

MÉTODO DE DISEÑO PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA LECHADA DE CEMENTO

ANTECEDENTES

[0001] En la cementación de pozos, así como en la construcción de pozos y cementación correctiva, se utilizan comúnmente composiciones de cemento. Las lechadas de cemento se pueden usar en una variedad de aplicaciones subterráneas. Por ejemplo, en la construcción de pozos subterráneos, una sarta de tubería (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 se denomina comúnmente "cementación primaria". En un método de cementación primario típico, se puede bombear una lechada 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 lechada de cemento puede endurecerse en el espacio anular, lo que forma una vaina anular de cemento endurecido sustancialmente impermeable (es decir, 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 tuberías a la formación subterránea. Entre otras cosas, la vaina de cemento que rodea la sarta de tubería funciona para evitar la migración de fluidos en el anillo, así como para proteger la sarta de tubería de la corrosión. Las lechadas de cemento se pueden usar en métodos de cementación correctivos, por ejemplo, para sellar grietas u orificios en sartas de tubería o vainas de cemento, para sellar zonas de formación altamente permeables o fracturas, para colocar un tapón de cemento, y similares.

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

aquellos de otra región, lo que complica adicionalmente el proceso de selección de una lechada 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 ilustra una prueba de resistencia a la compresión para una variedad de tipos de cemento de diferentes fabricantes y regiones.

[0005] La Figura 2 ilustra los resultados de una prueba de resistencia a la compresión.

[0006] La Figura 3 ilustra los resultados de una prueba de resistencia a la compresión.

[0007] La Figura 4 ilustra la energía de activación estimada con respecto a la energía de activación observada.

[0008] La Figura 5 ilustra una curva de desarrollo de resistencia a la compresión para una lechada de cemento Portland.

[0009] La Figura 6 ilustra un gráfico de resistencia a la compresión para un modelo de Weibull de resistencia a la compresión.

[0010] La Figura 7 ilustra la introducción de una lechada de cemento en un pozo.

[0011] La Figura 8 es una ilustración esquemática de un sistema de tratamiento de información de ejemplo.

[0012] La Figura 9 ilustra detalles adicionales de un sistema de tratamiento de información.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0013] La presente divulgación puede en general referirse a métodos y sistemas de cementación. Más particularmente, las formas de realización pueden estar dirigidas al diseño de lechadas de cementación al menos parcialmente en función del modelado de resistencia a la compresión.

[0014] Un tipo de cemento común usado en los pozos y cementación de superficie es el cemento Portland. El cemento Portland está disponible en varias clases y tipos que se proporcionan para guiar la selección de cementos. La Organización de Normas Internacionales ASTM ha designado cinco tipos de cemento Portland, denominados tipos I-V. La ASTM define cada clase en función de varios factores que incluyen, entre otros, la fineza o tamaño de partícula promedio y

composición química. El API (Instituto Estadounidense del Petróleo) publica estándares para el cemento Portland en la especificación 10A, que enumera las clases de cemento Portland como clase A, clase B, clase C, clase G, y clase H. Una primera etapa en el diseño de lechada de cemento puede ser seleccionar el tipo de cemento Portland, ya sea de acuerdo con las clases de API y tipos de ASTM, para incluir en la lechada de cemento. Mientras que la clase o tipo de cemento de Portland puede indicar a una persona del oficio de nivel medio algunas propiedades del cemento Portland, la amplia variedad de disponibilidad de cementos Portland y la distribución y características de rendimiento de estos hacen que la clase o tipo no sea un indicador adecuado de rendimiento real. Como se ilustrará en la presente, la variabilidad regional y del fabricante en cemento Portland puede hacer que la selección en función del tipo o clase sea una medida inexacta de rendimiento real. Esto puede generar que se desarrollen y prueben una gran cantidad de diseños de lechada antes de encontrar una lechada adecuada para una aplicación particular.

[0015] En la presente se proporcionan métodos que pueden incluir el diseño de lechadas de cemento, a menudo referidas en la presente como lechadas de cemento, con un modelo de resistencia a la compresión de cemento Portland. El modelo de resistencia a la compresión puede incluir dependencias de tiempo y temperatura de resistencia a la compresión y puede ser aplicable a las lechadas de cemento únicamente con cemento Portland, también denominado un diseño de cemento Portland puro, así como a lechadas de cemento con contenido de cemento Portland reducido, tales como aquellas lechadas que incluyen otros componentes cementosos además del cemento Portland. Estos métodos permiten que las personas del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, diseñen lechadas de cemento que contienen cemento Portland con una cantidad reducida de iteraciones para alcanzar la lechada de cemento con las propiedades mecánicas requeridas para una aplicación particular. Los métodos presentados en la presente pueden ser ventajosos en comparación con los procesos de diseño de lechada de cemento de prueba y error tradicionales dado que la metodología de prueba y error, si bien suele ser eficaz para encontrar una lechada de cemento viable, puede ser ineficaz y requerir tiempo y puede dar como resultado una lechada de cemento con ciertas características no deseadas. Algunas características no deseadas pueden incluir la cantidad de componentes en la lechada de cemento, concentraciones de componentes en la lechada de cemento, resistencia a la compresión excesiva por sobre los requerimientos de ingeniería, complejidad de la lechada de cemento, y otras

reconocidas rápidamente por las personas del oficio de nivel medio. Los usos adicionales de los métodos y sistemas descritos en la presente pueden estar en la automatización de diseño de lechada de cemento de pozos.

[0016] La Figura 1 ilustra una prueba de resistencia a la compresión para una variedad de tipos de cemento de diferentes fabricantes y regiones, que incluye cemento Portland clase A, cemento Portland clase C, cemento Portland clase G, cemento Portland clase H, cemento de baja densidad, cemento Portland tipo I/II, cemento Portland tipo II/V, y cemento Portland tipo III. En la Figura 1, el eje horizontal es el tipo de cemento, el eje vertical es la resistencia a la compresión en PSI y cada punto en una línea horizontal representa una lechada preparada con el tipo de cemento indicado en el eje horizontal de diferentes fabricantes. Las lechadas de cemento se prepararon y curaron a 140 °F (60 °C) durante 7 días y se sometieron a prueba de resistencia a la compresión no confinada. A partir de la Figura 1, puede observarse que no existe correlación entre la resistencia a la compresión que desarrolla una lechada de cemento Portland puro y la clase/tipo de cemento Portland usado para preparar la lechada.

