material ya que el análisis del área de superficie específica requiere por lo general un instrumento especializado. En consecuencia, si se puede obtener el requisito de agua para el componente de cemento, se puede usar la correlación entre el requisito de agua y el área de superficie específica para obtener una estimación del área de superficie específica, que luego puede usarse para predecir la reactividad. Además de las correlaciones entre el área de superficie específica y la reactividad, también se pueden hacer correlaciones entre el área de superficie específica y otras propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la tracción y el módulo de Young.

[0053] Algunos componentes de cemento solubles en álcali pueden incluir materiales recuperados o naturales. Específicamente, los componentes de cemento que contienen sílice pueden incluir materiales tales como materiales minados, por ejemplo, materiales cementosos complementarios, tales como cenizas volantes y CKD, y cenizas agrícolas como se describieron anteriormente. En algunos ejemplos, el componente de cemento que puede ser soluble en álcali puede tener efectos sinérgicos con un cemento Portland, mientras que otros pueden ser incompatibles. En algunos ejemplos, un componente de cemento que puede ser soluble en álcali puede provocar gelificación, alta generación de calor y retención de agua, entre otros efectos. Estos y otros efectos pueden lograrse durante las pruebas de laboratorio del

componente de cemento en una composición de cemento que comprenda cemento Portland. El equipo de laboratorio puede configurarse para detectar los efectos del componente de cemento sobre la composición. En algunos ejemplos, un equipo tal como un calorímetro puede medir y cuantificar la cantidad de generación de calor por masa unitaria del componente de cemento. Los viscosímetros pueden medir el aumento de la gelificación causada por el componente de cemento. Cada uno de los efectos físicos causados por la adición del componente de cemento puede medirse a varias concentraciones y luego categorizarse, por ejemplo, graficarse o mapearse. Una vez que sea posible mapear el componente, el efecto de agregar el componente a una composición de cemento puede predecirse al referirse a la categorización.

[0054] Como se mencionó anteriormente, algunos componentes de cemento solubles en álcali pueden inducir gelificación cuando se los incluye en una composición de cemento. Si bien una mayor velocidad de gelificación puede ser indeseable en algunos ejemplos, una mayor velocidad de gelificación puede ser ventajosa o necesaria en otros ejemplos para cumplir con los criterios de diseño de ingeniería. Por lo general, una persona del oficio de nivel medio seleccionaría un agente de gelificación o viscosificador adecuado para su uso en la composición de cemento. Con el beneficio del mapeo, una persona del oficio de nivel medio podrá seleccionar un componente de cemento que puede ser soluble en álcali que puede servir un doble propósito. Por ejemplo, un componente de cemento puede aumentar la resistencia a la compresión de una composición de cemento, pero también aumentar la gelificación durante la mezcla. Si los criterios de diseño de ingeniería requieren una mayor gelificación durante la mezcla, puede ser ventajoso incluir el componente de cemento que aumenta la resistencia a la compresión a medida que aumenta también la gelificación. La inclusión de un componente de cemento que presenta múltiples efectos puede reducir la cantidad de aditivos adicionales, tales como agentes de gelificación o viscosificadores, necesarios. Como el efecto de gelificación del componente puede haberse documentado en un mapa, se puede determinar fácilmente la cantidad de componente que se ha de incluir en una composición de cemento.

[0055] Otro efecto físico potencialmente ventajoso que puede mapearse puede ser la capacidad de dispersión. Algunos componentes de cemento pueden incluir partículas relativamente esféricas. Las partículas relativamente esféricas pueden ejercer un efecto de "rodamiento de rodillo" sobre una composición de cemento con agua. El efecto puede hacer que los otros componentes en la composición de cemento

se vuelvan más móviles, lo cual dispersa los componentes en la composición de cemento. Si las partículas tienen a grandes rasgos un séptimo, o menos, del tamaño del componente primario en una lechada, la viscosidad aparente puede disminuir. Otra propiedad física potencialmente ventajosa que puede mapearse puede ser el área de superficie. El área de superficie puede estar relacionada con la densidad, en donde una partícula con un área de superficie relativamente mayor puede disminuir la densidad de una composición de cemento. Se pueden usar partículas que reducen la densidad como aditivo de baja densidad. Otro efecto potencialmente ventajoso que puede mapearse puede ser el tamaño de partícula. Los componentes con tamaños de partícula relativamente menores pueden tener la capacidad de formar una torta de filtro contra una formación, lo que impide que el cemento se escape hacia una formación. Se pueden usar componentes de cemento con un tamaño de partícula pequeño como un agente de control de pérdida de fluido. Con el beneficio de la presente divulgación, una persona del oficio de nivel medio podrá seleccionar un componente de cemento y mapear sus propiedades. Una persona del oficio de nivel medio debería también ser capaz de seleccionar una propiedad de interés secundaria del componente de cemento y, con el beneficio del mapa, crear una lechada con las propiedades deseadas.

[0056] Una vez que sea posible recolectar los datos mediante las técnicas de laboratorio seleccionadas, así como categorizarlos y mapearlos, se pueden realizar varias operaciones con los datos para obtener predicciones sobre una composición de cemento que incluya componentes de cemento mapeados. Por ejemplo, se pueden estimar propiedades de fraguado. Se describirá a continuación un método para estimar la reactividad del material en función del índice de reactividad. La reactividad del material puede basarse en muchos parámetros, tales como el área de superficie específica y la gravedad específica, entre otros. Otro uso de los datos mapeados puede ser aumentar el rendimiento de la lechada de cemento en función de parámetros tales como la forma de partícula, el tamaño de partícula y la reactividad de partícula. Los datos también pueden usarse para predecir y determinar cuánto depende la resistencia a la compresión de la densidad de la lechada y usar la información obtenida para diseñar formulaciones de cemento mejoradas. Los datos también pueden usarse para predecir una composición de lechada a fin de obtener una formulación de cemento mejorada. Los criterios justos pueden ser la resistencia a la compresión, reología, propiedades mecánicas, propiedades de control de pérdida de fluido, tiempos de espesamiento y otros.

[0057] Se puede usar mapeo de reactividad para estimar diversas propiedades mecánicas de un componente de cemento, incluso la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción y el módulo de Young. Como se describió anteriormente, se pueden generar correlaciones entre el área de superficie específica y ciertas propiedades mecánicas, tales como la reactividad, la resistencia a la tracción y el módulo de Young. Con estas correlaciones, se pueden predecir las propiedades mecánicas de un componente de cemento o una combinación de componentes de cemento.

[0058] Una técnica que puede usarse para correlacionar las propiedades del material con un índice de reactividad es el modelado con un modelo de regresión multilíneal. El modelo de regresión multilíneal puede calcularse a partir del índice de reactividad y las propiedades del material. Sin limitarse a la teoría, se puede hacer referencia al índice de reactividad de un componente de cemento como una medida de la reactividad del componente de cemento ajustada en función de las diferencias en gravedad específica, densidad aparente, requisito de agua y cantidad de especies inorgánicas, tales como SiO_2 y CaO . En una forma de realización, un modelo multilíneal de índice de reactividad química de un material particular puede expresarse como la ecuación 1.

$$\text{índice de reactividad} = \sum a_i p_i \quad (1)$$

Donde a_i es una constante y p_i es una propiedad física medible. P_i puede ser cualquiera de las siguientes propiedades físicas, tales como, entre otras, gravedad específica, densidad aparente, requisito de agua, tamaño de partícula, distribución de tamaño de partícula, relación de Hausner, parámetros de forma de partícula, relación de aspecto de la partícula, área de superficie específica, solubilidad en un medio alcalino, contenido de óxido, tal como sílice, óxido de calcio, alúmina, óxido de hierro, óxido de manganeso, óxido de zinc y sílice en fase amorfa, por ejemplo. En una forma de realización particular, un modelo de índice de reactividad química puede tener la forma de la ecuación 2.

$$\alpha_i = a + b * SG + c * BD + d * WR + e * Si + f * Ca \quad (2)$$

Donde a, b, c, d, e y f son constantes, SG es la gravedad específica, BD es la densidad aparente, WR es el requisito de agua, Si es el porcentaje en masa de SiO_2 y Ca es el porcentaje en masa de CaO .

