

BARRERAS DE POZO PARA ALMACENAMIENTO SUBTERRÁNEO DE DIÓXIDO DE CARBONO

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

[0001] Los métodos para construir y reparar pozos de almacenamiento subterráneo de captura de carbono (CCUS) utilizan composiciones de cemento Portland que incluyen cemento Portland y agua. Las barreras de pozo de CCUS construidas mediante el uso de composiciones de cemento Portland se pueden someter con el tiempo a degradación, mayor porosidad y resistencia mecánica e integridad de barrera reducida debido al contacto prolongado con dióxido de carbono.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

[0002] 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.

[0003] La Figura 1 ilustra un sistema para la preparación y el suministro de una lechada de cemento modificada con resina a un pozo de acuerdo con ciertas formas de realización.

[0004] La Figura 2 ilustra un equipo de superficie que se puede utilizar en la colocación de una lechada de cemento modificada con resina en un pozo de acuerdo con ciertas formas de realización.

[0005] La Figura 3 ilustra la colocación de una lechada de cemento modificada con resina en un anillo de pozo de acuerdo con ciertas formas de realización.

[0006] La Figura 4 es una ilustración esquemática que muestra la presencia de una pequeña perforación en una tubería de revestimiento y una vaina protectora en un pozo.

[0007] La Figura 5 es una ilustración esquemática de un ejemplo en el que se utiliza una lechada de cemento modificada con resina en una aplicación correctiva.

[0008] La Figura 6 es otra ilustración esquemática de un ejemplo en el que se utiliza una lechada de cemento modificada con resina en una aplicación correctiva.

[0009] La Figura 7 ilustra la inyección de dióxido de carbono en una zona de inyección de dióxido de carbono de acuerdo con ciertas formas de realización.

[0010] La Figura 8A es una ilustración de cemento puro expuesto a una semana de dióxido de carbono saturado.

[0011] La Figura 8B es una ilustración de cemento puro expuesto a una semana de dióxido de carbono saturado.

[0012] La Figura 8C es una ilustración de cemento extendido con agua expuesto a una semana de dióxido de carbono saturado.

[0013] La Figura 8D es una ilustración de cemento extendido con agua expuesto a una semana de dióxido de carbono saturado.

[0014] La Figura 8E es una ilustración de cemento Portland reducido expuesto a una semana de dióxido de carbono saturado.

[0015] La Figura 8F es una ilustración de cemento Portland reducido expuesto a una semana de dióxido de carbono saturado.

[0016] La Figura 8G es una ilustración de cemento Portland modificado con resina

expuesto a una semana de dióxido de carbono saturado.

[0017] La Figura 8H es una ilustración de cemento Portland modificado con resina expuesto a una semana de dióxido de carbono saturado.

[0018] La Figura 9A es una ilustración de cemento puro expuesto a un mes de dióxido de carbono saturado.

[0019] La Figura 9B es una ilustración de cemento puro expuesto a un mes de dióxido de carbono saturado.

[0020] La Figura 9C es una ilustración de cemento extendido con agua expuesto a un mes de dióxido de carbono saturado.

[0021] La Figura 9D es una ilustración de cemento extendido con agua expuesto a un mes de dióxido de carbono saturado.

[0022] La Figura 9E es una ilustración de cemento Portland reducido expuesto a un mes de dióxido de carbono saturado.

[0023] La Figura 9F es una ilustración de cemento Portland reducido expuesto a un mes de dióxido de carbono saturado.

[0024] La Figura 9G es una ilustración de cemento Portland modificado con resina expuesto a un mes de dióxido de carbono saturado.

[0025] La Figura 9H es una ilustración de cemento Portland modificado con resina expuesto a un mes de dióxido de carbono saturado.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

[0026] La presente divulgación se refiere a sistemas y métodos para cementar pozos de almacenamiento subterráneo de captura de carbono (CCUS) y métodos para utilizar barreras de pozo de almacenamiento subterráneo de captura de carbono para almacenar dióxido de carbono. Más particularmente, ciertas formas de realización de la presente divulgación se refieren a sistemas y métodos para utilizar una lechada de cemento modificada con resina que comprende un cemento hidráulico, una resina, un endurecedor y agua, en la construcción y reparación de pozos de almacenamiento subterráneo de captura de carbono subterráneos y submarinos para mitigar la carbonatación del cemento en estos.

[0027] En algunos ejemplos, el cemento hidráulico puede incluir un cemento Portland. En algunos ejemplos, los cementos Portland pueden incluir cementos Portland que se clasifican como cementos de Clase A, B, C, D, E, F, G, H, K y L de acuerdo con el Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute), API Specification for Materials and Testing for Well Cements, Especificación 10A, 25.^a ed., marzo de 2019. En algunos ejemplos, las lechadas de cemento modificadas con resina pueden incluir cementos clasificados por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials) (ASTM) en C150 (Especificación Normalizada para Cemento Portland), C595 (Especificación Normalizada para Lechada de cemento modificada con resina adicionada) o C1157 (Especificación Normalizada para Lechadas de cemento modificadas con resina), tales como los cementos clasificados como ASTM tipo I, II o III. Los materiales cementosos se pueden combinar con los fluidos de base acuosa para formar una lechada de cemento que se puede introducir en un pozo que penetra una formación subterránea. El cemento puede incluirse en la lechada de cemento modificada con resina en cualquier cantidad adecuada, que incluye, entre otros, de alrededor de

20 % a alrededor de 99 % en peso de la lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, el cemento puede incluirse en la lechada de cemento modificada con resina en un rango de alrededor de 50 % a alrededor de 75 % en peso, de alrededor de 55 % a alrededor de 75 % en peso, de alrededor de 60 % a alrededor de 70 % en peso, de alrededor de 60 % a alrededor de 75 % en peso, de alrededor de 45 % a alrededor de 80 % en peso. Las cantidades adecuadas pueden incluir, entre otras, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % o 99 % en peso de la lechada de cemento modificada con resina.

[0028] Como se usa en la presente, el término "resina" se puede referir a cualquiera de una cantidad de resinas naturales modificadas químicamente o sintéticas polimerizadas físicamente similares que incluyen materiales termoplásticos y materiales termoendurecibles. En algunos ejemplos, las resinas pueden ser resinas curables líquidas que pueden incluir, entre otras, resinas a base de epoxi, olefinas cíclicas, resinas novolac, resinas de poliepóxido, resinas de fenol-aldehído, resinas de urea-aldehído, resinas de uretano, resinas fenólicas, resinas de furano, resinas de furano y alcohol furfurílico, resinas fenólicas/de látex, resinas de fenol formaldehído, resinas de bisfenol A diglicidil éter, resinas de butoximetil butil glicidil éter, resinas de bisfenol A-epiclorohidrina, resinas de bisfenol F, resinas de bisfenol F diglicidil éter, ciclohexan dimetanol diglicidil éter, resinas de glicidil éter, resinas de poliéster e híbridos y copolímeros de estas, resinas de poliuretano e híbridos y copolímeros de estas, resinas de acrilato y mezclas de estas. Algunas resinas adecuadas, tales como resinas epoxi, se pueden curar con un catalizador o activador interno de modo que cuando se bombean al fondo de pozo, se pueden curar solo mediante el uso de tiempo y temperatura. Otras resinas adecuadas, tales como resinas de furano, en general requieren un catalizador de retardo de tiempo o un catalizador externo para ayudar a activar la polimerización de las resinas si la temperatura de curado es baja (es decir, menor de 250°F (121 °C), pero se curarán bajo el efecto del tiempo y la temperatura si la temperatura de la formación es mayor de 250°F.

[0029] La selección de una resina particular se puede ver afectada por la temperatura de la formación subterránea en la cual se introducirá la lechada de cemento modificada con resina. A modo de ejemplo, para formaciones subterráneas que tienen una temperatura estática de fondo de pozo ("BHST") que varía de alrededor de 60°F (15,5 °C) a alrededor de 400°F (204 °C), se pueden utilizar resinas de dos componentes. En general, una resina puede incluirse en la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad en un rango de alrededor de 2 % a alrededor de 60 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, una resina puede incluirse en la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad en un rango de alrededor de 1 % a alrededor de 60 % en peso de la lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, de alrededor de 1 % a alrededor de 5 % en peso, de alrededor de 1 % a alrededor de 10 % en peso, de alrededor de 1 % a alrededor de 15 % en peso, de alrededor de 1 % a alrededor de 25 % en peso, de alrededor de 1 % a alrededor de 35 % en peso, de alrededor de 1 % a alrededor de 45 % en peso, de alrededor de 1 % a alrededor de 55 % en peso, de alrededor de 5 % a alrededor de 10 % en peso, de

alrededor de 5 % a alrededor de 15 % en peso, de alrededor de 5 % a alrededor de 20 % en peso, de alrededor de 15 % a alrededor de 30 % en peso, de alrededor de 30 % a alrededor de 45 % en peso, de alrededor de 45 % a alrededor de 60 % en peso o cualquier rango intermedio.