[0017] La resistencia a la compresión de una lechada de cemento puede correlacionarse con una relación masa de agua con respecto a masa de material cementoso (w/c). En general, dos lechadas de cementación de prueba con cantidades iguales de agua pueden exhibir resistencias a la compresión finales diferentes. Una lechada de cemento preparada con relativamente más agua o una mayor relación de w/c puede tener una resistencia a la compresión final menor con respecto a la lechada de cemento preparada con relativamente menos agua o una relación de w/c menor. La relación entre resistencia a la compresión y relación de w/c puede describirse mediante la ley de Abrams en la ecuación 1. De manera alternativa, la ecuación 1 puede reescribirse en forma de logaritmo como en la ecuación 2, por ejemplo. Las constantes A y B pueden variar en función de la identidad del material cementoso. Las constantes para cenizas volantes pueden no ser idénticas a las constantes asociadas con el cemento Portland. Además, las constantes A y B también pueden variar en función de la fuente del material cementoso dado que los procesos del fabricante individual pueden dar como resultado variaciones en la composición mineral de materiales cementosos. Para materiales de origen natural o mineral tales como vidrios naturales, la variabilidad regional puede generarse a partir de diferentes minas o recursos naturales de los materiales.

[0018] La ecuación 1 puede usarse para estimar resistencias a la compresión

de lechadas de cemento Portland, así como cementos que no comprenden cemento Portland. Las ecuaciones 1 y 2 también pueden usarse para cementos tales como cementos puzolánicos, cementos de aluminato, cementos de geopolímero, y otros. Las ecuaciones 1 y 2 también pueden usarse para mezclas de materiales cementosos, tales como Portland y un segundo material cementoso, si se conocen la interacción entre las constantes A y B para cemento Portland y las constantes A y B para el segundo material cementoso.

$$CS = \frac{A}{B^{1.5} \left(\frac{w}{c}\right)} \quad (1)$$

$$\ln(CS) = \ln(A) - 1,5 * \ln(B) * \frac{w}{c} \quad (2)$$

[0019] Para demostrar la variabilidad entre diferentes fuentes de materiales cementados y para probar la viabilidad de la ecuación 1 para materiales cementosos, se realizaron una serie de pruebas de resistencia a la compresión mediante el uso de materiales cementosos de diferentes fabricantes. Las lechadas de cemento se prepararon con 11 materiales cementosos diferentes y cantidades variables de relaciones de agua con respecto a cemento. Cada una de las lechadas incluyeron solo un material cementoso y agua. Las relaciones de agua con respecto a cemento variaron entre 0,5 y 1,5. Cada una de las lechadas se curó a 140 °F (60 °C) durante 7 días. Se realizó una prueba de resistencia a la compresión en cada una de las lechadas de cemento curadas, cuyos resultados se ilustran en la Figura 2. Los resultados de la prueba de compresión en la Figura 2 indican que la relación de logaritmo lineal entre la resistencia a la compresión y la relación de w/c parece mantenerse para los valores probados de w/c de 0,5 a 1,5. Puede concluirse que la resistencia a la compresión está exponencialmente relacionada a la relación de masa de agua con respecto a material cementoso.

[0020] Se realizó un segundo conjunto de pruebas de resistencia a la compresión mediante el uso de mezclas de materiales cementosos y agua. Las mezclas de materiales cementosos se prepararon al seleccionar materiales cementosos a partir del grupo de cenizas volantes, humo de sílice y polvo de horno de cemento de cemento Portland en relaciones de peso variadas. Las lechadas se prepararon con cada una de las mezclas de materiales cementosos. Las relaciones de agua con respecto a cemento variaron entre 0,5 y 1,5 en material cementoso y agua. Cada una de las lechadas se curó a 140 °F (60 °C) durante 7 días. Se realizó una prueba de resistencia a la compresión en cada una de las lechadas de cemento curadas, cuyos resultados se ilustran en la Figura 3. Los resultados de la prueba de

compresión en la Figura 3 indican que la relación de logaritmo lineal entre la resistencia a la compresión y la relación de w/c parece mantenerse para mezclas de materiales cementosos probados en valores de w/c de 0,5 a 1,5. Puede concluirse que la resistencia a la compresión también está exponencialmente relacionada a la relación de masa de agua con respecto a material cementoso para mezclas de materiales cementosos.

[0021] El comportamiento de la ley de potencia de las relaciones de agua con respecto a cemento sobre la resistencia a la compresión puede estimarse mediante una ecuación exponencial. La ecuación 3 es un modelo que estima el comportamiento de la lechada de cemento como una función de CS_0 , w/c, y una constante n. La ecuación 3 puede predecir la resistencia a la compresión final de la lechada de cemento. De manera alternativa, la ecuación 3 puede reescribirse como la ecuación 4. CS_0 es la resistencia a la compresión obtenida cuando se mezclan agua y cemento en proporciones de masa iguales (w/c = 1) y n es la función de diversos factores tales como, incluso, entre otros, tiempo de curado, temperatura de curado, mezcla de lechada de cemento seco, y otros factores. A partir de los resultados puede observarse que el valor de n puede estar en el orden de alrededor de -2,5 para diversos sistemas cementosos. El cemento en la relación de agua con respecto a cemento es cualquier material cementoso tal como cenizas volantes, polvo de horno de cemento, cemento Portland, vidrio natural, y otros materiales cementosos que pueden estar presentes en la lechada de cemento. La relación de agua con respecto a cemento w/c también puede calcularse a partir de la densidad de la lechada (ρ_s), la densidad de la mezcla seca (ρ_D), y la densidad del agua (ρ_w) como se muestra en la ecuación 5.

$$CS = CS_0 \left(\frac{w}{c} \right)^n \quad (3)$$

$$\ln \left(\frac{CS}{CS_0} \right) = n * \ln \left(\frac{w}{c} \right) \quad (4)$$

$$\frac{w}{c} = \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho_w} - \frac{\rho_D}{\rho_s}} \quad (5)$$

[0022] Las ecuaciones 2 y 5 pueden combinarse para formar la ecuación 6 y las ecuaciones 5 y 4 pueden combinarse para formar la ecuación 7. Las ecuaciones 6 y 7 pueden usarse para predecir la resistencia a la compresión para cualquier valor conocido de A y B.

$$\ln(CS) = \ln(A) - 1,5 * \ln(B) * \frac{1 - \frac{\rho_s}{\rho_D}}{\frac{\rho_s}{\rho_W} - 1} \quad (6)$$

$$\ln\left(\frac{CS}{CS_0}\right) = n * \ln\left(\frac{1 - \frac{\rho_s}{\rho_D}}{\frac{\rho_s}{\rho_W} - 1}\right) \quad (7)$$

[0023] Una correlación generalizada para la resistencia a la compresión de 7 días, también conocida como resistencia a la compresión final, puede escribirse como en la pregunta 8.

$$CS(\text{Día } 7) = f(WR, SG, \text{tamaño de partícula}, BET, SSA, C_2S, C_3S, C_4AF, C_3A, CaSO_4, \text{yeso}) \quad (8)$$

En la ecuación 8, CS(día 7) es la resistencia a la compresión de la lechada de cemento de 7 días, WR es el requerimiento de agua de los componentes de cemento en la lechada de cemento, SG es la gravedad específica de los componentes de cemento en la lechada de cemento, el tamaño de partícula es el tamaño de partícula de los componentes de cemento en la lechada de cemento, BET es el área superficial de Brunauer-Emmet-Teller de los componentes de cemento en la lechada de cemento, SSA es el área superficial de los componentes de cemento en la lechada de cemento, C₂S es la concentración de silicato de dicalcio de los componentes de cemento en la lechada de cemento, C₃S es la concentración de silicato de tricalcio de los componentes de cemento en la lechada de cemento, C₄AF es la concentración de aluminoferrita de tetracalcio de los componentes de cemento en la lechada de cemento, C₃A es la concentración de aluminato de tricalcio de los componentes de cemento en la lechada de cemento, CaSO₄ es la concentración de sulfato de calcio de los componentes de cemento en la lechada de cemento, y yeso es la concentración de yeso en los componentes de cemento en la lechada de cemento. Usar la ecuación 8 con la ecuación 3 permite predecir la resistencia de 7 días de cualquier lechada de cemento Portland puro. La Figura 3 es un gráfico que ilustra la resistencia a la compresión de 7 días estimada con respecto a la observada para lechadas de cemento Portland puro.