[0059] En formas de realización alternativas, el modelo de índice de reactividad química puede tener la forma de la ecuación 3, ecuación 4 o ecuación 5,

donde a_i y b_i son constantes y p_i es una propiedad física medible.

$$\text{índice de reactividad} = \sum a_i p_i^{b_i} \quad (3)$$

$$\text{índice de reactividad} = \prod p_i^{a_i} \quad (4)$$

$$\text{índice de reactividad} = \sum f(p_i) \quad (5)$$

[0060] Un método para aplicar el modelo de índice de reactividad puede incluir analizar cada una de un grupo de partículas inorgánicas para generar datos sobre las propiedades fisicoquímicas de cada una de las partículas inorgánicas y luego generar una correlación entre un índice de reactividad de cada una de las partículas inorgánicas y los datos. La correlación luego puede usarse para diseñar una composición de cemento en función, al menos en parte, de la correlación. Por ejemplo, la correlación puede usarse para seleccionar componentes de cemento y relaciones de estos tales que hagan que una lechada de cemento que comprende los componentes de cemento y relaciones de estos seleccionados tenga una reactividad deseada. En una forma de realización, se puede especificar una reactividad y se puede usar el modelo para determinar los componentes de cemento requeridos y las relaciones de estos para lograr la reactividad deseada.

[0061] Otro método para aplicar un modelo de índice de reactividad puede ser usar un sistema informático y un instrumento analítico para recopilar datos fisicoquímicos sobre un grupo de partículas inorgánicas. El sistema informático luego puede generar una correlación entre un índice de reactividad de cada una de las partículas inorgánicas y los datos y luego proporcionar una composición de cemento en función, al menos en parte, de la correlación. La composición de cemento puede estar sometida a ciertas limitaciones, tales como la resistencia a la compresión, por ejemplo. Un usuario puede ingresar una resistencia a la compresión deseada y/o una lista de partículas inorgánicas en el sistema informático, que luego puede usar una correlación para generar una composición de cemento que satisfaga la resistencia a la compresión deseada. La composición de cemento puede incluir una o más de las partículas inorgánicas en la lista de partículas inorgánicas. En una forma de realización, el sistema informático puede incluir una base de datos de modelo predictivo que comprende múltiples correlaciones, en donde cada correlación es específica de una partícula inorgánica particular.

[0062] Una técnica que puede usarse para correlacionar la reactividad y área de superficie específica es el índice de reactividad. Es importante observar que la expresión "componente de cemento" se refiere a cualquier material que sea

cementoso cuando se lo mezcla con agua y/o cal y un agente de suspensión, cuando sea necesario, para que la lechada sea estable. Un "índice de reactividad cementoso" CRI_i puede definirse como, entre otras cosas, la ecuación (6), de la siguiente manera:

$$CRI_i = f_{CRI}(CS_i, \rho_i, SSA_{PSDi})$$

(6)

Donde:

CS_i = UCS (resistencia a la compresión final) no confinada obtenida de muestras curadas a una temperatura, presión y edad de referencia específicas.

ρ_i = Densidad de lechada que se preparó y curo para medir la UCS

SSA_{PSDi} = Área de superficie específica obtenida mediante métodos típicos de análisis de tamaño de partícula.

Un "índice fisicoquímico" (PCI) del componente cementoso puede definirse como, entre otras cosas, la ecuación (7):

$$PCI_i = f_{PCI}(SA_i, SG_i, D_{50}, C_{Si}, C_{Ca}, C_{Al}, C_{Na}, C_{Fe}, C_{otras\ especies}) \quad (7)$$

Donde:

SA_i = Área de superficie del componente cementoso i,

SG_i = gravedad específica del componente cementoso i,

D_{50} = diámetro promedio en masa o diámetro promedio en volumen de la distribución de tamaño de partícula del componente cementoso i,

C_{Si} = Concentración en masa de óxido de sílice del componente i,

C_{Ca} = Concentración en masa de óxido de calcio del componente i,

C_{Al} = Concentración en masa de óxido de aluminio del componente i,

C_{Na} = Concentración en masa de óxido de sodio del componente i,

C_{Fe} = Concentración en masa de óxido de hierro del componente i,

[0063] Debe observarse que las concentraciones en masa mencionadas anteriormente pueden medirse, entre otras maneras, mediante la técnica de medición de Espectroscopia de fluorescencia de rayos X, y una referencia al "componente i" equivale a "componente cementoso i". En las funciones en las ecuaciones (6) y (7) que definen CRI_i y PCI_i , cuando se las define de manera adecuada, la siguiente relación

universal puede ser cierta para una amplia gama de materiales cementosos, tales como, entre otros, cementos Portland; cenizas volantes; otros materiales puzolánicos; otras cenizas; etc.

$$CRI_i = f_{CRI-PCI}(PCI_i) \quad (8)$$

La Figura 1 es un gráfico de la ecuación (6) en comparación con la ecuación (7) con datos reales, que ilustra la precisión de las ecuaciones (6), (7) y (8) cuando se las aplica a cinco tipos diferentes de fuentes de material cementoso y tres muestras de materiales similares pero de fuentes diferentes. Se descubrió que los datos simulados tienen una relación de $y=36,252x^{0,2256}$, en donde $R^2=0,9406$.

[0064] En algunos ejemplos, la forma de la ecuación (8) puede ser una ley de potencia, tal como en la ecuación 9.

$$CRI_i = A[PCI_i]^B \quad (9)$$

A y B son coeficientes que pueden ser exclusivos de las diversas especies y fuentes de materiales cementosos seleccionadas. Una vez definida la función generalizada definida en la ecuación (9) para una población o grupo dado de componentes cementosos, se puede usar una relación de suma lineal o no lineal definida adicionalmente a continuación junto con la ecuación (10) para predecir la UCS de diversas combinaciones de materiales cementosos para temperaturas, presiones, edades de curado y densidades de lechada especificadas.

$$CRI_c = A[PCI_c]^B \quad (10)$$

Donde,

CRI_c se define como el CRI de la combinación de única de n componentes cementosos como el compuesto, y, de manera similar,

PCI_c se define como el índice fisicoquímico del compuesto.