[0030] Como se usa en la presente, el término "endurecedor" o la expresión "agente de endurecimiento" se puede referir a cualquier sustancia capaz de transformar una resina en una masa endurecida y consolidada. Los ejemplos de agentes de endurecimiento adecuados pueden incluir, entre otros, aminas alifáticas, aminas alifáticas terciarias, aminas aromáticas, catalizadores de metal de transición, aminas cicloalifáticas, aminas heterocíclicas, amido aminas, poliamidas, polietilaminas, polieteraminas, polioxialquilenaminas, anhídridos carboxílicos, trietilentetraamina, etilendiamina, N-cocoalquiltrimetileno, isoforona diamina, N-aminofenil piperazina, imidazolina, 1,2-diaminociclohexano, polieteramina, dietiltoluendiamina, 4,4'-diaminodifenil metano, anhídrido metiltetrahidroftálico, anhídrido hexahidroftálico, anhídrido maleico, polianhídrido poliazelaico, anhídrido ftálico y combinaciones de estos. Los ejemplos de agentes de endurecimiento disponibles en el comercio pueden incluir, entre otros, combinaciones de endurecedores, tales como 75 %-81 % de 3,5-dietiltoluen-2,4-diamina, 18 %-20 % de 3,5-dietiltoluen-2,6-diamina y 0,5 %-3 % de fenilendiaminas dialquiladas. En algunas formas de realización, el agente de endurecimiento puede comprender una mezcla de agentes de endurecimiento seleccionados para impartir cualidades particulares a la lechada de cemento modificada con resina. En algunas formas de realización, los agentes de endurecimiento pueden incluirse en la lechada de cemento modificada con resina en un punto en un rango de alrededor de 0,05 % a alrededor de 50 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, de alrededor de 1 % a alrededor de 10 % en volumen, de alrededor de 1 % a alrededor de 5 % en volumen, de alrededor de 10 % a alrededor de 20 % en volumen, de alrededor de 20 % a alrededor de 30 % en volumen, de alrededor de 4 % a alrededor de 50 % en volumen o cualquier rango intermedio. Alternativamente, de alrededor de 0,05 % a alrededor de 5 % en peso de la lechada, de 0,05 % a alrededor de 10 % en peso de la lechada, de alrededor de 0,05 % a alrededor de 15 % en peso de la lechada, de alrededor de 10 % a alrededor de 20 % en peso de la lechada, de alrededor de 20 % a alrededor de 30 % en peso de la lechada, de alrededor de 4 % a alrededor de 50 % en peso de la lechada o cualquier rango intermedio. En algunas formas de realización, la lechada de cemento modificada con resina puede estar libre de poliamina.

[0031] Las lechadas de cemento modificadas con resina pueden incluir una resina que puede someterse a una reacción de polimerización por metátesis con apertura de anillo (ROMP). Las moléculas de resina que se someten a ROMP pueden polimerizarse mediante la formación de nuevos enlaces carbono-carbono entre moléculas. Una vez que se inicia la reacción de polimerización, la reacción puede proceder rápidamente para transformar la lechada de cemento modificada con resina de un líquido a un sólido. Durante la reacción, se puede liberar calor, lo que puede elevar la temperatura de la lechada de cemento modificada con resina, sin embargo, el calor generado puede no ser suficiente para carbonizar o degradar la

masa endurecida final. La resina en la lechada de cemento modificada con resina puede bombearse por debajo de 38 °C (100°F) sin solventes adicionales presentes. Además, la resina puede tener una densidad mayor que el agua y una viscosidad que puede ser ideal para la penetración profunda en los canales y la compresión eficaz de los defectos tales como la migración de gas o fugas de revestimiento.

[0032] Una resina incluida en la lechada de cemento modificada con resina puede incluir un cicloalqueno, que puede ser un cicloalcadieno, que puede someterse a una reacción de polimerización por metátesis con apertura de anillo que transforma la lechada de cemento modificada con resina en una masa endurecida. El cicloalqueno puede no tener carácter aromático. El cicloalqueno puede incluir, entre otros, ciclopentadieno, dicitopentadieno, triciclopentadieno, ciclobutadieno, ciclohexadieno, terpineno, norbornadieno, isómeros de estos y combinaciones de estos. El cicloalqueno también puede ser cicloalcadienos sustituidos o no sustituidos. Los cicloalcadienos sustituidos pueden estar sustituidos con un grupo hidrocarbilo o cualquier otro grupo funcional orgánico adecuado.

[0033] Una resina incluida en la lechada de cemento modificada con resina puede incluir una olefina. La olefina puede comprender una olefina cíclica. La olefina cíclica puede estar presente en la lechada de cemento modificada con resina en cualquier cantidad adecuada, que incluye, entre otros, un rango de alrededor de 1 % a alrededor de 60 % en peso de la lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, la olefina cíclica puede estar presente en un rango de alrededor de 1 % a alrededor de 10 % en peso, de alrededor de 1 % a alrededor de 15 % en peso, de alrededor de 1 % a alrededor de 20 % en peso, de 1 % a alrededor de 25 % en peso, de alrededor de 5 % a alrededor de 20 % en peso, de alrededor de 20 % a alrededor de 30 % en peso, de alrededor de 30 % a alrededor de 40 % en peso, de alrededor de 40 % a alrededor de 50 % en peso, de alrededor de 50 % a alrededor de 60 % en peso.

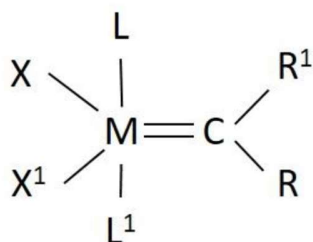
[0034] En algunas formas de realización, el endurecedor puede comprender un catalizador de metal de transición. El catalizador de metal de transición puede estar presente en la lechada de cemento modificada con resina en cualquier cantidad adecuada, que incluye, entre otros, un rango de alrededor de 0,0001 % a alrededor de 5 % en peso de la lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, el catalizador de metal de transición puede estar presente en un rango de alrededor de 0,0001 % a 0,001 % en peso, de alrededor de 0,001 % a alrededor de 0,01 % en peso, de alrededor de 0,01 % a alrededor de 0,1 % en peso, de alrededor de 0,1 % en peso a alrededor de 1 % en peso, de alrededor de 1 % a alrededor de 2 % en peso, de alrededor de 2 % a alrededor de 3 % en peso, de alrededor de 3 % a alrededor de 4 % en peso, de alrededor de 4 % a alrededor de 5 % en peso. Alternativamente, el catalizador de metal de transición puede estar presente en un rango de alrededor de 0,0001 % a 0,001 % en volumen, de alrededor de 0,001 % a alrededor de 0,01 % en volumen, de alrededor de 0,01 % a alrededor de 0,1 % en volumen, de alrededor de 0,1 % en peso a alrededor de 1 % en volumen, de alrededor de 1 % a alrededor de 2 % en volumen, de alrededor de 2 % a alrededor de 3 % en volumen, de alrededor de 3 % a alrededor de 4 % en volumen, de alrededor de 4 % a alrededor de 5 % en volumen. Alternativamente, el catalizador

de metal de transición puede estar presente en una cantidad menor de 10 % en peso, menor de 20 % en peso, menor de 30 % en peso, menor de 40 % en peso o menor de 50 % en peso.

[0035] En formas de realización en donde el endurecedor comprende un catalizador de metal de transición, el catalizador de metal de transición puede comprender un catalizador de compuesto de metal de transición que puede incluir un compuesto de carbeno de metal sustituido o no sustituido que comprende un metal de transición y una cadena principal orgánica. Algunos ejemplos no limitativos del catalizador de compuesto de metal de transición pueden incluir, entre otros, catalizadores Grubbs Catalyst® y de Schrock. El Grubbs Catalyst® puede incluir alquilideno de rutenio o alquilideno de osmio y el catalizador de Schrock puede incluir molibdeno. La selección de un catalizador de compuesto de metal de transición puede afectar la velocidad de polimerización de la resina en la lechada de cemento modificada con resina. El catalizador de compuesto de metal de transición puede estar presente en la lechada de cemento modificada con resina en un punto en un rango de alrededor de 0,0001 % en peso a alrededor de 20 % en peso. Alternativamente, el catalizador de compuesto de metal de transición puede estar presente en un punto en un rango de alrededor de 0,0001 % en peso a alrededor de 0,001 % en peso, en un punto en un rango de alrededor de 0,001 % en peso a alrededor de 0,01 % en peso, en un punto en un rango de alrededor de 0,01 % en peso a alrededor de 0,1 % en peso, en un punto en un rango de alrededor de 0,1 % en peso a alrededor de 1 % en peso, en un punto en un rango de alrededor de 1 % en peso a alrededor de 5 % en peso, en un punto en un rango de alrededor de 5 % en peso a alrededor de 10 % en peso, en un punto en un rango de alrededor de 10 % en peso a alrededor de 15 % en peso, en un punto en un rango de alrededor de 15 % en peso a alrededor de 20 % en peso o cualquier rango intermedio. Alternativamente, las concentraciones de resina y catalizador de compuesto de metal de transición se pueden expresar como relaciones de masa relativas. Por ejemplo, la resina y el catalizador de compuesto de metal de transición pueden estar presentes en la lechada de cemento modificada con resina en una relación de masa de alrededor de 50:1 a alrededor de 10000:1 de resina con respecto a catalizador de compuesto de metal de transición. Alternativamente, la resina y el catalizador de compuesto de metal de transición también pueden estar presentes en relaciones de masa de alrededor de 50:1 a alrededor de 100:1, de alrededor de 100:1 a alrededor de 500:1, de alrededor de 500:1 a alrededor de 1000:1, de alrededor de 1000:1 a alrededor de 2000:1, de alrededor de 2000:1 a alrededor de 3000:1, de alrededor de 3000:1 a alrededor de 4000:1, de alrededor de 4000:1 a alrededor de 5000:1, de alrededor de 5000:1 a alrededor de 6000:1, de alrededor de 6000:1 a alrededor de 7000:1, de alrededor de 7000:1 a alrededor de 8000:1, de alrededor de 8000:1 a alrededor de 9000:1, de alrededor de 9000:1 a alrededor de 10000:1 o cualquier relación de masa entre estos de la resina con respecto al catalizador de compuesto de metal de transición. Alternativamente, el catalizador de compuesto de metal de transición puede suspenderse en una suspensión de aceite mineral o cualquier medio de suspensión adecuado. Por ejemplo, el medio de suspensión puede estar presente en la suspensión de catalizador de compuesto de metal de transición en una cantidad de