[0024] La hidratación de cemento Portland libera energía como calor. El calor liberado puede aumentar la temperatura de la lechada de cemento Portland que a su vez puede acelerar las reacciones de hidratación en la lechada de cemento Portland. Se realizó un estudio para caracterizar los efectos calorimétricos de la hidratación del cemento entre cementos de varias fabricaciones. La Tabla 1 ilustra los resultados del análisis fisicoquímico realizado en los cementos probados.

Tabla 1

Tipo de cemento	Clase A	Clase C	Clase G	Clase H (1)	Clase H (2)	Clase H (3)	Tipo I	Tipo III
C3S	55,3	70,47	48,02	47,11	45,66	59,66	59,5	16,69
C2S	17,49	3,41	26,03	27,18	28,6	18,2	13,07	23,39
C34AF	8,54	11,13	17,56	17,67	17,44	14,16	10,51	3,83
C3A	10,02	5,93	2,29	0	0	0,41	6,8	12,74
yeso	5,22	5,63	3,98	4,63	4,7	4,94	5,71	5,88
área superficial (cm ² /g)	280	418	329	254	285	303	391	548

La energía de activación de cada uno de los cementos Portland en la Tabla 1 se obtuvo a partir de datos de calorimetría. Los resultados de las pruebas de calorimetría se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Tipo de cemento	Energía de activación (J/mol)
Clase A	41163
Clase C	40493
Clase G	36333
Clase H (1)	36505
Clase H (2)	38811
Clase H (3)	41987
Tipo I	41430
Tipo III	43599

Los datos de la Tabla 1 y 2 se ajustaron a una curva y se desarrolló una expresión en relación a la energía de activación con respecto a las características del material. La ecuación 9 muestra los resultados del ajuste a la curva.

$$E_a = 58476 - 1168 * C_4AF(\%) - 777 * C_3A(\%) \quad (9)$$

Más generalmente, la energía de activación puede expresarse como la ecuación 10.

$$E_a = f(\text{tamaño de partícula, BET, SSA, } C_2S, C_3S, C_4AF, C_3A, CaSO_4, \text{ yeso}) \quad (10)$$

La Figura 4 ilustra la energía de activación estimada de la ecuación 9 con respecto a la energía de activación observada.

[0025] En general, las lechadas de cemento Portland no forman resistencia a la compresión de manera lineal. La Figura 5 ilustra una curva de desarrollo de resistencia a la compresión típica para una lechada de cemento Portland. En general, existen tres zonas en el desarrollo temporal de la resistencia a la compresión. En la Figura 5, la zona inicial 505, también denominada zona de inducción, es donde la resistencia a la compresión se genera mínimamente. El tiempo de inducción puede ser una función de formulación y densidad. La zona rápida 510 es donde ocurre el desarrollo de

resistencia rápido inicial. La zona de largo plazo 515 es donde ocurre el desarrollo de resistencia lento de largo plazo. El comportamiento de la resistencia a la compresión en la zona rápida 510 y la zona de largo plazo 515 puede describirse mediante la función de Weibull en la ecuación 11.

$$\frac{CS}{CS_u} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\kappa\right) \quad (11)$$

En la ecuación 11, CS es la resistencia a la compresión de la lechada de cemento, Cu es la resistencia a la compresión final, t es el tiempo transcurrido, λ es el parámetro de escala de la función de Weibull, y κ es el parámetro de forma de la función de Weibull. La Figura 6 ilustra los resultados de la aplicación de dos funciones de Weibull en series para tres lechadas de cemento y la normalización de la resistencia de 7 días. Los tiempos de inducción y parámetros de Weibull se enumeran en la Tabla 13. Los parámetros de Weibull en la Tabla 13 pueden ser diferentes para cementos de diferentes fabricantes y regiones. Una persona del oficio de nivel medio con el beneficio de esta divulgación debería poder encontrar los parámetros de Weibull para cualquier cemento.

Tabla 13.

	K ₁	λ_1^0 (hs)	K ₂	λ_2^0 (hs)	tind (hs)
Clase H	5,63	3,91	393	17,9	2,2
Clase G	2,11	8361	0,77	18,19	1,7
Tipo I/II	5,35	4,45	1,34	8,45	2,45

[0026] En algunos ejemplos, más de una función de Weibull se puede usar para describir el desarrollo de resistencia a la compresión. Por ejemplo, dos, tres, o más funciones de Weibull en series pueden usarse para describir el desarrollo de la resistencia a la compresión de lechadas de cemento Portland. La ecuación 11 también puede modificarse para tener en cuenta la dependencia de temperatura del desarrollo de resistencia a la compresión en la ecuación 12. En la ecuación 12, λ_0 es el parámetro de escala inicial y $\lambda(T)$ es el parámetro de escala dependiente de la temperatura representado en la ecuación 13. E_a es la energía de activación que puede resolverse al usar las ecuaciones 9 y 10, R es la constante de gas, T_{ref} es una temperatura de referencia, y T es la temperatura.

$$\frac{CS}{CS_u} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\lambda_0 \lambda(T)}\right)^\kappa\right) \quad (12)$$

$$\lambda(T) = \exp\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (13)$$

[0027] Las ecuaciones 3, 8, 10, 11, 12, y 13 así como los parámetros en la Tabla 3, permite que se estime el desarrollo de resistencia a la compresión para cualquier lechada de cemento Portland puro como una función de tiempo y temperatura. La ecuación 14 es una combinación de las ecuaciones descritas previamente que pueden usarse para predecir el desarrollo de resistencia a la compresión de una lechada de cemento Portland como una función de tiempo y temperatura.

$$CS = CS_0 \left(\frac{w}{c_0} \right)^n * \begin{cases} \left(1 - \exp \left(\frac{t-t_{ind}}{\lambda_1^0 \lambda(T)} \right)^{K_1} \right) & 0 < t < t_1 \\ \left(1 - \exp \left(\frac{t-t_{ind}}{\lambda_2^0 \lambda(T)} \right)^{K_2} \right) & t_1 \leq t < t_2 \\ \vdots & \end{cases} \quad (14)$$

En la ecuación 14, CS_0 es una función del cemento Portland usado que puede calcularse a partir de la ecuación 8, w es la fracción de masa de agua, C_0 es la fracción de masa de cemento Portland, n es una constante que puede tener un valor de alrededor de -2,5, t es tiempo, t_{ind} es el tiempo de inducción, K_1 y K_2 son el parámetro de forma y la constante de velocidad, λ^0_1 y λ^0_2 son el parámetro de escala o parámetro de escala temporal, y $\lambda(T)$ es el factor de corrección de escala temporal para la dependencia de temperatura calculada mediante la ecuación 13 y la energía de activación de la ecuación 10. Las ecuaciones anteriores pueden extenderse durante cualquier intervalo de tiempo.