Un compuesto dado con masa de m_c se define de la siguiente manera:

$$m_c = f_i + f_{i+1} + f_{i+2} + f_n \quad (11)$$

Donde: f_i se define como la fracción de masa del componente cementoso i, y n es la cantidad total de componentes cementosos independientes. Una vez definida la función en la ecuación (10), se puede calcular el valor compuesto del índice de reactividad fisicoquímica con la ecuación (12), de la siguiente manera:

$$PCI_c = f_1 PCI_1 + f_2 PCI_2 + f_3 PCI_3 + \dots + f_n PCI_n \quad (12)$$

[0065] Donde: PCI_c se define como el índice de reactividad química general de

una mezcla de n cantidad de componentes cementosos independientes de manera única, f_i se define como la fracción de masa del componente cementoso i, y n es la cantidad total de componentes cementosos independientes. Una vez determinado PCI_c para la mezcla asumida específica de componentes cementosos seleccionados, se determinan las sumas lineales o no lineales (ecuaciones (13) y (14)) para los siguientes términos:

$$\rho_c = f_1\rho_1 + f_2\rho_2 + f_3\rho_3 + \dots + f_n\rho_n \quad (13)$$

y,

$$SSA_{PSD_c} = f_1SSA_{PSD1} + f_2SSA_{PSD2} + f_3SSA_{PSD3} + \dots + f_nSSA_{PSDn} \quad (14)$$

PCI_c se usa para calcular el valor de CRI_c mediante la ecuación (10) o la forma más generalizada de la ecuación (8) para los términos compuestos. Tras determinar CRI_c para la mezcla de compuestos dada, se pueden usar los valores compuestos de ρ_c y SSA_{PSD_c} junto con la ecuación (15) para predecir la resistencia a la compresión real de la mezcla de compuestos, CS_c .

$$CRI_c = f_{CRI}(CS_c, \rho_c, SSA_{PSD_c}) \quad (15)$$

Se recolectaron datos experimentales de mezclas de compuestos específicas y se los resume en la siguiente tabla:

Tabla 1

Fracciones de masa de componentes cementosos			
Componente cementoso	Mezcla de compuestos 1	Mezcla de compuestos 2	Mezcla de compuestos 3
A	0,36		0,53
B		0,32	
C	0,32		0,31
D		0,33	
E	0,32		
F		0,35	
G			0,16
Totales	1,00	1,00	1,00

Es importante observar que cada uno de los componentes cementosos anteriores fueron especies claramente diferentes (tipo) de composición cementosa y/o de una fuente diferente.

[0066] La Figura 2 es otro gráfico de la ecuación (6) en comparación con la ecuación (7) con datos reales que muestran la precisión de las ecuaciones (6), (7) y

(8). También se pueden usar las ecuaciones (6) a (15) para predecir otras propiedades mecánicas, incluso, entre otras, el módulo de elasticidad de Young y la resistencia a la tracción. Además, debe observarse que, si bien puede haber una técnica de "suma lineal" en el desarrollo anterior, las formas de realización también incluyen otros métodos, tales como el método de suma no lineal presentado en la ecuación (16).

$$PCI_e = (1 + f_1)^{\alpha_1} PCI_1 + (1 + f_2)^{\alpha_2} PCI_2 + (1 + f_3)^{\alpha_3} PCI_3 + \dots + (1 + f_n)^{\alpha_n} PCI_n$$

(16)

Donde: α_i son exponentes que se determinan para un conjunto único de componentes cementosos.

[0067] Se analizarán a continuación otros ejemplos mediante el uso del índice de reactividad química, el requisito de agua y otros parámetros analíticos. Se puede generar una tabla estadística que grafique el índice de reactividad química en comparación con el requisito de agua. Se muestra un ejemplo en la Tabla 2.

Tabla 2: índice de reactividad química en comparación con requisito de agua

requisito de agua	Alto	X1	X4, X5	X8
	Medio	X2	X6	X9, X10
	Bajo	X3	X7	X11...Xn
		Bajo	Medio	Alto
		Índice de reactividad química		

También se pueden usar otros parámetros analíticos, tales como tamaño de partícula en comparación con índice de reactividad química, generación de calor en comparación con índice de reactividad química, y otros. Al clasificar el índice de reactividad química en función de un parámetro analítico, se puede seleccionar una mezcla de componentes con una complejidad minimizada y un mejor índice de reactividad química sin dejar de tener una composición mezclable. En algunos ejemplos, una composición de cemento seleccionada puede tener demasiada agua libre como para fraguarse de manera adecuada. En tales ejemplos, se puede seleccionar un componente con un alto requisito de agua para reemplazar un componente en la composición de cemento o para complementar la composición de cemento. El componente seleccionado con el alto requisito de agua puede

seleccionarse en función del índice de reactividad química para garantizar que la mezcla general tenga suficiente reactividad. Una composición de cemento que comprende el componente de cemento seleccionado puede presentar menos agua libre debido al alto requisito de agua del componente y también puede presentar la misma reactividad por seleccionar el índice de reactividad química adecuado. La reactividad de una composición de cemento puede ajustarse en función de la selección del componente de cemento con la reactividad deseada. Un componente con una alta reactividad puede presentar un tiempo de fraguado más rápido que uno con una baja reactividad.

[0068] La reactividad de una composición de cemento puede verse afectada por la temperatura del pozo. Si un pozo tiene una temperatura relativamente baja, de alrededor de $<150^{\circ}\text{F}$ o menos, se puede necesitar un componente con una reactividad relativamente alta para garantizar que la composición de cemento desarrolle una resistencia adecuada. En composiciones de cemento anteriores, se puede haber usado un acelerador químico para mejorar la velocidad de la reacción en un pozo con temperatura relativamente menor. Una composición de cemento que comprende un componente con un índice de reactividad química relativamente mayor puede no requerir un acelerador debido a la alta reactividad del componente. Las composiciones de cemento que comprenden un componente de alta reactividad pueden no requerir un acelerador y, por lo tanto, pueden tener una menor complejidad general de lechada. Si un pozo tiene una temperatura relativamente alta, de alrededor de $>150^{\circ}\text{F}$ o más, el componente de cemento puede seleccionarse con una reactividad relativamente menor. La selección de una reactividad menor puede ser ventajosa cuando la alta temperatura de un pozo pueda hacer que la composición de cemento se fragüe con demasiada rapidez. En composiciones de cemento anteriores, se puede haber usado un retardador del fraguado del cemento para reducir la velocidad de la reacción en un pozo con temperatura relativamente mayor. Al seleccionar un componente de reactividad relativamente menor, la reacción de fraguado del cemento puede ralentizarse potencialmente sin el uso de un retardador. La selección de un componente de cemento adecuado en función de la reactividad puede reducir la complejidad de la composición de cemento al eliminar o reducir la necesidad de aceleradores y retardadores. Además, se puede mezclar una combinación de componentes de cemento para controlar la reactividad, por ejemplo, al agregar componentes de cemento de reactividad baja, media y alta, y se puede crear una composición de cemento que tenga una reactividad controlada en todo el espectro

de temperaturas de pozo. Una persona del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, debería reconocer la cantidad y el tipo adecuados de componente de cemento que se ha de incluir para una aplicación elegida.

[0069] Con todas las técnicas analizadas anteriormente, se puede calcular una composición de cemento que tenga una complejidad de lechada minimizada y una reactividad maximizada. Una primera etapa puede ser identificar los requisitos de ingeniería de un pozo particular. Otra etapa puede ser definir el inventario disponible en un campamento o sitio de pozo particular. Como se mencionó anteriormente, una región particular puede tener acceso a solo cierta cantidad o tipo de componentes de cemento. Algunos de los factores que pueden considerarse además de los mencionados anteriormente son la densidad aparente y la gravedad específica de los inventarios disponible y potencial. Los componentes de cemento disponibles pueden evaluarse en un laboratorio y clasificarse con los métodos analizados anteriormente. Un estudio analítico puede incluir las diversas técnicas analíticas mencionadas anteriormente junto con las mediciones de reactividad fisicoquímica de la resistencia a la compresión, módulo de Young, requisito de agua y otras. Luego, se pueden calcular las correlaciones entre las medidas de rendimiento mecánico y las propiedades analíticas. También se puede calcular el índice de reactividad química. Se puede calcular una tabla estadística del índice de reactividad química y el requisito de agua junto con el índice de reactividad química en comparación con otros parámetros analíticos seleccionados.