alrededor de 90 % a 99 % de la suspensión de catalizador de compuesto de metal de transición. Alternativamente, el medio de suspensión puede estar presente en una cantidad de alrededor de 90 % a alrededor de 92 %, de alrededor de 93 % a alrededor de 95 % y de alrededor de 96 % a alrededor de 99 %. Las concentraciones de resina y suspensión de catalizador de compuesto de metal de transición se pueden expresar como relaciones de masa relativas. Por ejemplo, la resina y la suspensión de catalizador de compuesto de metal de transición pueden estar presentes en la lechada de cemento modificada con resina en una relación de masa de alrededor de 50:1 de resina con respecto a suspensión de catalizador de compuesto de metal de transición. Alternativamente, la resina y la suspensión de catalizador de compuesto de metal de transición también pueden estar presentes en relaciones de masa de alrededor de 20:1, alrededor de 30:1, alrededor de 40:1, alrededor de 60:1, alrededor de 70:1 o alrededor de 80:1 o cualquier relación de masa entre estos de la resina con respecto a la suspensión de catalizador de compuesto de metal de transición. A continuación, se describirán con detalle ejemplos específicos de catalizadores de compuesto de metal de transición adecuados.

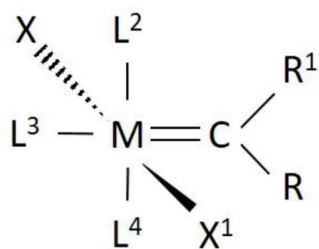
[0036] El catalizador de compuesto de metal de transición puede tener la estructura química general representada en la Estructura 1. M puede ser rutenio u osmio. R y R1 pueden seleccionarse independientemente de hidrógeno, C2-C20 alquenilo, C2-C20 alquinilo, C2-C20 alquilo, arilo, C1-C20 carboxilato, C1-C20 alcoxi, C2-C20 alquenilo, C2-C20 alquinoxilo, arilo, C2-C20 alcóxycarbonilo, C1-C20 alquiltio, C1-C20 alquilsulfonilo o C1-C20 alquilsulfino. Los R y R1 seleccionados pueden estar opcionalmente sustituidos con C1-C5 alquilo, halógeno, C1-C5 alcoxi o con un grupo fenilo opcionalmente sustituido además con halógeno, C1-C5 alquilo o C1-C5 alcoxi. X y X1 pueden ser iguales o diferentes y pueden ser cualquier ligando aniónico adecuado. L y L1 pueden ser cualquier donante de electrones neutro adecuado.



Estructura 1

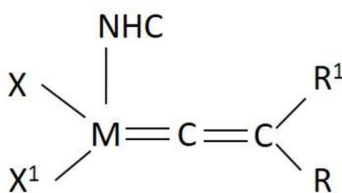
[0037] El catalizador de compuesto de metal de transición puede también tener la estructura química general representada en la Estructura 2. M puede ser rutenio u osmio. R y R1 pueden seleccionarse independientemente de hidrógeno, C2-C20 alquenilo, C2-C20 alquinilo, C2-C20 alquilo, arilo, C1-C20 carboxilato, C1-C20 alcoxi, C2-C20 alquenilo, C2-C20 alquinoxilo, arilo, C2-C20 alcóxycarbonilo, C1-C20 alquiltio, C1-C20 alquilsulfonilo o C1-C20 alquilsulfino. Los R y R1 seleccionados pueden estar opcionalmente sustituidos con C1-C5 alquilo,

halógeno, C1-C5 alcoxi o con un grupo fenilo opcionalmente sustituido además con halógeno, C1-C5 alquilo o C1-C5 alcoxi. Los grupos X y X1 pueden ser iguales o diferentes y pueden ser cualquier ligando aniónico adecuado. L2, L3 y L4 pueden ser iguales o diferentes, y pueden ser cualquier ligando donante de electrones neutro adecuado, en donde al menos un L2, L3 y L4 puede ser un ligando de carbeno N-heterocíclico (NHC) como se describe a continuación.



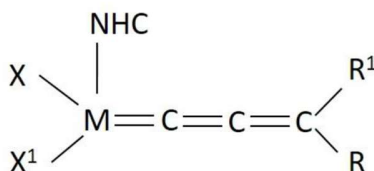
Estructura 2

[0038] El catalizador de compuesto de metal de transición puede también tener la estructura química general representada en la Estructura 3. M puede ser rutenio u osmio. R y R1 pueden seleccionarse independientemente de hidrógeno, C2-C20 alqueno, C2-C20 alquino, C2-C20 alquilo, arilo, C1-C20 carboxilato, C1-C20 alcoxi, C2-C20 alquenoilo, C2-C20 alquinoilo, arilo, C2-C20 alcoxycarbonilo, C1-C20 alquiltio, C1-C20 alquilsulfonilo o C1-C20 alquilsulfino. Los R y R1 seleccionados pueden estar opcionalmente sustituidos con C1-C5 alquilo, halógeno, C1-C5 alcoxi o con un grupo fenilo opcionalmente sustituido además con halógeno, C1-C5 alquilo o C1-C5 alcoxi. X y X1 pueden ser iguales o diferentes y pueden ser cualquier ligando aniónico adecuado. El NHC puede ser cualquier ligando de carbeno N-heterocíclico (NHC) como se describe a continuación.



Estructura 3

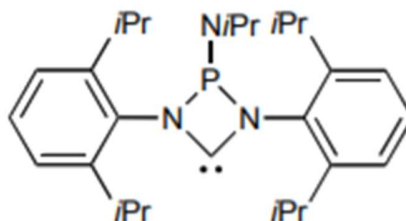
[0039] El catalizador de compuesto de metal de transición puede también tener la estructura química general representada en la Estructura 4. M puede ser rutenio u osmio. R y R1 pueden seleccionarse independientemente de hidrógeno, C2-C20 alqueno, C2-C20 alquino, C2-C20 alquilo, arilo, C1-C20 carboxilato, C1-C20 alcoxi, C2-C20 alquenoilo, C2-C20 alquinoilo, arilo, C2-C20 alcoxycarbonilo, C1-C20 alquiltio, C1-C20 alquilsulfonilo o C1-C20 alquilsulfino. Los R y R1 seleccionados pueden estar opcionalmente sustituidos con C1-C5 alquilo, halógeno, C1-C5 alcoxi o con un grupo fenilo opcionalmente sustituido además con halógeno, C1-C5 alquilo o C1-C5 alcoxi. X y X1 pueden ser iguales o diferentes y pueden ser cualquier ligando aniónico adecuado. El NHC puede ser cualquier ligando de carbeno N-heterocíclico (NHC) como se describe a continuación.



Estructura 4

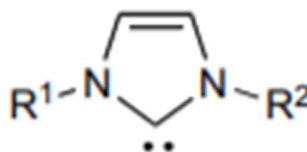
[0040] Los catalizadores de compuesto de metal de transición de las Estructuras 2-4 pueden incluir además un ligando de carbeno N-heterocíclico (NHC). Los ligandos de NHC pueden incluir NHC de 4 miembros y NHC de 5 miembros donde el ligando de NHC puede unirse a un sitio de coordinación del catalizador de compuesto de metal de transición. Las Estructuras 5-9 son estructuras de ejemplo de ligandos de NHC.

[0041] El ligando de NHC puede ser un ligando de carbeno N-heterocíclico de 4 miembros. En la Estructura 5 se representa una estructura de ejemplo de ligando de carbeno de 4 miembros. En la siguiente estructura, *i*Pr es un grupo isopropilo.