[0028] Aunque solo se ilustran algunos modelos de resistencia a la compresión en la presente, una persona del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, debería poder derivar otras formas de las ecuaciones descritas en la presente sin desviarse de esta divulgación. Además, las técnicas y ecuaciones descritas en la presente pueden aplicarse también a lechadas de cemento modelo que contienen cemento Portland reducido, tales como aquellas lechadas que contienen otros componentes cementosos además de cemento Portland.

[0029] Un método para diseñar una lechada de cemento puede incluir obtener muestras de materiales cementosos que pueden incluirse en una lechada de cemento y caracterizar de forma fisicoquímica los materiales cementosos para determinar una composición mineral, un área superficial, un área superficial específica, un tamaño de partícula, y otros conocidos en el estado de la técnica. La temperatura y presión de fondo de pozo puede proporcionarse mediante registros de pozo producidos mediante mediciones tomadas durante la perforación o mediante técnicas de registro de orificio abierto. Los registros de pozo proporcionan datos a partir de los que pueden derivarse

los requerimientos de resistencia a la compresión, así como efectos de tiempo y temperatura en el desarrollo de resistencia a la compresión de una lechada de cemento. Una fórmula de cemento puede incluir la identidad y cantidades de los componentes para crear la lechada de cemento. Para una fórmula de cemento, la resistencia final puede predecirse mediante la ecuación 8 y la ecuación 3 y la energía de activación puede predecirse mediante las ecuaciones 9 y 10. Los parámetros de Weibull pueden determinarse para cada uno de los componentes de la fórmula de lechada de cemento si no se conocen anteriormente, el desarrollo de resistencia a la compresión dependiente del tiempo puede estimarse al usar las ecuaciones 12 y 13. Se puede generar un modelo a partir de la fórmula de cemento y el modelo analizado. Luego, la lechada de cemento puede prepararse de acuerdo con la fórmula si la etapa de análisis del modelo cumple con el parámetro. Los resultados de cada uno de los cálculos pueden ingresarse en la ecuación 14 y el desarrollo de resistencia a la compresión puede estimarse a partir de la densidad, temperatura, y tiempo. Si el desarrollo de resistencia a la compresión cumple con o excede los requerimientos previamente derivados, la lechada de cemento puede prepararse y probarse para verificar que la fórmula de cemento cumpla con todos los requerimientos. Si la fórmula de cemento no cumple con los requerimientos derivados, la lechada puede ajustarse, por ejemplo, al aumentar la densidad mediante el aumento de la fracción de masa de agua o al incluir retardadores de fraguado de cemento o aceleradores de fraguado de cemento. Luego, la lechada ajustada puede prepararse y probarse para determinar si la lechada ajustada cumple con todos los requerimientos. Si la lechada de cemento cumple con los requerimientos, la lechada de cemento puede seleccionarse para prepararse y bombearse en la formación subterránea.

[0030] Las lechadas de cemento descritas en la presente pueden incluir agua y al menos un componente de cemento. Las lechadas de cemento pueden tener una densidad adecuada para una aplicación particular. Las lechadas de cemento pueden tener cualquier densidad adecuada, que incluye, entre otras, en el rango de alrededor de 8 libras por galón ("ppg") (959 kg/m^3) a alrededor de 20 ppg (2397 kg/m^3). El agua usada en las lechadas 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 en la lechada de cemento. El agua puede

incluirse en una cantidad suficiente para formar una lechada bombeable. El agua puede incluirse en las lechadas de cemento en cualquier rango adecuado, incluso, entre otros, en el rango de alrededor de 40 % a alrededor de 200 % en peso del componente o componentes de cemento ("bwoc"). En peso de cemento se refiere al peso total de todos los componentes de cemento incluidos en la lechada de cemento. En algunos ejemplos, el agua puede incluirse en una cantidad en el rango de alrededor de 40 % a alrededor de 150 % bwoc.

[0031] La lechada de cemento puede incluir un cemento hidráulico. Se puede utilizar una variedad de cementos hidráulicos de acuerdo con la presente divulgación, incluso, entre otros, aquellos que incluyen 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 aluminato de calcio, entre otros. Los cementos Portland pueden clasificarse como cementos 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, 5.^a ed., 1 de julio de 1990. Además, en algunos ejemplos, los cementos adecuados para su uso pueden clasificarse como ASTM Tipo I, II o III. Cuando se encuentra presente, el cemento hidráulico puede en general incluirse en las lechadas de cemento en una cantidad suficiente para proporcionar la resistencia a la compresión y/o densidad deseada. El cemento hidráulico puede estar presente en las lechadas 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. Además, también se pueden diseñar lechadas de cemento libres (o esencialmente libres) de cemento Portland. Las personas del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, deberían poder seleccionar una cantidad adecuada de cemento hidráulico para una aplicación particular.

[0032] La lechada de cemento puede incluir un cemento de geopolímero, que puede incluir una fuente de aluminosilicato, una fuente de silicato metálico, y un activador. El cemento de geopolímero puede reaccionar para formar un geopolímero. Un geopolímero es un polímero inorgánico que forma redes de largo rango, unidas de manera covalente, no cristalinas. Los geopolímeros pueden formarse mediante

disolución química y posterior recondensación de diversos aluminosilicatos y silicatos para formar una red 3D o un polímero mineral tridimensional. 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. La fuente de aluminosilicato para el cemento de geopolímero puede incluir cualquier aluminosilicato adecuado. El aluminosilicato es un mineral que incluye aluminio, silicio y oxígeno, además de contracaciones. Una amplia variedad de minerales adecuados pueden ser una fuente de aluminosilicato, en el sentido de que pueden comprender minerales de aluminosilicato. La fuente de silicato de metal puede comprender cualquier silicato de metal adecuado. Un silicato es un compuesto que contiene 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 monocatenarios cíclicos 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. Cuando se encuentra presente, el cemento de geopolímero puede en general incluirse en las lechadas de cemento en una cantidad suficiente para proporcionar la resistencia a la compresión y/o densidad deseada. El cemento de geopolímero puede estar presente en las lechadas 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. Una persona del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, deberían poder seleccionar una cantidad adecuada de cemento de geopolímero para una aplicación particular.