[0070] Con todas las técnicas analizadas anteriormente, se puede calcular una composición de cemento que tenga una cantidad total de componentes minimizada y una reactividad maximizada. Una primera etapa puede ser identificar los requisitos de ingeniería de un pozo particular. Otra etapa puede ser definir el inventario disponible en un campamento o sitio de pozo particular. Como se mencionó anteriormente, una región particular puede tener acceso a solo cierta cantidad o tipo de componentes de cemento. Algunos de los factores que pueden considerarse además de los mencionados anteriormente son la cantidad total de componentes, la densidad aparente y la gravedad específica de los inventarios disponible y potencial. Los componentes de cemento disponibles pueden evaluarse en un laboratorio y clasificarse con los métodos analizados anteriormente. Un estudio analítico puede incluir las diversas técnicas analíticas mencionadas anteriormente junto con las mediciones de reactividad fisicoquímica de la resistencia a la compresión, módulo de Young, requisito de agua y otras. Luego, se pueden calcular las correlaciones entre las

medidas de rendimiento mecánico y las propiedades analíticas. También se puede calcular el índice de reactividad química. Se puede calcular una tabla estadística del índice de reactividad química y el requisito de agua junto con el índice de reactividad química en comparación con otros parámetros analíticos seleccionados.

[0071] Se puede seleccionar un diseño virtual adicional y se lo puede evaluar para determinar si cumple con los requisitos funcionales definidos por los parámetros de ingeniería. El diseño virtual adicional puede basarse en un diseño anterior o seleccionarse en función de la experiencia de campo, o lo puede seleccionar una computadora. Entre otros factores, el diseño virtual puede basarse en la reactividad química de los componentes de cemento. Los componentes de la composición de cemento pueden ajustarse de manera repetitiva hasta obtener una composición de cemento que tenga el índice de reactividad máximo y la cantidad total de componentes minimizada. En algunos ejemplos, un aditivo de control de pérdida de fluido, un aditivo espesante u otros aditivos de cemento pueden ser necesarios para cumplir con los requisitos funcionales. Como se describió anteriormente, la cantidad de aditivos de cemento que puede ser necesario agregar a una composición de cemento puede minimizarse al seleccionar componentes de cemento con propiedades inherentes tales como un alto índice de reactividad, bajo requisito de agua, propiedades de control de pérdida de fluido y propiedades de dispersión, entre otras.

[0072] Las composiciones de cemento divulgadas en la presente pueden usarse en varias aplicaciones subterráneas, incluso cementación primaria y correctiva. Las composiciones de cemento pueden introducirse en una formación subterránea y dejar para que fragüen. Como se usa en la presente, la introducción de la composición de cemento en una formación subterránea incluye la introducción en cualquier porción de la formación subterránea, en una región cercana al pozo que rodea el pozo, o en ambas. En aplicaciones de cementación primaria, por ejemplo, se pueden introducir las composiciones de cemento en el espacio anular entre un conducto ubicado en un pozo y las paredes del pozo (y/o un conducto más grande en el pozo), en donde el pozo penetra la formación subterránea. Se puede permitir que la composición de cemento fragüe en el espacio anular para formar una vaina anular de cemento endurecido. La composición de cemento puede formar una barrera que evite la migración de fluidos en el pozo. La composición de cemento también puede, por ejemplo, soportar el conducto en el pozo. En aplicaciones de cementación correctiva, las composiciones de cemento pueden usarse, por ejemplo, en operaciones de cementación por compresión o en la colocación de tapones de cemento. A modo de

ejemplo, las composiciones de cemento se pueden colocar en un pozo para taponar una abertura (por ejemplo, un vacío o grieta) en la formación, en un empaque de grava, en el conducto, en la vaina de cemento y/o entre la vaina de cemento y el conducto (por ejemplo, un microanillo).

[0073] Si bien la presente descripción se refiere a composiciones de cemento y componentes de cemento, debe entenderse que las técnicas divulgadas en la presente pueden usarse con cualquier composición de tratamiento de pozo adecuada y partículas sólidas correspondientes, de los cuales las composiciones de cemento y los componentes de cemento son un ejemplo. Los ejemplos adicionales de composiciones de lechada pueden incluir fluidos espaciadores, fluidos de perforación, píldoras de limpieza, píldoras de pérdida de circulación y fluidos de fracturamiento, entre otros. Además, si bien las descripciones anteriores describen fuentes de sílice, debe entenderse que las presentes técnicas pueden usarse para mapear otras partículas inorgánicas adecuadas.

[0074] Las siguientes declaraciones pueden describir ciertos elementos de la presente divulgación, pero no deben considerarse limitativas de ninguna forma de realización particular.

[0075] Declaración 1. Un método que comprende: analizar cada una de un grupo de partículas inorgánicas para generar datos sobre las propiedades fisicoquímicas de cada una de las partículas inorgánicas; y generar una correlación entre un índice de reactividad de cada una de las partículas inorgánicas y los datos.

[0076] Declaración 2. El método de acuerdo con la declaración 1, en donde la etapa de análisis comprende medir al menos uno de gravedad específica, densidad aparente, requisito de agua o concentración de especies inorgánicas.

[0077] Declaración 3. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-2, en donde al menos una de las partículas inorgánicas comprende al menos uno de sílice, alúmina, hierro, óxido de hierro, calcio, óxido de calcio, sodio, potasio, magnesio, azufre y combinaciones de estos.

[0078] Declaración 4. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-3, en donde el análisis de las partículas inorgánicas comprende el análisis con una o más técnicas seleccionadas del grupo que consiste en microscopía, espectroscopía, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, análisis de tamaño de partícula, análisis de requisito de agua, microscopía electrónica de barrido, espectroscopía de rayos X de energía dispersiva, análisis de gravedad específica, área de superficie, análisis termogravimétrico, análisis de morfología, espectroscopía

infrarroja, espectroscopía ultravioleta visible, espectroscopía de masas, espectrometría de masas de iones secundarios, espectroscopía de masas de energía electrónica, espectroscopía de rayos X dispersiva, espectroscopía electrónica Auger, análisis de plasma acoplado inductivamente, espectroscopía de masas de ionización térmica, espectroscopía de masas de descarga luminiscente, espectroscopía fotoelectrónica de rayos X, pruebas de propiedades mecánicas, pruebas de módulo de Young, propiedades reológicas, coeficiente de Poisson, pruebas API y combinaciones de estos.

[0079] Declaración 5. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-4, en donde la correlación es un modelo de regresión.

[0080] Declaración 6. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-5, que comprende además realizar un análisis de regresión multilineal de los datos al modelo de regresión.

[0081] Declaración 7. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-6, en donde la correlación tiene la siguiente forma general: $\text{índice de reactividad} = \prod f(p_i)$ donde p_i es una propiedad física y/o química medible de las partículas inorgánicas.

[0082] Declaración 8. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-7, que comprende además estimar la reactividad de un aditivo de cemento, en función, al menos en parte, de la correlación, en donde el aditivo de cemento comprende dos o más de las partículas inorgánicas.

[0083] Declaración 9. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-8, que comprende además identificar un aditivo de cemento, en función, al menos en parte, de la correlación, preparar una composición de cemento de muestra que comprende el aditivo de cemento y evaluar la composición de cemento de muestra para determinar una o más características de rendimiento.