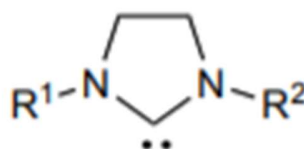


Estructura 5

[0042] El ligando de NHC puede también ser un ligando de carbeno N-heterocíclico de 5 miembros. En la Estructura 6 y la Estructura 7 se representa una estructura de ejemplo de ligandos de carbeno de 5 miembros. R¹ y R² pueden seleccionarse independientemente de 2,4,6-(Me)₃C₆H₂, 2,6-(*i*Pr)₂C₆H₃, ciclohexilo, ter-butilo, 1-adamantilo.



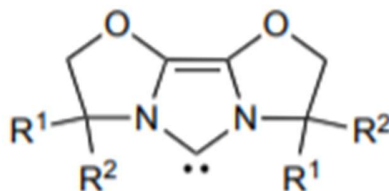
Estructura 6



Estructura 7

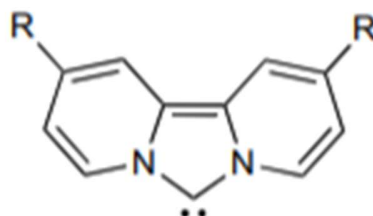
[0043] El ligando de NHC puede ser un ligando de carbeno N-heterocíclico de 5 miembros. Otra estructura de ejemplo de un ligando de carbeno de 5 miembros se ilustra en la Estructura 8. R¹ y R² pueden ser grupos equivalentes y pueden

seleccionarse de $(CH_2)_n$ donde n puede ser 4-7 y 12.



Estructura 8

[0044] El ligando de NHC puede ser un ligando de carbeno N-heterocíclico de 5 miembros. En la Estructura 9 se representa una estructura de ejemplo de ligando de carbeno de 5 miembros. R puede seleccionarse entre hidrógeno y ter-butilo.



Estructura 9

[0045] En formas de realización, la resina y el endurecedor juntos pueden estar presentes en la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad de 40 % en volumen a 99 % en volumen. Alternativamente, de alrededor de 40 % en volumen a 50 % en volumen, de alrededor de 50 % en volumen a 60 % en volumen, de alrededor de 60 % en volumen a 70 % en volumen, de alrededor de 70 % en volumen a 80 % en volumen, de alrededor de 80 % en volumen a 90 % en volumen, de alrededor de 90 % en volumen a 99 % en volumen o cualquier rango intermedio. En formas de realización, la resina y el endurecedor juntos pueden estar presentes en la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad de al menos 40 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, en una cantidad de al menos 50 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina, en una cantidad de al menos 60 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina, en una cantidad de al menos 70 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina, en una cantidad de al menos 80 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina, en una cantidad de al menos 90 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina o en una cantidad de al menos 99 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina.

[0046] En algunas formas de realización, la lechada de cemento modificada con resina puede estar libre de resinas epoxi fenol novolac. En algunas formas de realización, la lechada de cemento modificada con resina puede estar libre de resinas de bisfenol A diglicidil éter. En algunas formas de realización, la lechada de cemento modificada con resina puede estar libre de resinas epoxi a base de naftol. En algunas formas de realización, la lechada de cemento modificada con resina puede estar libre de naftaleno. En algunas formas de realización, la lechada de cemento modificada con resina puede estar libre de resinas a base de epoxi. En

algunas formas de realización, la lechada de cemento modificada con resina puede estar libre de bisfenol. En algunas formas de realización, la lechada de cemento modificada con resina puede estar libre de resinas novolac.

[0047] El agua puede provenir de cualquier fuente siempre que no contenga un exceso de compuestos que puedan afectar indeseablemente a otros componentes de las lechadas de cemento modificadas con resina. Por ejemplo, una lechada de cemento modificada con resina puede incluir agua dulce o agua salada. El agua salada generalmente puede incluir una o más sales disueltas en esta y puede estar saturada o insaturada según se desee para una aplicación particular. El agua de mar o las salmueras pueden ser adecuadas para su uso en algunos ejemplos. Además, el agua puede estar presente en una cantidad suficiente para formar una lechada bombeable. En ciertos ejemplos, el agua puede estar presente en la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad en el rango de alrededor de 33 % a alrededor de 200 % en peso de los materiales cementosos. Por ejemplo, el agua puede estar presente en una cantidad que varía entre cualquiera de y/o que incluye cualquiera de alrededor de 33 %, alrededor de 50 %, alrededor de 75 %, alrededor de 100 %, alrededor de 125 %, alrededor de 150 %, alrededor de 175 % o alrededor de 200 % en peso del cemento hidráulico o en peso de una mezcla seca de materiales cementosos. Los materiales cementosos a los que se hace referencia pueden incluir todos los componentes que contribuyan a la resistencia a la compresión de la lechada de cemento modificada con resina, tales como el cemento hidráulico, la resina y los materiales cementosos complementarios, por ejemplo.

[0048] El material cementoso complementario puede ser cualquier material que contribuya a la resistencia a la compresión de la lechada de cemento modificada con resina. Algunos materiales cementosos complementarios pueden incluir, entre otros, cenizas volantes, escoria de alto horno, vidrio natural, esquisto o metacaolín, humo de sílice, puzolanas, polvo de horno y arcillas, cementos Portland, cementos de puzolana, cementos de yeso, cementos con alto contenido de alúmina, cementos de escoria, cementos con alto contenido de magnesia, cementos de esquisto, cementos ácidos/básicos, cementos de cenizas volantes, sistemas de cemento de zeolita, sistemas de cemento de polvo de horno, cementos microfinos, cementos de metacaolín, cementos de piedra pómez/cal, cementos de sílice y cualquier combinación de estos.

[0049] Las "cenizas volantes" pueden ser de cualquier grado, incluso las clasificadas como cenizas volantes de Clase C, Clase F o Clase N 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.

[0050] "Polvo de horno", como se usa esa expresión en la presente, se refiere a un material sólido generado como subproducto del calentamiento de ciertos materiales en hornos. La expresión "polvo de horno", como se usa en la presente, pretende incluir el polvo de horno elaborado como se describe en la presente y formas equivalentes de polvo de horno. Según su fuente, el polvo de horno puede exhibir propiedades cementosas, ya que puede fraguar y endurecerse en presencia de agua. Los ejemplos de polvos de horno adecuados incluyen polvo de horno de

cemento, polvo de horno de cal y combinaciones de estos. El polvo de horno de cemento puede generarse como un subproducto de la producción de cemento que se elimina de la corriente de gas y se recolecta, por ejemplo, en un colector de polvo. Por lo general, se recolectan grandes cantidades de polvo de horno de cemento en la producción de cemento que comúnmente se desecha como residuos. El análisis químico del polvo de horno de cemento de diversos fabricantes de cemento varía en función de una serie de factores, que incluyen la alimentación de horno particular, la eficacia de la operación de producción de cemento y los sistemas de recolección de polvo asociados. El polvo de horno de cemento generalmente puede incluir una variedad de óxidos, tales como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O y K_2O . El análisis químico del polvo de horno de cal de diversos fabricantes de cal varía en función de varios factores, incluso la alimentación de piedra caliza o caliza dolomítica particular, el tipo de horno, el modo de funcionamiento del horno, la eficacia de la operación de producción de cal y los sistemas de recolección de polvo asociados. El polvo de horno de cal generalmente puede incluir cantidades variables de cal libre y magnesio, piedra caliza y/o caliza dolomítica libre y una variedad de óxidos, tales como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O y K_2O , y otros componentes, tales como cloruros. El polvo de horno de cemento puede incluir una alimentación de horno parcialmente calcinada que se elimina de la corriente de gas y se recolecta en un colector de polvo durante la elaboración del cemento. El análisis químico del CKD de diversos fabricantes de cemento varía en función de diversos factores, que incluyen la alimentación de horno particular, la eficacia de la operación de producción de cemento y los sistemas de recolección de polvo asociados. El CKD generalmente puede comprender una variedad de óxidos, tales como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O y K_2O . El CKD y/o polvo de horno de cal puede incluirse en ejemplos de la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad adecuada para una aplicación particular.

[0051] La escoria es generalmente un subproducto granulado de alto horno de la producción de hierro fundido, que incluye las impurezas oxidadas que se encuentran en minerales de hierro. La lechada de cemento modificada con resina puede incluir además perlita. La perlita es un mineral y generalmente se refiere a una roca sílice amorfa volcánica natural que incluye principalmente dióxido de silicio y óxido de aluminio. La perlita puede ser expandida y/o no expandida según sea adecuado para una aplicación particular. La perlita expandida o no expandida también se puede moler, por ejemplo. La lechada de cemento modificada con resina puede incluir además esquisto. Puede ser adecuada una variedad de esquistos, incluso los que incluyen silicio, aluminio, calcio y/o magnesio. Los ejemplos de esquistos adecuados incluyen esquistos vitrificados y/o esquistos calcinados.

[0052] Las zeolitas son generalmente minerales de aluminosilicato porosos que pueden ser naturales o sintéticos. 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, el término "zeolita" se refiere a todas las formas naturales y sintéticas de zeolita.