[0033] Las lechadas de cemento pueden incluir una fuente de sílice. La sílice también puede denominarse dióxido de silicio (SiO_2). Mediante la inclusión de una fuente de sílice, puede usarse una vía diferente para obtener un producto similar al cemento Portland. Por ejemplo, puede inducirse una reacción puzolánica en donde ácido silícico (H_4SiO_4) y portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 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 (óxido de aluminio Al_2O_3) en la fuente de sílice. El hidróxido de calcio necesario para la reacción puede proporcionarse a partir de otro componente de cemento, tal como cemento Portland, o puede agregarse por separado a la lechada 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"), roca volcánica, metacaolín, tierra de diatomeas, zeolita, lutita, y cenizas de desechos agrícolas (por ejemplo, ceniza de cáscara de arroz, cenizas de caña de azúcar, y cenizas de bagazo) entre otras. Donde se encuentra presente, la fuente de sílice puede en general incluirse en las lechadas de cemento en una cantidad suficiente para proporcionar la resistencia a la compresión y/o densidad deseada. La fuente de sílice puede estar presente en las lechadas 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. Aquellas personas del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, deberían poder seleccionar una cantidad adecuada de fuente de sílice para una aplicación particular.

[0034] Las lechadas de cemento pueden incluir escoria. La escoria es en general un subproducto de la producción de diversos metales en sus minerales correspondientes. A modo de ejemplo, la producción de hierro fundido puede producir escoria como un subproducto granulado de alto horno con la escoria que en general incluye las impurezas oxidadas que se encuentran en el mineral de hierro. En general, la escoria no contiene material básico suficiente, por lo tanto, el cemento de escoria puede usarse para comprender además una base para producir una composición asentable que puede reaccionar con agua para asentarse para formar una masa endurecida. Los ejemplos de fuentes adecuadas de bases incluyen, entre otras, hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, cal, y combinaciones de estos. La escoria puede estar presente en las lechadas 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 escoria 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. Aquellas personas del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, deberían poder seleccionar una cantidad adecuada de escoria para una aplicación particular.

[0035] Las lechadas de cemento pueden incluir polvo de horno de cemento o "CKD". CKD se refiere a una alimentación del horno parcialmente calcinada que se retira de la corriente de gas y se recolecta, por ejemplo, en un colector de polvo durante la fabricación del cemento. Por lo general, se recolectan grandes cantidades de CKD en la producción de cemento que comúnmente se desecha como desperdicio. La eliminación de CKD y desechos puede agregar complejidades adicionales a la fabricación del cemento, así como las preocupaciones ambientales asociadas con su eliminación. El CKD puede estar presente en las lechadas 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 CKD 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. Aquellas personas del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, deberían poder seleccionar una cantidad adecuada de CKD para una aplicación particular.

[0036] Las lechadas de cemento pueden incluir minerales tales como vidrios naturales. Ciertos vidrios naturales pueden exhibir propiedades cementosas, ya que puede fraguar y endurecerse en presencia de cal hidratada y agua. Los vidrios naturales pueden estar presente en las lechadas 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, los vidrios naturales pueden estar presentes 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. Aquellas personas del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, deberían poder seleccionar una cantidad adecuada de fuente de sílice para una aplicación particular.

[0037] Las arcillas se pueden incluir en las lechadas de cemento. Algunas arcillas pueden incluir lutita o metacaolín. Entre otras cosas, las arcillas incluidas en las lechadas de cemento pueden reaccionar con el exceso de cal para formar un

material de cementación adecuado, por ejemplo, silicato de calcio hidratado. Puede ser adecuada una variedad de arcillas, incluso las que incluyen silicio, aluminio, calcio y/o magnesio. Un ejemplo de una lutita adecuada comprende lutita vitrificada. Las zeolitas también se pueden incluir en las lechadas de cemento. Las zeolitas son generalmente minerales aluminosilicatos 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 comprender hidratos de aluminosilicato. Como se usa en la presente, la expresión "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 incluyen zeolita pueden comprender zeolita en combinación con un catión tal como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc. Las zeolitas que incluyen cationes tales como sodio también pueden proporcionar fuentes de cationes adicionales a la lechada de cemento a medida que las zeolitas se disuelven. Las arcillas y zeolitas pueden estar presente en las lechadas 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, las arcillas y zeolitas pueden estar presentes 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. Aquellas personas del oficio de nivel medio, con el beneficio de esta divulgación, deberían poder seleccionar una cantidad adecuada de arcillas y/o zeolita para una aplicación particular.

[0038] Las lechadas de cemento pueden incluir además cal hidratada o 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 lechadas de cemento. Cuando está presente, la cal hidratada puede incluirse en las lechadas 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. La persona del oficio de nivel medio con el beneficio de esta divulgación debería reconocer la cantidad apropiada de cal hidratada a incluir para una aplicación elegida.

[0039] En algunos ejemplos, las lechadas de cemento pueden incluir una

fuentes de calcio distintas de la cal hidratada. En general, puede necesitarse calcio y un pH alto, por ejemplo, un pH de 7,0 o mayor 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. 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 lechadas 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. La persona del oficio de nivel medio con el beneficio de esta divulgación debería reconocer la cantidad apropiada de fuente de calcio y fuente de hidróxido alternativas a incluir para una aplicación elegida.

[0040] Las lechadas de cemento pueden incluir aditivos de cemento que pueden impartir las propiedades deseadas a la lechada de cementación. Los ejemplos de tales aditivos incluyen, entre otros, agentes de ponderación, retardantes, aceleradores, activadores, aditivos de control de gas, aditivos de baja densidad, 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, deberían poder seleccionar una cantidad adecuada de aditivo para una aplicación particular.

[0041] Las lechadas de cemento divulgadas en la presente se pueden usar en una variedad de aplicaciones subterráneas, que incluyen cementación correctiva y primaria. Las lechadas de cemento se pueden introducir en una formación subterránea y dejar que se asienten. En aplicaciones de cementación primaria, por ejemplo, se pueden introducir las lechadas de cemento en un 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 lechada de cemento se asiente en el espacio anular para formar una vaina anular de cemento

endurecido. La lechada 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).

[0042] Ahora se hará referencia a la Figura 7, que ilustra el uso de una lechada de cemento 700. La lechada de cemento 700 puede comprender cualesquiera de los componentes descritos en la presente. La lechada de cemento 700 puede diseñarse, por ejemplo, mediante mapeo de reactividad como se describe en la presente. Con respecto a la Figura 6, la lechada de cemento 700 puede colocarse en una formación subterránea 705 de acuerdo con sistemas, métodos y lechadas de cemento de ejemplo. Como se ilustra, se puede perforar un pozo 710 en la formación subterránea 705. Si bien el pozo 710 se muestra como extendido generalmente de manera vertical en la formación subterránea 705, los principios descritos en la presente también se pueden aplicar a pozos que se extienden en un ángulo a través de la formación subterránea 705, tales como pozos horizontales e inclinados. Como se ilustra, el pozo 710 comprende paredes 715. En la ilustración, se insertó un revestimiento superficial 220 en el pozo 710. La tubería de revestimiento de superficie 220 se puede cementar a las paredes 715 del pozo 710 mediante una vaina de cemento 720. 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 730 también se pueden disponer en el pozo 710. Como se ilustra, hay un anillo de pozo 735 formado entre la tubería de revestimiento 730 y las paredes 715 del pozo 710 y/o la tubería de revestimiento de superficie 725. Se pueden fijar uno o más centralizadores 740 a la tubería de revestimiento 730, por ejemplo, para centralizar la tubería de revestimiento 730 en el pozo 710 antes y durante la operación de cementación.