[0084] Declaración 10. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-9, que comprende además diseñar una composición de cemento en función, al menos en parte, de la correlación y preparar una lechada de cemento a base de la composición de cemento.

[0085] Declaración 11. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-10, que comprende además colocar la lechada de cemento en una formación subterránea mediante el uso de una o más bombas.

[0086] Declaración 12. Un sistema que comprende: un instrumento analítico configurado para recopilar datos fisicoquímicos sobre una pluralidad de partículas

inorgánicas; y un sistema informático configurado para aceptar los datos fisicoquímicos y generar una correlación entre un índice de reactividad de cada una de las partículas inorgánicas.

[0087] Declaración 13. El sistema de acuerdo con la declaración 12, en donde la etapa de análisis comprende medir al menos uno de gravedad específica, densidad aparente, requisito de agua o concentración de especies inorgánicas.

[0088] Declaración 14. El sistema de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 12-13, en donde al menos una de las partículas inorgánicas comprende al menos uno de sílice, alúmina, hierro, óxido de hierro, calcio, óxido de calcio, sodio, potasio, magnesio, azufre y combinaciones de estos.

[0089] Declaración 15. El sistema de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 12-14, en donde el instrumento analítico está configurado para realizar una o más funciones seleccionadas del grupo que consiste en microscopía, espectroscopía, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, análisis de tamaño de partícula, análisis de requisito de agua, microscopía electrónica de barrido, espectroscopía de rayos X de energía dispersiva, análisis de gravedad específica, área de superficie, análisis termogravimétrico, análisis de morfología, espectroscopía infrarroja, espectroscopía ultravioleta visible, espectroscopía de masas, espectrometría de masas de iones secundarios, espectroscopía de masas de energía electrónica, espectroscopía de rayos X dispersiva, espectroscopía electrónica Auger, análisis de plasma acoplado inductivamente, espectroscopía de masas de ionización térmica, espectroscopía de masas de descarga luminiscente, espectroscopía fotoelectrónica de rayos X, pruebas de propiedades mecánicas, pruebas de módulo de Young, propiedades reológicas, coeficiente de Poisson, pruebas API y combinaciones de estos.

[0090] Declaración 16. El sistema de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 12-14, en donde el sistema informático está configurado además para estimar una reactividad de un aditivo de cemento, en función, al menos en parte, de la correlación, en donde el aditivo de cemento comprende dos o más de las partículas inorgánicas.

[0091] Declaración 17. Un medio legible por computadora no transitorio que tiene datos almacenados que representan *software* ejecutable por una computadora, en donde el *software* incluye instrucciones que comprenden: instrucciones para aceptar datos fisicoquímicos de una o más partículas inorgánicas; instrucciones para calcular un índice de reactividad de la una o más partículas inorgánicas; e

instrucciones para calcular una correlación entre los datos fisicoquímicos y el índice de reactividad de al menos una de la una o más partículas inorgánicas.

[0092] Declaración 18. El medio legible por computadora no transitorio de acuerdo con la declaración 17, en donde las instrucciones para calcular una correlación comprenden instrucciones para realizar un análisis de regresión.

[0093] Declaración 19. El medio legible por computadora no transitorio de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 17-18, en donde las instrucciones comprenden además: instrucciones para aceptar una característica de rendimiento; e instrucciones para generar una composición de cemento en función, al menos en parte, de la correlación y la característica de rendimiento.

[0094] Declaración 20. El medio legible por computadora no transitorio de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 17-19, en donde la característica de rendimiento es la resistencia a la compresión.

EJEMPLO 1

[0095] Se realizó una serie de pruebas al mezclar 40 % de agua en masa con 60 % de agua en masa de material cementoso mezclado en seco. El material cementoso mezclado en seco contenía cemento, cenizas volantes y un tercer material a evaluar para determinar su índice de reactividad. Para cada material a evaluar, se mezclaron dos conjuntos de lechadas compuestas de diferentes composiciones de mezcla seca para producir muestras de cemento. Para cada lechada, se prepararon tres muestras y se las curó a 220 °F (104 °C) durante 7 días, y se realizó una prueba de resistencia a la compresión. Las lechadas se prepararon de acuerdo con la Tabla 3.

Tabla 3

	Cemento	Cenizas volantes	Material a evaluar
Diseño de concentración alta	31 %	44 %	25 %
Diseño de concentración baja	30 %	58 %	12 %

[0096] Los resultados se ajustaron a un modelo de resistencia a la compresión de las siguientes ecuaciones de resistencia a la compresión y reactividad:

$$CS = A \exp\left(-b \frac{w}{c_{eff}}\right)$$

$$c_{eff} = \sum \alpha_i c_i$$

Se usó una función resolutive para ajustar los resultados de la prueba y se descubrió que el valor de A era 19139 y el de B era 3,533. El error de previsión absoluto promedio resultó ser de 9 %.

EJEMPLO 2

[0097] Se prepararon lechadas de cemento y se las evaluó con los métodos del Ejemplo 1. Se evaluó cada uno de los materiales de la Tabla 4 con el método del Ejemplo 1 para determinar su reactividad. Los valores optimizados de α_i obtenidos con el método del Ejemplo 1 se ilustran en la Tabla 4.

Tabla 4

Material	α_i
Vidrio natural 1	1,4
Vidrio natural 2	2,21
Vidrio natural 3	1,27
Vidrio natural 4	1,2
Vidrio natural 5	0,93
Vidrio natural 6	0,82
Vidrio natural 7	0
Escoria de vidrio de alto horno	0,65
Cenizas volantes 1	1,13

[0098] Los materiales en la Tabla 4 se caracterizaron con los métodos analíticos descritos anteriormente. Se realizó el modelo multilíneal de la ecuación 2, así como una regresión multilíneal, sobre los resultados. En función del análisis de regresión multilíneal, las constantes de la ecuación 2 se obtuvieron como $a = 2,527$, $b = -1,582$, $c = -0,01553$, $d = 0,06003$ y $f = 0,07112$. Se graficó la reactividad real en comparación con la reactividad prevista en un gráfico de paridad de la Figura 3. Se puede observar que el modelo de reactividad guarda una similitud cercana con la reactividad real, con $P = 0,004$, $R^2 = 0,99$ y la raíz del error cuadrático medio = 0,0859.

[0099] Ahora se describirán con mayor detalle ejemplos de los métodos de uso de la técnica de mapeo de reactividad con referencia a la Figura 5. Se ilustra un sistema 600 para analizar el componente de cemento. El sistema 600 puede incluir una muestra de componente de cemento 405, un instrumento analítico 610 y un sistema informático 415. La muestra de componente de cemento 405 puede ser cualquier componente de cemento de interés. Los componentes de cemento como se describieron anteriormente pueden categorizarse por lo general como solubles en álcali. La muestra de componente de cemento puede colocarse en el instrumento analítico 610 o alimentarse a este. En algunos ejemplos, el instrumento analítico 610 puede configurarse para alimentar automáticamente la muestra de componente de cemento 405 al instrumento analítico 610. El instrumento analítico 610 puede configurarse para analizar las propiedades fisicoquímicas de la muestra de componente de cemento 405. Como se describió anteriormente, las propiedades

fisicoquímicas pueden incluir, entre otras, morfología, composición química, requisito de agua y otras. Los datos generados por el instrumento analítico 610 pueden enviarse al sistema informático 415 para su procesamiento. El sistema informático 415 puede incluir un procesador, memoria, almacenamiento interno, medios de salida y entrada, medios de conectividad de red y/u otros componentes comunes de los sistemas informáticos. El sistema informático 415 puede tomar los datos del instrumento analítico 610 como entrada y almacenarlos en el almacenamiento para un procesamiento posterior. El procesamiento de los datos puede incluir ingresar los datos en algoritmos que calculan un resultado. El procesamiento de los datos también puede incluir organizar los datos y mapear los datos como se describió anteriormente. En particular, el sistema informático puede incluir algoritmos configurados para procesar los datos para generar un modelo predictivo del comportamiento fisicoquímico de la muestra de componente de cemento 405. Los modelos predictivos pueden almacenarse en una base de datos de modelo predictivo 420 que puede almacenarse localmente o en una red. La base de datos de modelo predictivo 420 puede incluir todos los modelos predictivos anteriores generados por los algoritmos, así como los mapas de los datos generados y los datos sin procesar.