[0053] La sílice amorfa es generalmente un subproducto de un proceso de producción de ferrosilicio, en donde la sílice amorfa puede formarse mediante la

oxidación y condensación de subóxido de silicio gaseoso, SiO , que se forma como un intermediario durante el proceso. La sílice amorfa como material cementoso complementario se puede incluir en las formas de realización para aumentar la resistencia a la compresión del cemento.

[0054] Como se usa en la presente, se entenderá que la expresión "cal hidratada" significa hidróxido de calcio. En algunas formas de realización, 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 ejemplos de la lechada de cemento modificada con resina, por ejemplo, para formar una composición hidráulica con los componentes cementosos complementarios. Por ejemplo, la cal hidratada puede incluirse en una relación en peso de material cementoso complementario con respecto a cal hidratada de alrededor de 10:1 a alrededor de 1:1 o de 3:1 a alrededor de 5:1. En algunos ejemplos, la cal hidratada puede estar presente en una cantidad que varía entre cualquiera de y/o que incluye cualquiera de alrededor de 10 %, alrededor de 20 %, alrededor de 40 %, alrededor de 60 % o alrededor de 80 % en peso de la lechada de cemento modificada con resina.

[0055] La cal puede estar presente en la lechada de cemento modificada con resina en varias formas, incluso como óxido de calcio y/o hidróxido de calcio o como producto de reacción, tal como cuando el cemento Portland reacciona con agua. Alternativamente, la cal puede incluirse en la lechada de cemento modificada con resina según la cantidad de sílice en la lechada de cemento modificada con resina. Se puede diseñar una lechada de cemento modificada con resina para que tenga una relación en peso diana de cal con respecto a sílice. La relación diana de cal con respecto a sílice puede ser una relación molar, relación molar o cualquier otra forma equivalente para expresar una cantidad relativa de sílice con respecto a cal. Se puede seleccionar cualquier relación en peso diana de cal con respecto a sílice adecuada, incluso de alrededor de 10/90 de cal con respecto a sílice en peso a alrededor de 40/60 de cal con respecto a sílice en peso. Alternativamente, de alrededor de 10/90 de cal con respecto a sílice en peso a alrededor de 20/80 de cal con respecto a sílice en peso, de alrededor de 20/80 de cal con respecto a sílice en peso a alrededor de 30/70 de cal con respecto a sílice en peso, o de alrededor de 30/70 de cal con respecto a sílice en peso a alrededor de 40/63 de cal con respecto a sílice en peso.

[0056] Cuando se utilizan, uno o más de los materiales cementosos complementarios mencionados anteriormente pueden estar presentes en la lechada de cemento modificada con resina. Por ejemplo, entre otros, uno o más materiales cementosos complementarios pueden estar presentes en una cantidad de alrededor de 0,1 % a alrededor de 80 % en peso de la lechada de cemento modificada con resina. Por ejemplo, la perlita puede estar presente en una cantidad que varía entre cualquiera de y/o que incluye cualquiera de alrededor de 0,1 %, alrededor de 10 %, alrededor de 20 %, alrededor de 30 %, alrededor de 40 %, alrededor de 50 %, alrededor de 60 %, alrededor de 70 % o alrededor de 80 % en peso de la lechada de cemento modificada con resina.

[0057] Otros aditivos adecuados para su uso de acuerdo con la presente divulgación

se pueden incluir en las formas de realización de la lechada de cemento modificada con resina. Los ejemplos de tales aditivos incluyen, entre otros: agentes densificantes, 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 formadores de espuma, aditivos tixotrópicos, aditivos poliméricos, arcilla modificada organofílicamente, bentonina, tierra de diatomea, gilsonita, carragenanos de escleroglucano, goma xantana, goma welan, goma de diutano, celulosas, hidroxietilcelulosas, polímeros de acrilamida, copolímeros de ácido acrílico-acrilamida, copolímeros de acrilamida y combinaciones de estos. En formas de realización, uno o más de estos aditivos pueden agregarse a la lechada de cemento modificada con resina después del almacenamiento, pero antes de la colocación de una lechada de cemento modificada con resina en una formación de almacenamiento subterráneo de captura de carbono. En algunos ejemplos, la lechada de cemento modificada con resina puede incluir además un dispersante. Los ejemplos de dispersantes adecuados incluyen, entre otros, dispersantes a base de formaldehído sulfonado (por ejemplo, condensado de formaldehído de acetona sulfonado) o dispersantes de éter policarboxilado. En algunos ejemplos, el dispersante puede incluirse en la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad en el rango de alrededor de 0,01 % a alrededor de 5 % en peso de los materiales cementosos. En ejemplos específicos, el dispersante puede estar presente en una cantidad que varía entre cualquiera de y/o que incluye cualquiera de alrededor de 0,01 %, alrededor de 0,1 %, alrededor de 0,5 %, alrededor de 1 %, alrededor de 2 %, alrededor de 3 %, alrededor de 4 % o alrededor de 5 % en peso de un cemento, una lechada o componentes cementosos. En algunas formas de realización, los aditivos de suspensión pueden incluirse en cualquier cantidad adecuada, que incluye en un punto en un rango de alrededor de 0,1 % a alrededor de 5 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, de alrededor de 0,1 % a alrededor de 1 % en volumen, de alrededor de 1 % a alrededor de 3 % en volumen, de alrededor de 3 % a alrededor de 5 % en volumen o cualquier rango intermedio.

[0058] En algunos ejemplos, un aditivo puede comprender un solvente para reducir la viscosidad de la lechada de cemento modificada con resina para facilitar la manipulación, mezcla y transferencia. En general, cualquier solvente que sea compatible con una resina curable y que logre el efecto de viscosidad deseado puede ser adecuado para su uso en una lechada de cemento modificada con resina. Los solventes adecuados pueden incluir, entre otros, polietilenglicol, lactato de butilo, dipropilenglicol metil éter, dipropilenglicol dimetil éter, dimetil formamida, dietilenglicol metil éter, etilenglicol butil éter, dietilenglicol butil éter, carbonato de propileno, d'limoneno, metil ésteres de ácido graso y combinaciones de estos. La selección de un solvente adecuado puede depender de la resina curable seleccionada. En algunos ejemplos, la cantidad de solvente utilizado en una lechada de cemento modificada con resina puede estar en el rango de alrededor de 0,1 % a alrededor de 30 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, el solvente puede estar presente en una cantidad de alrededor de

0,1 % a alrededor de 10 %, de alrededor de 10 % a alrededor de 20 % o de alrededor de 20 % a alrededor de 30 % en volumen de una lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, una lechada de cemento modificada con resina se puede calentar para reducir su viscosidad, en lugar de, o además de, la utilización de un solvente.

[0059] En algunos ejemplos, un aditivo puede incluir un retardador de cemento. Una amplia variedad de retardadores de cemento puede ser adecuada para su uso en las lechadas de cemento modificadas con resina. Por ejemplo, el retardador de cemento puede comprender ácidos fosfónicos, tales como ácido etilendiaminotetra(metilenfosfónico), ácido dietilentriaminopenta(metilenfosfónico), etc.; lignosulfonatos, tales como lignosulfonato de sodio, lignosulfonato de calcio, etc.; sales, tales como sulfato estano, acetato de plomo, fosfato de calcio monobásico, ácidos orgánicos, tales como ácido cítrico, ácido tartárico, etc.; derivados de celulosa, tales como hidroxietilcelulosa (HEC) y carboximetilhidroxietilcelulosa (CMHEC); copolímeros o terpolímeros sintéticos que comprenden grupos sulfonato y ácido carboxílico, tales como copolímeros de acrilamida-ácido acrílico funcionalizados con sulfonato; compuestos de borato, tales como boratos alcalinos, metaborato de sodio, tetraborato de sodio, pentaborato de potasio; derivados de estos o mezclas de estos. Los ejemplos de retardadores de cemento adecuados incluyen, entre otros, derivados de ácido fosfónico. Generalmente, el retardador de cemento puede estar presente en la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad suficiente para retardar el fraguado durante un tiempo deseado. En algunos ejemplos, el retardador de cemento puede estar presente en la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad en el rango de alrededor de 0,01 % a alrededor de 10 % en peso de los materiales cementosos. En ejemplos específicos, el retardador de cemento puede estar presente en una cantidad que varía entre cualquiera de y/o que incluye cualquiera de alrededor de 0,01 %, alrededor de 0,1 %, alrededor de 1 %, alrededor de 2 %, alrededor de 4 %, alrededor de 6 %, alrededor de 8 % o alrededor de 10 % en peso de un cemento, una lechada o componentes cementosos.