[0043] Aún con respecto a la Figura 7, la lechada de cemento 700 se puede bombear hacia el interior del revestimiento 730. Se puede permitir que la lechada de cemento 700 fluya por el interior del revestimiento 730 a través de la zapata de revestimiento 745 en la parte inferior del revestimiento 730 y suba alrededor del

revestimiento 730 hacia el anillo de pozo 735. Se puede permitir que la lechada de cemento 700 se asiente en el anillo de pozo 735, por ejemplo, para formar una vaina de cemento que soporte y posicione el revestimiento 730 en el pozo 710. Si bien no se las ilustra, también se pueden utilizar otras técnicas para la introducción de la lechada de cemento 700. A modo de ejemplo, se pueden usar técnicas de circulación inversa que incluyen la introducción de la lechada de cemento 700 en la formación subterránea 705 por medio del anillo de pozo 735 en lugar de a través del revestimiento 730. A medida que se introduce, la lechada de cemento 700 puede desplazar otros fluidos 750, tales como fluidos de perforación y/o fluidos espaciadores, que pueden estar presentes en el interior del revestimiento 730 y/o el anillo de pozo 735. Si bien no se ilustra, al menos una porción de los fluidos desplazados 250 puede salir del anillo de pozo 735 a través de una línea de flujo y depositarse, por ejemplo, en uno o más pozos de retención. Se puede introducir un tapón inferior 755 en el pozo 710 antes de la lechada de cemento 700, por ejemplo, para separar la lechada de cemento 700 de los fluidos 550 que puedan estar dentro del revestimiento 730 antes de la cementación. Después de que el tapón inferior 755 alcanza el collar de acoplamiento 780, se debe romper un diafragma u otro dispositivo adecuado para permitir que la lechada de cemento 700 pase a través del tapón inferior 755. El tapón inferior 755 se muestra en el collar de acoplamiento 780. En la ilustración, se puede introducir un tapón superior 760 en el pozo 710 detrás de la lechada de cemento 700. El tapón superior 760 puede separar la lechada de cemento 700 de un fluido de desplazamiento 765 y también empujar la lechada de cemento 700 a través del tapón inferior 755.

[0044] La Figura 8 ilustra en general un ejemplo de un sistema de tratamiento de información 800 que puede incluir cualquier medio o agregado de medios operables para computar, estimar, clasificar, procesar, transmitir, recibir, retirar, originar, cambiar, almacenar, visualizar, manifestar, detectar, registrar, reproducir, tratar, o utilizar cualquier forma de información, inteligencia o datos a fines comerciales, científicos, de control, u otros. Por ejemplo, un sistema de tratamiento de información 800 puede ser una computadora personal, un dispositivo de almacenamiento en red, o cualquier otro dispositivo adecuado y puede variar en tamaño, forma, rendimiento, funcionalidad, y precio. En ejemplos, el sistema de tratamiento de información 100 puede denominarse un superordenador o un superordenador gráfico.

[0045] Como se ilustra, el sistema de tratamiento de información 800 puede incluir una o más unidades centrales de procesamiento (CPU) o procesadores 802. El

sistema de tratamiento de información 800 también puede incluir una memoria de acceso aleatorio (RAM) 804 a la que pueden acceder los procesadores 802. Debería notarse que el sistema de tratamiento de información 800 puede incluir además lógica de hardware o software, ROM, y/o cualquier otro tipo de memoria no volátil. El sistema de tratamiento de información 800 puede incluir uno o más módulos de gráficos 806 que puede acceder a la RAM 804. Los módulos de gráficos 806 pueden ejecutar funciones realizadas mediante un Módulo de Procesamiento de Gráficos (no ilustrado), mediante el uso de un hardware (tal como procesadores de gráficos especializados) o una combinación de hardware y software. Un dispositivo de entrada de usuario 808 puede permitirle a un usuario controlar e ingresar información en el sistema de tratamiento de información 800. Los componentes adicionales del sistema de tratamiento de información 800 puede incluir una o más unidades de disco, dispositivos de salida 812, tales como un visualizador de video, y uno o más puertos de red para comunicación con dispositivos externos, así como también un dispositivo de entrada de usuario 808 (por ejemplo, un teclado, un mouse, etc.). El sistema de tratamiento de información 800 también puede incluir uno o más bus operables para transmitir comunicaciones entre diversos componentes de hardware.

[0046] De manera alternativa, los sistemas y métodos de la presente divulgación pueden implementarse, al menos en parte, con un medio no transitorio legible por computadora. El medio no transitorio legible por computadora puede incluir cualquier medio o adición de medios que puedan retener datos y/o instrucciones durante un período de tiempo. El medio no transitorio legible por computadora puede incluir, por ejemplo, el medio de almacenamiento 810 tal como un dispositivo de almacenamiento de acceso directo (por ejemplo, una unidad de disco duro o un disquete), 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 también medios de comunicación tales como cables, fibras ópticas, microondas, ondas de radio, y otros portadores ópticos y/o electromagnéticos; y/o cualquier combinación de las anteriores.

[0047] La Figura 9 ilustra detalles adicionales del sistema de tratamiento de información 800. Por ejemplo, el sistema de tratamiento de información 800 puede incluir uno o más procesadores, tales como el procesador 900. El procesador 900 puede estar conectado a un bus de comunicación 902. 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.

[0048] El sistema de tratamiento de información 800 también puede incluir una memoria principal 904, preferentemente una memoria de acceso aleatorio (RAM), y también puede incluir una memoria secundaria 906. La memoria secundaria 906 puede incluir, por ejemplo, una unidad de disco duro 908 y/o una unidad de almacenamiento extraíble 910, que representan un disquete, una unidad de cinta magnética, una unidad de disco óptico, etc. La unidad de almacenamiento extraíble 910 puede leer y/o escribir en una unidad de almacenamiento extraíble 912 de cualquier manera adecuada. La unidad de almacenamiento extraíble 912 representa un disquete, una cinta magnética, un disco óptico, etc. que se lee y redacta mediante la unidad de almacenamiento extraíble 910. Como se apreciará, la unidad de almacenamiento extraíble 912 incluye un medio de almacenamiento utilizable por computadora que tiene almacenados datos y/o software de computadora.