[00100] Con respecto a la Figura 5, se ilustra un sistema 600 para generar composiciones de cemento. El sistema 600 puede incluir una base de datos de modelo predictivo 420 y un sistema informático 610. En algunos ejemplos, el sistema informático 610 puede ser el mismo sistema informático 415 de la Figura 5. Una entrada de usuario 420 puede definir parámetros de ingeniería tales como la resistencia a la compresión requerida de una lechada de cemento, temperatura estática del orificio inferior del pozo, propiedades reológicas requeridas de la lechada, tiempo de espesamiento de la lechada, materiales de cemento, aditivos de cemento, fluido libre, permeabilidad, presión de poro, gradiente de fractura, peso del lodo, densidad, resistencia a ácidos, tolerancia a la sal y otros parámetros. El sistema informático 610 puede configurarse para ingresar una entrada de usuario 420 y los modelos predictivos, mapas y datos almacenados en la base de datos de modelo predictivo 420 en un algoritmo de cemento predictivo. El algoritmo de cemento predictivo puede generar una composición o composiciones de cemento que cumplen con los requisitos de ingeniería definidos por la entrada de usuario 420. La salida 630 del algoritmo de cemento predictivo puede contener las cantidades relativas de cada componente de cemento en la composición de cemento generada, así como las propiedades de material previstas de la composición de cemento.

[00101] Por ejemplo, si un usuario selecciona cemento Portland, cenizas volantes y vidrio natural como los materiales de cemento disponibles, el sistema informático puede consultar la base de datos de modelo predictivo 420 en busca de los modelos, mapas y datos requeridos, correspondientes a los materiales de cemento. Como se describió anteriormente, puede haber muchos parámetros diferentes, tales como tamaño de partícula, fuente regional del material de cemento, entre otros, que pueden determinar qué conjunto de datos puede recuperarse de la base de datos de modelo predictivo 420. El algoritmo de cemento predictivo puede configurarse para mejorar la lechada de cemento de salida en función de uno o más parámetros, tales como la cantidad total de componentes, la resistencia a la compresión o cualquier otro parámetro seleccionado. En algunos ejemplos, el algoritmo de cemento predictivo puede optimizarse en dos o más variables. En este contexto, optimizar no debe entenderse como alcanzar el mejor resultado, sino que el algoritmo de cemento puede configurarse para que se repita en una o más variables. La salida del algoritmo en este ejemplo puede ser, por ejemplo, 30 % de Portland en peso, 30 % de vidrio natural en peso, 20 % de cenizas volantes y 20 % de cal, con 120 % de exceso en peso de agua. La lechada generada puede ajustarse, dentro de un margen de error, a los parámetros de ingeniería proporcionados por la entrada de usuario 420. La lechada generada puede agregarse a la base de datos de modelo predictivo 420 para su uso en cálculos futuros.

[00102] Como se analizó anteriormente, los componentes de cemento pueden tener efectos secundarios tales como gelificación, propiedades de dispersión, generación de calor y otros efectos secundarios mencionados anteriormente, además del efecto primario de ser cementosos cuando se los incluye en una composición de cemento. Los efectos secundarios también pueden ser beneficiosos. Por ejemplo, si una composición de cemento requiere un agente espesante, en lugar de usar un aditivo separado para espesar la composición de cemento, se puede usar un componente de cemento que se gelifique en lugar de otro aditivo. También se pueden aprovechar otros efectos secundarios de manera similar. El algoritmo de cemento predictivo puede calcular los efectos secundarios de cada componente en la lechada de cemento y ajustar las cantidades relativas de cada componente para garantizar la obtención de los parámetros diana. La entrada de usuario 420 puede especificar, por ejemplo, un requisito de agua libre relativamente mayor para la lechada de cemento. El algoritmo de cemento predictivo puede elegir incluir un componente de cemento que requiera menos agua en función de los mapas y los datos para garantizar el

cumplimiento del requisito de agua libre especificado por la entrada de usuario 420.

[00103] Ahora se hará referencia a la Figura 6, que ilustra el uso de una composición de cemento 600. La composición de cemento 600 puede incluir cualquiera de los componentes descritos en la presente. La composición de cemento 600 puede diseñarse, por ejemplo, mediante mapeo de reactividad como se describe en la presente. Con respecto a la Figura 6, la composición de cemento 600 puede colocarse en una formación subterránea 605 de acuerdo con sistemas, métodos y composiciones de cemento de ejemplo. Como se ilustra, se puede perforar un pozo 610 en la formación subterránea 605. Si bien el pozo 610 se muestra como extendido generalmente de manera vertical en la formación subterránea 605, los principios descritos en la presente también se pueden aplicar a pozos que se extienden en un ángulo a través de la formación subterránea 605, tales como pozos horizontales e inclinados. Como se ilustra, el pozo 610 incluye las paredes 615. En la ilustración, se ha insertado una tubería de revestimiento de superficie 620 en el pozo 610. La tubería de revestimiento de superficie 620 se puede cementar a las paredes 615 del pozo 610 mediante una vaina de cemento 625. En la ilustración, uno o más conductos adicionales (por ejemplo, una tubería de revestimiento intermedia, tuberías de revestimiento cortas, etc.) mostrados aquí como la tubería de revestimiento 630 también se pueden disponer en el pozo 610. Como se ilustra, hay un anillo de pozo 635 formado entre la tubería de revestimiento 630 y las paredes 615 del pozo 610 y/o la tubería de revestimiento de superficie 620. Se pueden unir uno o más centralizadores 640 al revestimiento 630, por ejemplo, para centralizar el revestimiento 630 en el pozo 610 antes de y durante la operación de cementación.

[00104] Aún con respecto a la Figura 6, la composición de cemento 600 se puede bombear hacia el interior de la tubería de revestimiento 630. Se puede permitir que la composición de cemento 600 fluya hacia abajo por el interior de la tubería de revestimiento 630 a través de la zapata de revestimiento 645 en la parte inferior de la tubería de revestimiento 630 y hacia arriba alrededor de la tubería de revestimiento 630 en el anillo de pozo 635. Se puede permitir que la composición de cemento 600 se fragüe en el anillo de pozo 635, por ejemplo, para formar una vaina de cemento que soporte y posicione el revestimiento 630 en el pozo 610. Si bien no se las ilustra, también se pueden utilizar otras técnicas para la introducción de la composición de cemento 600. A modo de ejemplo, se pueden usar técnicas de circulación inversa que incluyen la introducción de la composición de cemento 600 en la formación subterránea 605 a través del anillo de pozo 635 en lugar de a través de la tubería de

revestimiento 630. A medida que se introduce, la composición de cemento 600 puede desplazar otros fluidos 550, tales como fluidos de perforación y/o fluidos espaciadores, que pueden estar presentes en la tubería de revestimiento 630 y/o el anillo de pozo 635. Si bien no se ilustra, al menos una porción de los fluidos desplazados 550 puede salir del anillo de pozo 635 a través de una línea de flujo y depositarse, por ejemplo, en uno o más pozos de retención. Se puede introducir un tapón inferior 355 en el pozo 610 antes de la composición de cemento 600, por ejemplo, para separar la composición de cemento 600 de los fluidos 550 que puedan estar dentro de la tubería de revestimiento 630 antes de la cementación. Después de que el tapón inferior 655 alcanza el collar de acoplamiento 680, se debe romper un diafragma u otro dispositivo adecuado para permitir que la composición de cemento 600 pase a través del tapón inferior 655. El tapón inferior 655 se muestra en el collar de acoplamiento 680. En la ilustración, se puede introducir un tapón superior 660 en el pozo 610 detrás de la composición de cemento 600. El tapón superior 360 puede separar la composición de cemento 600 de un fluido de desplazamiento 665 y también empujar la composición de cemento 600 a través del tapón inferior 655.