[0060] En algunos ejemplos, un aditivo puede incluir un agente de acoplamiento de silano. El agente de acoplamiento de silano se puede utilizar, entre otras cosas, como mediador para ayudar a unir una resina a la superficie de la formación subterránea y/o la superficie del pozo. Ejemplos de agentes de acoplamiento de silano adecuados incluyen, entre otros, N-2-(aminoetil)-3-aminopropiltrimetoxisilano; 3-glicidoxipropiltrimetoxisilano; gamma-aminopropiltriethoxisilano; N-beta-(aminoetil)-gamma-aminopropiltrimetoxisilano; aminoetil-N-beta-(aminoetil)-gamma-aminopropil-trimetoxisilano; gamma-ureidopropil-triethoxisilano; beta-(3-4 epoxi-ciclohexil)-etil-trimetoxisilano; gamma-glicidoxipropiltrimetoxisilano; viniltriclorosilano; viniltris (beta-metoxietoxi) silano; viniltriethoxisilano; viniltrimetoxisilano; 3-metacriloxipropiltrimetoxisilano; beta-(3,4 epoxiciclohexil)-etiltrimetoxisilano; r-glicidoxipropiltrimetoxisilano; r-glicidoxipropilmetildietoxisilano; N-beta-(aminoetil)-r-aminopropil-trimetoxisilano; N-beta-(aminoetil)-r-aminopropilmetildietoxisilano; 3-aminopropil-triethoxisilano; N-fenil-r-aminopropiltrimetoxisilano; r-mercaptopropiltrimetoxisilano; r-

cloropropiltrimetoxisilano; viniltriclorosilano; viniltris (beta-metoxietoxi) silano; viniltrimetoxisilano; r-metacriloxipropiltrimetoxisilano; beta-(3,4 epoxiciclohexil)-etiltrimetoxisilano; r-glicidoxipropiltrimetoxisilano; r-glicidoxipropilmetilidietoxisilano; N-beta-(aminoetil)-r-aminopropiltrimetoxisilano; N-beta-(aminoetil)-r-aminopropilmetildimetoxisilano; r-aminopropiltriethoxisilano; N-fenil-r-aminopropiltrimetoxisilano; r-mercaptopropiltrimetoxisilano; r-cloropropiltrimetoxisilano; N[3-(trimetoxisilil)propil]-etilenediamina; silanos sustituidos donde una o más de las sustituciones contienen un grupo funcional diferente; y combinaciones de estos. El agente de acoplamiento de silano puede incluirse como un aditivo o como un componente del endurecedor.

[0061] Las lechadas de cemento modificadas con resina generalmente deben tener una densidad adecuada para una aplicación particular. A modo de ejemplo, la lechada de cemento modificada con resina puede tener una densidad en el rango de alrededor de 4 libras por galón ("lbm/gal") (479 kg/m^3) a alrededor de 20 lbm/gal (2396 kg/m^3). En ciertas formas de realización, la lechada de cemento modificada con resina puede tener una densidad en el rango de alrededor de 8 lbm/gal (958 kg/m^3) a alrededor de 17 lbm/gal (2037 kg/m^3) o alrededor de 8 lbm/gal (958 kg/m^3) a alrededor de 14 lbm/gal (1677 kg/m^3). Los ejemplos de las lechadas de cemento modificadas con resina pueden ser espumados o no espumados o pueden comprender otros medios para reducir sus densidades, tales como microesferas huecas, microesferas elásticas de baja densidad u otros aditivos reductores de densidad conocidos en la técnica.

[0062] En algunos ejemplos, las lechadas de cemento modificadas con resina pueden fraguar para tener una resistencia a la compresión deseable. La resistencia a la compresión es generalmente la capacidad de un material o estructura para resistir fuerzas de empuje dirigidas axialmente. La resistencia a la compresión puede medirse en un momento específico después de que se haya activado la lechada de cemento modificada con resina y la composición resultante se mantenga en condiciones de temperatura y presión específicas. La resistencia a la compresión se puede medir a través de métodos destructivos o no destructivos. 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 se calcula a partir de la carga de falla dividida por el área de sección transversal que resiste la carga y se informa en unidades de libra-fuerza por pulgada cuadrada (psi). Los métodos no destructivos pueden emplear un analizador de cemento ultrasónico UCA™, disponible a través de Fann Instrument Company, Houston, TX. Los valores de resistencia a la compresión pueden determinarse de acuerdo con API RP 10B-2, *Recommended Practice for Testing Well Cements*, primera edición, julio de 2005.

[0063] A modo de ejemplo, las lechadas de cemento modificadas con resina pueden desarrollar una resistencia a la compresión de 24 horas en el rango de alrededor de 50 psi (344 kPa) a alrededor de 10000 psi (68947 kPa). Alternativamente, de alrededor de 50 psi (344 kPa) a alrededor de 1000 (6894 kPa), de alrededor de 1000 (6894 kPa) a alrededor de 5000 psi (34473 kPa), de alrededor de 5000 psi (34473 kPa) a alrededor de 10000 psi (68947 kPa) o cualquier rango intermedio. En algunos

ejemplos, la lechada de cemento modificada con resina puede desarrollar una resistencia a la compresión en 24 horas de al menos alrededor de 50 psi (344 kPa), al menos alrededor de 100 psi (689 kPa), al menos alrededor de 500 psi (3447 kPa), al menos alrededor de 1000 (6894 kPa), al menos alrededor de 5000 psi (34473 kPa), al menos alrededor de 10000 psi (68947 kPa) o más. En algunos ejemplos, los valores de resistencia a la compresión se pueden determinar mediante métodos destructivos o no destructivos a una temperatura que varía de 100°F (37,7 °C) a 200°F (93,3 °C).

[0064] Las lechadas de cemento modificadas con resina divulgadas pueden tener una resistencia mejorada a la carbonatación. Como se usa en la presente, la expresión "resistencia mejorada a la carbonatación" y "barrera resistente a la carbonatación" se puede referir a la propiedad de una sustancia o material que demuestra una mayor resistencia a la penetración de un frente de carbonatación cuando se expone durante un período de tiempo en presencia de dióxido de carbono con respecto a un cemento Portland que consiste en cemento Portland y agua sin resina o endurecedor. Por ejemplo, un "material que tiene una resistencia mejorada a la carbonatación" puede referirse a cualquier composición de material en donde una tasa de penetración de un frente de carbonatación en el material cuando se expone en presencia de un dióxido de carbono a una concentración específica es menor que la tasa de penetración de un frente de carbonatación en un cemento Portland sin resina expuesto a dióxido de carbono a la misma concentración y en las mismas condiciones generales. Alternativamente, la frase se puede referir a cualquier material que, tras la medición mediante el uso de una prueba de fenoltaleína después de un período específico de exposición en dióxido de carbono supercrítico, presenta un color fucsia más fuerte que el que estaría presente si la misma se realizara en un cemento Portland genérico que consiste en cemento Portland y agua en las mismas condiciones o condiciones similares y que tiene el mismo período específico de exposición y concentración.

[0065] Un método para estimar la resistencia a la carbonatación puede incluir estimar la penetración de un frente de carbonatación en una muestra de cemento. Un frente de carbonatación se puede inducir en una muestra de cemento al exponer la muestra de cemento a un entorno de dióxido de carbono y permitir que el dióxido de carbono penetre en la muestra de cemento. El entorno de dióxido de carbono puede incluir dióxido de carbono supercrítico seco, dióxido de carbono supercrítico húmedo, ácido carbónico o cualquier otro entorno de dióxido de carbono adecuado para inducir la carbonatación en la muestra de cemento. El tiempo para la exposición al entorno de dióxido de carbono puede variar de alrededor de 1 día a alrededor de 2 meses. Alternativamente, de alrededor de 1 día a alrededor de 1 semana, de alrededor de 1 semana a alrededor de 1 mes, de alrededor de 1 mes a alrededor de 2 meses o cualquier rango intermedio. No se cree que exista un límite superior de tiempo de exposición que sea inadecuado, ya que generalmente cuanto más tiempo se expone un cemento, más claramente se puede ver el frente de carbonatación. Por lo tanto, puede ser conveniente exponer la muestra de cemento durante cualquier cantidad arbitraria de tiempo para monitorear la progresión del frente de carbonatación. Después de la exposición al entorno de dióxido de carbono,

la muestra de cemento se puede exponer a una solución indicadora de pH capaz de indicar la presencia de un entorno básico, tal como naftolftaleína, rojo cresol, cresolftaleína, timolftaleína, Alizarine Yellow R, carmín de índigo, fenolftaleína o cualquier otro indicador de pH básico adecuado.