[0049] En formas de realización alternativas, la memoria secundaria 906 puede incluir otras operaciones para permitir la carga de programas informáticos u otras instrucciones en el sistema de tratamiento de información 800. Por ejemplo, una unidad de almacenamiento extraíble 914 y una interfaz 916. Dichos ejemplos pueden incluir un cartucho de programa o una interfaz de cartucho (tal como la que se encuentra en dispositivos de video juegos), un chip de memoria extraíble (tal como una EPROM o PROM) y una toma asociada, y otras unidades de almacenamiento extraíbles 914 e interfaces 916 que pueden permitir que el almacenamiento y los datos se transfieran desde la unidad de almacenamiento extraíble 914 hasta el sistema de tratamiento de información 800.

[0050] En ejemplos, el sistema de tratamiento de información 800 también puede incluir una interfaz de comunicaciones 918. La interfaz de comunicaciones 918 puede permitir que el software y los datos se transfieran entre el sistema de tratamiento de información 800 y dispositivos internos. Los ejemplos de interfaz de comunicaciones 918 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 918 se encuentran en forma de señales 920 que pueden ser electrónicas, electromagnéticas, ópticas, u otras señales capaces de ser recibidas mediante la interfaz de comunicaciones 918. Las señales 920 se pueden proporcionar a la interfaz de

comunicaciones mediante el canal 922. El canal 922 transporta las señales 920 y puede implementarse al usar un cable o alambre, fibras ópticas, una línea telefónica, un enlace de teléfono celular, un enlace RF y/o cualquier otro canal de comunicaciones adecuado. Por ejemplo, el sistema de tratamiento de información 800 incluye al menos una memoria 904 operable para almacenar instrucciones ejecutables por computadora, al menos una interfaz de comunicaciones 902, 918 para acceder a la al menos una memoria 904; y al menos un procesador 900 configurado para acceder a la al menos una memoria 904 mediante la al menos una interfaz de comunicaciones 902, 918 y ejecutar las instrucciones ejecutables por computadora.

[0051] En este documento, las expresiones "medio de programa informático" y "medio de uso informático" se usan para referirse en general a medios tales como la unidad de almacenamiento extraíble 912, un disco duro instalado en una unidad de disco duro 908, y las señales 920. Estos productos de programa informático pueden proporcionar software a al sistema informático 800.

[0052] Los programas informáticos (también denominados lógica de control informático) puede almacenarse en la memoria principal 904 y/o la memoria secundaria 906. Los programas informáticos también pueden recibirse a través de la interfaz de comunicaciones 918. Dichos programas informáticos, cuando se los ejecuta, permiten que el sistema de tratamiento de información 800 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 900 realice las características de las formas de realización de ejemplo. En consecuencia, tales programas informáticos representan controladores del sistema de tratamiento de información 800.

[0053] En ejemplos con implementación de software, el software puede almacenarse en un producto de programa de computadora y cargarse en el sistema de tratamiento de información 800 mediante el uso de una unidad de almacenamiento extraíble 910, una unidad de disco duro 908 o una interfaz de comunicaciones 918. La lógica de control (software), cuando se ejecuta mediante el procesador 900, genera que el procesador 900 realice las funciones de las formas de realización de ejemplo descritas en la presente.

[0054] En ejemplos con implementación de hardware, los componentes de hardware tales como los circuitos integrados de aplicación específica (ASICs). La implementación de dicha máquina de estado de hardware para realizar las funciones descritas en la presente será evidente para las personas del oficio de nivel medio.

Debe notarse que la divulgación podrá implementarse al menos de manera parcial tanto en hardware como software.

[0055] Los métodos descritos en la presente podrán 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 del método descrito 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 pretende limitar de otra manera el tipo de dispositivo físico de almacenamiento legible por computadora abarcado en 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. Las instrucciones y datos de programa almacenados en un medio de almacenamiento tangible accesible por computadora en forma no transitoria pueden ser transmitidos de manera adicional mediante el medio 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 enlace inalámbrico.

[0056] Las siguientes declaraciones pueden describir ciertas formas de realización de la divulgación, pero deben considerarse limitativas de cualquier forma de realización particular.

[0057] Declaración 1. Un método para diseñar una lechada de cemento que comprende: proporcionar una fórmula de lechada de cemento que comprende agua y al menos un componente cementoso; crear un modelo de una resistencia a la compresión de la fórmula de cemento para un tiempo dado; preparar una lechada de cemento al menos en parte en función del modelo; e introducir la lechada de cemento en la formación subterránea.

[0058] Declaración 2. El método de acuerdo con la declaración 1, en donde la etapa de crear el modelo comprende al menos una de modelar una resistencia a la

compresión final de la fórmula de cemento, modelar una energía de activación de la fórmula de cemento, y modelar una dependencia temporal de resistencia a la compresión de la fórmula de cemento.

[0059] Declaración 3. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-2, en donde la etapa de crear un modelo comprende el modelado de una resistencia a la compresión final de la fórmula de cemento, y en donde el modelado de la resistencia a la compresión final comprende la correlación de al menos uno de requerimiento de agua de la fórmula de cemento, gravedad específica de la fórmula de cemento, tamaño de partícula promedio de la fórmula de cemento, área superficial BET de la fórmula de cemento, área superficial específica, concentración de C_2S en la fórmula de cemento, concentración de C_3S en la fórmula de cemento, concentración de C_4AF en la fórmula de cemento, concentración de C_3A en la fórmula de cemento, concentración de $CaSO_4$ en la fórmula de cemento, y concentración de yeso en la fórmula de cemento con la resistencia a la compresión final.

[0060] Declaración 4. El método de acuerdo con cualquiera de la declaraciones 1-3, en donde la etapa de crear un modelo comprende el modelado de una resistencia a la compresión final de la fórmula de cemento, y en donde el modelado de la resistencia a la compresión final comprende el siguiente modelo:

$CS = CS_0 \left(\frac{w}{c} \right)^n$ donde CS es la resistencia a la compresión final, CS_0 es la resistencia

a la compresión final cuando una relación de agua con respecto a cemento es de 1, w es una fracción de masa de agua, c es una fracción de masa de cemento, y n es una constante.

[0061] Declaración 5. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-4, en donde la etapa de crear un modelo comprende el modelado de una energía de activación de la fórmula de cemento, y en donde el modelado de la energía de activación comprende la correlación de al menos uno de tamaño de partícula promedio de la fórmula de cemento, área superficial BET de la fórmula de cemento, área superficial específica, concentración de C_2S en la fórmula de cemento, concentración de C_3S en la fórmula de cemento, concentración de C_4AF en la fórmula de cemento, concentración de C_3A en la fórmula de cemento, concentración de $CaSO_4$ en la fórmula de cemento, y concentración de yeso en la fórmula de cemento con la energía de activación.

[0062] Declaración 6. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-5, en donde la etapa de crear un modelo comprende el modelado de

una energía de activación de la fórmula de cemento, y en donde el modelado de la energía de activación comprende la correlación de datos calorimétricos con la energía de activación.