[00105] La Figura 7 ilustra en general un ejemplo de un sistema de tratamiento de información 700 que puede incluir cualquier medio o combinación de medios operables para calcular, estimar, clasificar, procesar, transmitir, recibir, recuperar, originar, cambiar, almacenar, visualizar, manifestar, detectar, registrar, reproducir, tratar o utilizar cualquier formato de información, inteligencia o datos con fines comerciales, científicos, de control u otros. Por ejemplo, un sistema de tratamiento de información 700 puede ser una computadora persona, un dispositivo de almacenamiento en red o cualquier otro dispositivo adecuado y puede variar en tamaño, forma, rendimiento, funcionalidad y precio. En algunos ejemplos, el sistema de tratamiento de información 700 puede denominarse supercomputadora o supercomputadora gráfica.

[00106] Como se ilustra, el sistema de tratamiento de información 700 puede incluir una o más unidades centrales de procesamiento (CPU) o procesadores 702. El sistema de tratamiento de información 700 también puede incluir una memoria de acceso aleatorio (RAM) 704 a la que pueden acceder los procesadores 702. Debe observarse que el sistema de tratamiento de información 700 puede incluir además lógica de *hardware* o *software*, ROM y/o cualquier otro tipo de memoria no volátil. El sistema de tratamiento de información 700 puede incluir uno o más módulos gráficos 706 que pueden acceder a la RAM 704. Los módulos gráficos 706 pueden ejecutar las

funciones realizadas por un módulo de procesamiento de gráficos (no ilustrado), mediante el uso de *hardware* (tal como procesadores de gráficos especializados) o una combinación de *hardware* y *software*. Un dispositivo de entrada de usuario 708 puede permitirle a un usuario controlar e ingresar información en el sistema de tratamiento de información 700. Los componentes adicionales del sistema de tratamiento de información 700 pueden incluir una o más unidades de disco, dispositivos de salida 712, tales como un monitor, y uno o más puertos de red para la comunicación con dispositivos externos, así como un dispositivo de entrada de usuario 708 (por ejemplo, teclado, mouse, etc.). El sistema de tratamiento de información 700 también puede incluir uno o más buses operables para transmitir comunicaciones entre los diversos componentes de *hardware*.

[00107] Alternativamente, los sistemas y métodos de la presente divulgación pueden implementarse, al menos en parte, con medios legibles por computadora no transitorios. Los medios legibles por computadora no transitorios pueden incluir cualquier medio o combinación de medios que pueda retener datos y/o instrucciones durante un período de tiempo. El medio legible por computadora puede incluir, por ejemplo, el medio de almacenamiento 710, tal como un dispositivo de almacenamiento de acceso directo (por ejemplo, una unidad de disco duro o una unidad de disco flexible), un dispositivo de almacenamiento de acceso secuencial (por ejemplo, una unidad de disco de cinta), un disco compacto, CD-ROM, DVD, RAM, ROM, memoria de solo lectura programable y borrable eléctricamente (EEPROM) y/o memoria flash; así como medios de comunicación tales como cables, fibras ópticas, microondas, ondas de radio y otros portadores ópticos y/o electromagnéticos; y/o cualquier combinación de los anteriores.

[00108] La Figura 8 ilustra detalles adicionales del sistema de tratamiento de información 700. Por ejemplo, el sistema de tratamiento de información 700 puede incluir uno o más procesadores, tal como el procesador 800. El procesador 800 puede estar conectado a un bus de comunicación 802. Se describen diversas formas de realización de *software* en términos de este sistema informático de ejemplo. Tras la lectura de la descripción, será aparente para una persona del oficio de nivel medio la forma en que debe implementar las formas de realización de ejemplo mediante el uso de otros sistemas informáticos y/o arquitecturas informáticas.

[00109] El sistema de tratamiento de información 700 también puede incluir una memoria principal 804, preferentemente una memoria de acceso aleatorio (RAM), y también puede incluir una memoria secundaria 806. La memoria secundaria

806 puede incluir, por ejemplo, una unidad de disco duro 808 y/o una unidad de almacenamiento extraíble 810, que representan un disquete, una unidad de cinta magnética, una unidad de disco óptico, etc. La unidad de almacenamiento extraíble 810 puede leer y/o escribir en una unidad de almacenamiento extraíble 812 de cualquier manera adecuada. La unidad de almacenamiento extraíble 812 representa un disquete, una cinta magnética, un disco óptico, etc., la cual lee y en la cual escribe la unidad de almacenamiento extraíble 810. Como se apreciará, la unidad de almacenamiento extraíble 812 incluye un medio de almacenamiento utilizable por computadora que tiene almacenados datos y/o *software* de computadora.

[00110] En formas de realización alternativas, la memoria secundaria 806 puede incluir otras operaciones para permitir la carga de programas informáticos u otras instrucciones en el sistema de tratamiento de información 700. Por ejemplo, una unidad de almacenamiento extraíble 814 y una interfaz 816. Los ejemplos de tales elementos pueden incluir un cartucho de programa o una interfaz de cartucho (tal como la que se encuentra en dispositivos de videojuegos), un chip de memoria extraíble (tal como una EPROM o PROM) y una ranura asociada, y otras unidades de almacenamiento extraíbles 814 e interfaces 816 que pueden permitir la transferencia de *software* y datos de la unidad de almacenamiento extraíble 814 al sistema de tratamiento de información 700.

[00111] En algunos ejemplos, el sistema de tratamiento de información 700 también puede incluir una interfaz de comunicaciones 818. La interfaz de comunicaciones 818 puede permitir la transferencia de *software* y datos entre el sistema de tratamiento de información 700 y los dispositivos externos. Los ejemplos de interfaz de comunicaciones 818 pueden incluir un módem, una interfaz de red (tal como una tarjeta Ethernet), un puerto de comunicaciones, una ranura y tarjeta PCMCIA, etc. El *software* y los datos transferidos mediante la interfaz de comunicaciones 818 se encuentran en forma de señales 820 que pueden ser electrónicas, electromagnéticas, ópticas, u otras señales capaces de ser recibidas mediante la interfaz de comunicaciones 818. Se pueden proporcionar señales 820 a la interfaz de comunicaciones mediante un canal 822. El canal 822 transporta las señales 820 y puede implementarse mediante un cable o alambre, fibras ópticas, una línea telefónica, un enlace de teléfono celular, un enlace de RF y/o cualquier otro canal de comunicación adecuado. Por ejemplo, el sistema de tratamiento de información 700 incluye al menos una memoria 804 operable para almacenar instrucciones ejecutables por computadora, al menos una interfaz de comunicaciones 802, 818 para acceder a

la al menos una memoria 804; y al menos un procesador 800 configurado para acceder a la al menos una memoria 904 mediante la al menos una interfaz de comunicaciones 802, 818 y ejecutar las instrucciones ejecutables por computadora.