[0066] Sin limitarse a la teoría, se cree que la combinación de resinas y endurecedores dentro de la lechada de cemento modificada con resina forma microestructuras poliméricas a través del cemento fraguado y en las superficies externas del cemento fraguado, lo que impide la carbonatación. Por lo tanto, la capacidad del cemento fraguado de impedir la carbonatación puede atribuirse a interacciones estéricas entre las microestructuras poliméricas formadas dentro del cemento modificado con resina y el dióxido de carbono y/o ácido carbónico. Alternativamente, la capacidad puede atribuirse más generalmente a interacciones estéricas entre el sistema de resina-endurecedor y el dióxido de carbono, o entre los productos de reacción de un sistema de resina-endurecedor y el dióxido de carbono. El cemento fraguado se puede caracterizar además por una hidrofobicidad o una capacidad para repeler el agua. Al impedir la carbonatación, el cemento fraguado previene o reduce la acidificación del cemento y, por lo tanto, previene o reduce la protonación tanto del hidrato de silicato de calcio como del hidróxido de calcio por parte del ácido carbónico en el cemento fraguado. El ácido carbónico se puede formar como resultado del gas de CO₂ inyectado o presente naturalmente que entra en contacto con cualquiera de agua libre en la formación, agua atrapada en el cemento hidratado o agua unida químicamente dentro del cemento hidratado. El cemento hidratado puede formar parte de una barrera, sellador o tapón. Por lo tanto, esta prevención o reducción de la protonación del hidrato de silicato de calcio y el hidróxido de calcio por parte del ácido carbónico previene o reduce la formación de carbonato de calcio y bicarbonato de calcio en el cemento y da como resultado una lixiviación minimizada de bicarbonato de calcio hidrosoluble del cemento fraguado. Con el tiempo, la lixiviación reducida de bicarbonato de calcio permite que el cemento fraguado retenga su baja porosidad, mantenga propiedades mecánicas, tales como resistencia a la tracción, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad de Young, y continúe siendo eficaz como barrera, sellador o tapón que separa el dióxido de carbono inyectado en la formación y la atmósfera.

[0067] Las lechadas de cemento modificadas con resina se pueden preparar mediante varios métodos, donde solo algunos de estos se pueden describir explícitamente en la presente. En una forma de realización, una mezcla seca que comprende el cemento hidráulico y cualquier material cementoso y/o aditivo seco adicional se puede preparar en una planta de cemento a granel. En formas de realización en donde la resina y/o el endurecedor están en una fase sólida, la resina y/o el endurecedor de fase sólida pueden incluirse en la mezcla seca. Luego, la mezcla seca se puede mezclar con agua en una mezcladora por lotes o en una mezcladora continua en un sitio de pozo para producir la lechada de cemento modificada con resina que luego puede introducirse en el pozo.

[0068] En formas de realización donde una de las resinas y/o los endurecedores están en una fase líquida, una mezcla seca que comprende cemento hidráulico, materiales cementosos complementarios, aditivos secos y resina y/o endurecedor

que están en una fase sólida, se puede preparar en una planta de cemento a granel. Las resinas y/o los endurecedores líquidos se pueden introducir en el agua utilizada para mezclar con la mezcla seca para formar la lechada de cemento modificada con resina. Alternativamente, los aditivos, las resinas o los endurecedores líquidos se pueden agregar en línea a una mezcla de la mezcla seca y el agua. En algunos ejemplos, una resina y un endurecedor pueden mezclarse por lotes para formar una mezcla de resina que luego puede introducirse en el agua utilizada para mezclar la lechada de cemento modificada con resina, o puede mezclarse en línea con la mezcla seca, o puede mezclarse directamente en una tina de mezcla con el agua y la mezcla seca.

[0069] Después de que se prepara la lechada de cemento modificada con resina, la lechada de cemento modificada con resina puede introducirse en una formación adecuada para CCUS. Una vez que la lechada de cemento modificada con resina se introduce en el pozo de CCUS, se puede permitir que fragüe o se endurezca. La inyección de dióxido de carbono en las regiones de la formación adecuadas para inyección puede tener lugar antes, durante o después de que se permite que la lechada de cemento modificada con resina se endurezca.

[0070] La formación puede comprender cualquier formación adecuada para inyección de dióxido de carbono que incluye, entre otros, formaciones altamente porosas o permeables, formaciones/depósitos agotados, cavernas de sal y similares. Una formación agotada puede caracterizarse, entre otros, por cualquiera de los siguientes: por tener un gradiente de presión de poro bajo, por haberse sometido a reducción de presión de poro, por tener una alta porosidad o permeabilidad, y cualquier combinación de estos.

[0071] Por ejemplo, una formación altamente porosa o permeable y/o formación agotada puede tener una permeabilidad mayor de 0,05 mD (milidarcy), mayor de 0,1 mD, mayor de 0,5 mD, mayor de 0,8 mD, mayor de 1 mD, mayor de 1,5 mD, mayor de 2 mD, mayor de 5 mD, mayor de 10 mD, mayor de 20 mD, mayor de 30 mD, mayor de 40 mD, mayor de 50 mD, mayor de 100 mD, mayor de 200 mD, mayor de 300 mD, mayor de 400 mD, mayor de 450 mD, mayor de 500 mD, mayor de 550 mD, mayor de 600 mD, mayor de 700 mD, mayor de 800 mD o mayor de 1000 mD. En formas de realización, la formación agotada puede tener una permeabilidad en un rango de alrededor de 0,05 mD a alrededor de alrededor de 1000 mD. Alternativamente, en un rango de alrededor de 0,05 mD a alrededor de 0,1 mD, en un rango de alrededor de 0,1 mD a alrededor de 1 mD, en un rango de alrededor de 1 mD a alrededor de 10 mD, en un rango de alrededor de 10 mD a alrededor de 100 mD, en un rango de alrededor de 100 mD a alrededor de 1000 mD o cualquier rango intermedio.

[0072] En formas de realización, una formación altamente porosa o permeable y/o formación agotada puede tener una porosidad mayor de 60 %, mayor de 50 %, mayor de 45 %, mayor de 40 %, mayor de 35 %, mayor de 30 %, mayor de 25 %, mayor de 20 %, mayor de 15 %, mayor de 12 %, mayor de 11 %, mayor de 10 %, mayor de 9 %, mayor de 8 %, mayor de 7 %, mayor de 6 %, mayor de 5 %, mayor de 4 %, mayor de 3 %, mayor de 2,6 %, mayor de 2,4 %, mayor de 2,2 %, mayor de 2 %, mayor de 1,8 %, mayor de 1,6 %, mayor de 1,4 %, mayor de 1,2 %, mayor de

1 %, mayor de 0,8 %, mayor de 0,6 % o mayor de 0,5 %. En formas de realización, la formación agotada puede tener una porosidad en un rango de alrededor de 0,1 % a alrededor de 60 %. Alternativamente, la formación agotada puede tener una porosidad en un rango de alrededor de 0,1 % a alrededor de 1 %, en un rango de alrededor de 1 % a alrededor de 10 %, en un rango de alrededor de 10 % a alrededor de 25 %, en un rango de alrededor de 25 % a alrededor de 60 % o cualquier rango intermedio.

[0073] En formas de realización, una formación altamente porosa o permeable y/o formación agotada puede tener un gradiente de presión de poro menor de 1 kPa/m, menor de 2 kPa/m, menor de 3 kPa/m, menor de 4 kPa/m, menor de 5 kPa/m, menor de 6 kPa/m, menor de 7 kPa/m, menor de 8 kPa/m, menor de 9 kPa/m, menor de 9,5 kPa/m, menor de 10 kPa/m, menor de 10,5 kPa/m, menor de 11 kPa/m, menor de 12 kPa/m, menor de 13 kPa/m, menor de 14 kPa/m, menor de 15 kPa/m, menor de 16 kPa/m, menor de 17 kPa/m, menor de 18 kPa/m, menor de 19 kPa/m, menor de 20 kPa/m, menor de 21 kPa/m, menor de 22 kPa/m o menor de 23 kPa/m. Alternativamente, una formación agotada puede tener un gradiente de presión de poro menor de 4,33 psi/ft, menor de 4,65 psi/ft, menor de 4,2 psi/ft, menor de 4,1 psi/ft, menor de 4 psi/ft, menor de 3,8 psi/ft, menor de 3,6 psi/ft o menor de 3,3 psi/ft. En formas de realización, la formación agotada puede tener un gradiente de presión de poro en un rango de 1 kPa/m a 30 kPa/m. Alternativamente, la formación agotada puede tener un gradiente de presión de poro en un rango de alrededor de 1 kPa/m a alrededor de 10 kPa/m, en un rango de alrededor de 10 kPa/m a alrededor de 20 kPa/m, en un rango de alrededor de 20 kPa/m a alrededor de 30 kPa/m o cualquier rango intermedio.

[0074] Las formaciones agotadas también se pueden caracterizar por haber tenido una reducción de presión de poro, en donde la reducción de presión de poro se puede referir a una diferencia entre la presión del depósito de la formación antes y después del agotamiento. La reducción de presión de poro también se puede referir a una diferencia entre mediciones o estimaciones de la presión del depósito de la formación en cualquier punto durante la producción de hidrocarburos y el abandono o la finalización de la producción. La reducción de presión de poro también se puede referir a una diferencia entre la presión del depósito de la formación en dos puntos cualesquiera durante la producción de hidrocarburos. La reducción de presión de poro también se puede referir a una reducción de presión del depósito a lo largo de la vida útil de un campo, depósito o pozo.

[0075] En formas de realización, una formación altamente porosa o permeable y/o formación agotada puede tener una presión de poro total menor de 1 MPa, menor de 5 MPa, menor de 10 MPa, menor de 20 MPa, menor de 30 MPa, menor de 39 MPa, menor de 39,5 MPa, menor de 40 MPa, menor de 50 MPa o menor de 150 MPa. En formas de realización, la formación agotada puede tener una presión de poro total en un rango de alrededor de 0,001 Mpa a alrededor de 150 MPa. Alternativamente, la formación agotada puede tener una presión de poro total en un rango de alrededor de 0,001 Mpa a alrededor de 0,01 MPa, en un rango de alrededor de 0,01 Mpa a alrededor de 0,1 MPa, en un rango de alrededor de 0,1 Mpa a alrededor de 1 MPa, en un rango de alrededor de 1 Mpa a alrededor de 10

MPa, en un rango de alrededor de 10 Mpa a alrededor de 100 MPa, en un rango de alrededor de 100 Mpa a alrededor de 150 MPa o cualquier rango intermedio.