[0063] Declaración 7. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-6, en donde la etapa de crear un modelo comprende el modelado de una dependencia temporal de resistencia a la compresión de la fórmula de cemento, y en donde el modelado de la dependencia temporal de resistencia a la compresión comprende la correlación de la resistencia a la compresión en el tiempo mediante el uso de una función de Weibull.

[0064] Declaración 8. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-7, en donde la etapa de crear un modelo comprende el modelado de una dependencia temporal de resistencia a la compresión de la fórmula de cemento, y en donde el modelado de la dependencia temporal de resistencia a la compresión

comprende el siguiente modelo: $\frac{CS}{CS_u} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\lambda_0 \exp\left(\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right)}\right)^K\right)$ donde

CS es la resistencia a la compresión, CS_u , t es el tiempo transcurrido, λ_0 es un parámetro de escala inicial, E_a es energía de activación, R es constante de gas, T_{ref} es una temperatura de referencia, T es una temperatura, y K es parámetro con forma de s.

[0065] Declaración 9. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-8, en donde la etapa de modelado comprende el siguiente modelo:

$$CS - CS_0 \left(\frac{w}{C_0}\right)^n = \begin{cases} \left(1 - \exp\left(\frac{t - t_{ind}}{\lambda_1^0 \lambda(T)}\right)^{K_1}\right) & 0 \leq t < t_1 \\ \left(1 - \exp\left(\frac{t - t_{ind}}{\lambda_2^0 \lambda(T)}\right)^{K_2}\right) & t_1 < t < t_2 \\ \vdots & \end{cases} \quad \text{donde } CS_0 \text{ es una}$$

función de cemento Portland, w es una fracción de masa de agua, C_0 es una fracción de masa de cemento Portland, Min_j es λ_1^0 y λ_2^0 es un parámetro de escala, $\lambda(T)$ es un parámetro de escala dependiente de la temperatura, t es tiempo, t_{ind} es tiempo de inducción, y, K_1 y K_2 son un parámetro de forma.

[0066] Declaración 10. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-9 que comprende además proporcionar una resistencia a la compresión final requerida y una resistencia a la compresión dependiente del tiempo requerida y comparar la resistencia a la compresión final requerida y la resistencia a la compresión dependiente del tiempo requerida con un rendimiento de la etapa del

modelado.

[0067] Declaración 11. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-10, que comprende ajustar una concentración del agua, el al menos un componente cementoso, o ambos, en la fórmula de cemento.

[0068] Declaración 12. Un medio no transitorio legible por computadora que tiene datos almacenados que representan software ejecutable por una computadora, en donde el software incluye instrucciones que comprenden: instrucciones para calcular una resistencia a la compresión de una lechada de cemento mediante el uso de un modelo de resistencia a la compresión.

[0069] Declaración 13. El medio no transitorio legible por computadora de acuerdo con la declaración 12, en donde la lechada de cemento comprende agua y al menos un componente cementoso.

[0070] Declaración 14. El medio no transitorio legible por computadora de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 12-13, en donde el modelo de resistencia a la compresión comprende una función de Weibull.

[0071] Declaración 15. El medio no transitorio legible por computadora de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 12-14, en donde el modelo de resistencia a la compresión comprende un modelo de al menos uno de un modelo de una resistencia a la compresión final, un modelo de una energía de activación de cemento, y un modelo de dependencia temporal de resistencia a la compresión de cemento.

[0072] Declaración 16. Un método de cementación que comprende: proporcionar una fórmula de cemento que comprende agua y al menos un componente cementoso, en donde el al menos un componente cementoso comprende cemento Portland; modelar una resistencia a la compresión y una resistencia a la compresión de la fórmula de cemento dependiente del tiempo mediante el uso de un modelo de resistencia a la compresión de cemento; comparar la resistencia a la compresión y la resistencia a la compresión de la fórmula de cemento dependiente del tiempo con un requerimiento de resistencia a la compresión final y un requerimiento de resistencia a la compresión dependiente del tiempo; preparar una fórmula de cemento; y colocar la fórmula de cemento en una formación subterránea.

[0073] Declaración 17. El método de acuerdo con la declaración 16, en donde el modelo de resistencia a la compresión de cemento comprende una función de Weibull.

[0074] Declaración 18. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 16-17, en donde la etapa de modelar la resistencia a la compresión de

la fórmula de cemento comprende el modelado de la siguiente función:

$CS = CS_0 \left(\frac{w}{c}\right)^n$ donde CS es la resistencia a la compresión, CS_0 es la resistencia a la compresión final cuando una relación de agua con respecto a cemento es de 1, w es una fracción de masa de agua, c es una fracción de masa de cemento, y n es una constante.

[0075] 19. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 16-18, en donde la etapa de modelar la resistencia a la compresión dependiente del tiempo de la fórmula de cemento comprende el modelado de la siguiente función:

$$CS = CS_0 \left(\frac{w}{C_0}\right)^n * \begin{cases} \left(1 - \exp\left(\frac{t - t_{ind}}{\lambda_1^0 \lambda(T)}\right)^{K_1}\right) & 0 \leq t < t_1 \\ \left(1 - \exp\left(\frac{t - t_{ind}}{\lambda_2^0 \lambda(T)}\right)^{K_2}\right) & t_1 < t < t_2 \\ \vdots & \end{cases} \quad \text{w donde } CS_0 \text{ es una}$$

función de cemento Portland, w es una fracción de masa de agua, C_0 es una fracción de masa de cemento Portland, Min_j es λ_1^0 y λ_2^0 es un parámetro de escala, $\lambda(T)$ es un parámetro de escala dependiente de la temperatura, t es tiempo, t_{ind} es tiempo de inducción, y, K_1 y K_2 son un parámetro de forma.

[0076] Declaración 20. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 16-19, que además comprende ajustar al menos una de una concentración del agua, una concentración de el al menos un componente cementoso, o ambos, al menos en parte en función de un resultado de la etapa de comparación.

[0077] Las composiciones de cemento y métodos asociados divulgados pueden afectar directa o indirectamente a cualquier sistema de bombeo, que incluyen de manera representativa cualquier tipo de conductos, tuberías, camiones, tubulares y/o tubos que puedan acoplarse a la bomba y/o cualquier sistema de bombeo que pueda usarse para transportar de manera fluida las composiciones de cemento en el fondo de pozo, cualquier tipo de bombas, compresores o motores (por ejemplo, en la parte superior o en el fondo de pozo) utilizados para impulsar las composiciones de cemento en movimiento, cualquier tipo de válvulas o juntas relacionadas utilizadas para regular la presión o velocidad de flujo de las composiciones de cemento y cualquier tipo de 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.

[0078] 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.

[0079] 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-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 indican 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.

[0080] 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 divulgadas anteriormente son solo ilustrativas, 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 en la presente. Si bien se analizan ejemplos individuales, la divulgación cubre todas las combinaciones de aquellos 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 simple y ordinario a menos que el titular de la patente defina lo contrario de manera explícita y clara. 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.