[00112] En este documento, las expresiones "medio de programa informático" y "medio utilizable por computadora" se usan para referirse en general a medios tales como la unidad de almacenamiento extraíble 812, un disco duro instalado en una unidad de disco duro 808 y las señales 820. Estos productos de programa informático pueden proporcionar *software* al sistema informático 700.

[00113] Se pueden almacenar programas informáticos (también denominados lógica de control informática) en la memoria principal 804 y/o la memoria secundaria 806. Los programas informáticos también pueden recibirse a través de la interfaz de comunicaciones 818. Dichos programas informáticos, cuando se los ejecuta, permiten que el sistema de tratamiento de información 700 realice las características de las formas de realización de ejemplo como se analizan en la presente. En particular, los programas informáticos, cuando se los ejecuta, permiten que el procesador 800 realice las características de las formas de realización de ejemplo. En consecuencia, tales programas informáticos representan controladores del sistema de tratamiento de información 700.

[00114] En ejemplos con implementación por *software*, el *software* puede almacenarse en un producto de programa informático y cargarse en el sistema de tratamiento de información 700 mediante el uso de una unidad de almacenamiento extraíble 810, una unidad de disco duro 808 o una interfaz de comunicaciones 818. La lógica de control (*software*), cuando la ejecuta el procesador 800, hace que el procesador 800 realice las funciones de las formas de realización de ejemplo descritas en la presente.

[00115] En ejemplos con implementación por *hardware*, los componentes de *hardware* pueden ser circuitos integrados de aplicación específica (ASIC). La implementación de tal máquina de estado de *hardware* para realizar las funciones descritas en la presente será evidente para las personas del oficio de nivel medio. Debe observarse que la divulgación puede implementarse al menos parcialmente tanto en *hardware* como en *software*.

[00116] Los métodos descritos en la presente pueden llevarse a cabo, al menos en parte, mediante el uso de un sistema informático que incluye un medio accesible por computadora, en donde el medio accesible por computadora contiene un programa informático que hace que un procesador ejecute instrucciones que realizan

al menos algunas de las etapas de método descritas en la presente. En general, un medio accesible por computadora puede incluir cualquier medio de almacenamiento tangible o no transitorio o medio de memoria, tal como un medio electrónico, magnético u óptico, por ejemplo, un disco o CD/DVD-ROM acoplado a la computadora. El término "tangible" y la expresión "no transitorio", como se usan en la presente, pretenden describir un medio de almacenamiento legible por computadora (o "memoria") que excluye las señales electromagnéticas de propagación, pero no pretenden limitar de otra manera el tipo de dispositivo de almacenamiento legible por computadora físico abarcado por la frase memoria o medio legible por computadora. Por ejemplo, las expresiones "medio legible por computadora no transitorio" o "memoria tangible" pretenden abarcar los tipos de dispositivos de almacenamiento que no necesariamente almacenan información de manera permanente, que incluyen, por ejemplo, memoria de acceso aleatorio (RAM), memoria flash, u otros tipos de memoria volátil. Los datos y las instrucciones de programa almacenados en un medio de almacenamiento accesible por computadora tangible en forma no transitoria pueden transmitirse además mediante medios o señales de transmisión tales como señales eléctricas, electromagnéticas o digitales, que pueden transportarse mediante un medio de comunicación tal como una red y/o un enlace inalámbrico.

[00117] Las composiciones de cemento y los métodos asociados divulgados pueden afectar directa o indirectamente cualquier sistema de bombeo, que incluyen de manera representativa cualesquier conductos, tuberías, camiones, tubulares y/o tubos que puedan acoplarse a la bomba y/o cualesquier sistemas de bombeo y que puedan usarse para transportar de manera fluida las composiciones de cemento hacia el fondo del pozo, cualesquier bombas, compresores o motores (por ejemplo, en la parte superior o en el fondo del pozo) usados para poner las composiciones de cemento en movimiento, cualesquier válvulas o juntas relacionadas usadas para regular la presión o la velocidad de flujo de las composiciones de cemento, y cualesquier sensores (es decir, de presión, temperatura, velocidad de flujo, etc.), calibradores y/o combinaciones de estos, y similares. Las composiciones de cemento también pueden afectar de manera directa o indirecta cualquier tolva de mezcla y pozo de retención y sus variaciones.

[00118] Debe entenderse que, si bien las composiciones y los métodos se describen en términos de "que comprenden", "que contienen" o "que incluyen" diversos componentes o etapas, las composiciones y los métodos también pueden "consistir esencialmente en" o "consistir en" los diversos componentes y etapas.

Además, el artículo indefinido "un" o "una", como se usa en las reivindicaciones, significa, según su definición en la presente, uno o más de uno de los elementos que introduce.

[00119] Por razones de brevedad, en la presente solo se divulgan explícitamente ciertos rangos. Sin embargo, los rangos desde cualquier límite inferior pueden combinarse con cualquier límite superior para mencionar un rango no mencionado explícitamente, y los rangos desde cualquier límite inferior pueden combinarse con cualquier otro límite inferior para mencionar un rango no mencionado explícitamente; de la misma manera, los rangos desde cualquier límite superior pueden combinarse con cualquier otro límite superior para mencionar un rango no mencionado explícitamente. Además, siempre que se divulga un rango numérico con un límite inferior y un límite superior, se divulga específicamente cualquier número y cualquier rango incluido que se encuentre dentro del rango. En particular, debe entenderse que cada rango de valores (de la forma "de alrededor de a a alrededor de b", o, de manera equivalente, "de aproximadamente a a b", o, de manera equivalente, "de aproximadamente a-b") divulgado en la presente establece cada número y rango abarcados dentro del rango más amplio de valores, incluso si no se mencionan explícitamente. Por lo tanto, cada punto o valor individual puede servir como su propio límite inferior o superior combinado con cualquier otro punto o valor individual o cualquier otro límite inferior o superior, para enumerar un rango no enumerado explícitamente.

[00120] Por tanto, la presente divulgación está adaptada para lograr los fines y las ventajas mencionados, así como aquellos que son inherentes a esta. Los ejemplos particulares divulgados anteriormente son solo ilustrativos, ya que la presente divulgación puede modificarse y ponerse en práctica de maneras diferentes pero equivalentes que son evidentes para las personas del oficio de nivel medio que tienen el beneficio de las enseñanzas de la presente. Si bien se analizan ejemplos individuales, la divulgación abarca todas las combinaciones de todos esos ejemplos. Además, no se pretende limitar los detalles de construcción o diseño mostrados en la presente, excepto de la manera descrita en las reivindicaciones a continuación. Además, los términos en las reivindicaciones tienen su significado común y habitual, a menos que el titular de la patente los defina explícita y claramente de otra forma. Por lo tanto, es evidente que los ejemplos ilustrativos particulares divulgados anteriormente pueden alterarse o modificarse y que todas tales variaciones se consideran dentro del alcance y espíritu de la presente divulgación. Si existiese

conflicto alguno en los usos de una palabra o un término en esta memoria descriptiva y una o más patentes u otros documentos que se pueden incorporar en la presente por referencia, deben adoptarse las definiciones que sean consistentes con esta memoria descriptiva.