[0076] En formas de realización, una formación altamente porosa o permeable y/o formación agotada puede tener un radio de garganta de poro promedio mayor de 0,0001 mm, mayor de 0,001 mm, mayor de 0,002 mm, mayor de 0,003 mm, mayor de 0,004 mm, mayor de 0,005 mm, mayor de 0,006 mm, mayor de 0,007 mm, mayor de 0,008 mm, mayor de 0,009 mm, mayor de 0,01 mm, mayor de 0,02 mm, mayor de 0,03 mm, mayor de 0,04 mm o mayor de 0,05 mm. En formas de realización, la formación agotada puede tener un radio de garganta de poro promedio en un rango de alrededor de 0,0001 mm a alrededor de 0,01mm. Alternativamente, la formación agotada puede tener un radio de garganta de poro promedio en un rango de alrededor de 0,0001 mm a alrededor de 0,0005 mm, en un rango de alrededor de 0,0005 mm a alrededor de 0,001 mm, en un rango de alrededor de 0,001 mm a alrededor de 0,01 mm o cualquier rango intermedio.

[0077] En formas de realización, una formación altamente porosa o permeable y/o formación agotada puede tener una reducción de presión de poro que es de al menos 0,1 MPa, al menos 0,5 MPa, al menos 1 MPa, al menos 1,5 MPa, al menos 1,8 MPa, al menos 2 MPa, al menos 5 MPa, al menos 10 MPa, al menos 15 MPa, al menos 20 MPa, al menos 25 MPa, al menos 30 MPa, al menos 35 MPa, al menos 40 MPa, al menos 50 MPa o al menos 60 MPa. En otros ejemplos, la formación agotada puede haber tenido una reducción de presión de poro que es de al menos 0,01 kPa/m, al menos 0,1 kPa/m, al menos 0,2 kPa/m, al menos 0,3 kPa/m, al menos 0,4 kPa/m, al menos 0,45 kPa/m, al menos 0,5 kPa/m, al menos 0,6 kPa/m, al menos 0,7 kPa/m, al menos 0,8 kPa/m, al menos 0,9 kPa/m, al menos 1 kPa/m, al menos 2 kPa/m, al menos 3 kPa/m, al menos 4 kPa/m, al menos 5 kPa/m, al menos 6 kPa/m, al menos 7 kPa/m, al menos 8 kPa/m, al menos 9 kPa/m, al menos 9,5 kPa/m o al menos 10 kPa/m. En formas de realización, la formación agotada puede tener una reducción de presión de poro en un rango de alrededor de 0,1 MPa a 60 MPa. Alternativamente, la formación agotada puede tener una reducción de presión de poro en un rango de alrededor de 0,1 MPa a 1 MPa, en un rango de alrededor de 1 MPa a 10 MPa, en un rango de alrededor de 10 MPa a 25 MPa, en un rango de alrededor de 25 MPa a 60 MPa o cualquier rango intermedio.

[0078] Con referencia ahora a la Figura 1, se describirá ahora la preparación de una lechada de cemento modificada con resina de acuerdo con formas de realización de ejemplo. La Figura 1 ilustra un sistema 100 para la preparación de una lechada de cemento modificada con resina y el suministro posterior de la composición a un pozo de acuerdo con ciertas formas de realización. Como se muestra, la lechada de cemento modificada con resina se puede mezclar en un equipo de mezcla 104, tal como una mezcladora de chorro, una mezcladora de recirculación o una mezcladora por lotes, por ejemplo, y luego se bombea a través de un equipo de bombeo 106 al pozo. En algunas formas de realización, el equipo de mezcla 104 y el equipo de bombeo 106 se pueden disponer en uno o más camiones mezcladores de cemento. En algunas formas de realización, puede usarse una mezcladora de chorro, por ejemplo, para mezclar continuamente los materiales termoestables con el agua, a medida que se bombea al pozo. En algunas formas de realización, se puede utilizar

una mezcladora de recirculación y/o una mezcladora por lotes para mezclar los componentes de la lechada de cemento modificada con resina, y uno o más componentes de la composición se pueden agregar a la mezcladora antes de bombear las lechadas de cemento modificadas con resina al fondo de pozo. Además, las unidades de tipo mezcladora por lotes para la lechada se pueden conectar en línea con un tanque separado que contiene uno o más componentes de la composición de lechada de cemento modificada con resina. Luego, el uno o más componentes se pueden alimentar en línea con una mezcla a medida que se bombea fuera de la unidad mezcladora.

[0079] A continuación, se describirá una técnica de ejemplo para usar una lechada de cemento modificada con resina en una operación de cementación de CCUS con referencia a las Figuras 2 y 3. La Figura 2 ilustra un equipo de superficie 200 que se puede utilizar en la colocación de una lechada de cemento modificada con resina de acuerdo con ciertas formas de realización. Debe observarse que, si bien la Figura 2A representa en general una operación en tierra, sin embargo, los principios descritos en la presente son igualmente aplicables a operaciones submarinas que emplean torres de perforación y plataformas flotantes o situadas en el mar, sin apartarse del alcance de la divulgación. Como se ilustra en la Figura 2, el equipo de superficie 200 puede incluir una unidad de cementación 210, que puede incluir uno o más camiones mezcladores de cemento 205. La unidad de cementación 210 puede incluir un equipo de mezcla 104 y un equipo de bombeo 106 (por ejemplo, la Figura 1). La unidad de cementación 210 puede bombear una lechada de cemento modificada con resina 220 a través de un tubo de alimentación 230 y hasta un cabezal de cementación 225 que transporta la lechada de cemento modificada con resina 220 al fondo de pozo.

[0080] Con referencia a la Figura 3, la lechada de cemento modificada con resina 220 se puede colocar en una formación subterránea 300 que contiene una zona de inyección de dióxido de carbono 330. Como se ilustra, un pozo 305 se puede perforar en la formación subterránea 300. El pozo 305 puede comprender el pozo de CCUS. En la presente, un pozo de CCUS puede caracterizarse como que se superpone o se interseca con la zona de inyección de dióxido de carbono 330 de la formación subterránea 300 y una roca impermeable 324. Si bien el pozo 305 se muestra como extendido generalmente de manera vertical en la formación subterránea 300, los principios descritos en la presente también se pueden aplicar a pozos que se extienden en un ángulo a través de la formación subterránea 300, tales como pozos horizontales e inclinados. Como se ilustra, el pozo 305 comprende paredes 306. En la forma de realización ilustrada, se insertó una tubería de revestimiento 308 en el pozo 305. La tubería de revestimiento 308 se puede cementar a las paredes 306 del pozo mediante una vaina de cemento 310. En la forma de realización ilustrada, uno o más conductos adicionales (por ejemplo, tubería de revestimiento intermedia, tubería de revestimiento de producción, tuberías de revestimiento cortas, etc.) mostrados aquí como la tubería de revestimiento 312 también se pueden disponer en el pozo 305. Como se ilustra, hay un anillo de pozo 314 formado entre la tubería de revestimiento 312 y las paredes 306 del pozo 305 y/o la tubería de revestimiento 308. Se pueden fijar uno o más

centralizadores 316 a la tubería de revestimiento 312, por ejemplo, para centralizar la tubería de revestimiento 312 en el pozo 305 antes y durante una operación de cementación.

[0081] Con referencia continua a la 3, la lechada de cemento modificada con resina 220 se puede bombear hacia el interior de la tubería de revestimiento 312. Se puede permitir que la lechada de cemento modificada con resina 220 fluya hacia abajo por el interior de la tubería de revestimiento 312 a través de la zapata de revestimiento 320 en la parte inferior de la tubería de revestimiento 312 y suba alrededor de la tubería de revestimiento 312 hacia el anillo de pozo 314. Se puede permitir que la lechada de cemento modificada con resina 220 fragüe en el anillo de pozo 314, por ejemplo, para formar una vaina de cemento que soporte y coloque la tubería de revestimiento 312 en el pozo 305. También se pueden utilizar otras técnicas para la introducción de la lechada de cemento modificada con resina 220. A modo de ejemplo, se pueden usar técnicas de circulación inversa que incluyen la introducción de la lechada de cemento modificada con resina 220 en la formación subterránea 300 a través del anillo de pozo 314 en lugar de a través de la tubería de revestimiento 312. A medida que se introduce, la lechada de cemento modificada con resina 220 puede desplazar otros fluidos 318, tales como fluidos de perforación y/o fluidos espaciadores, que pueden estar presentes en el interior de la tubería de revestimiento 312 y/o el anillo de pozo 314. Al menos una porción de los fluidos 318 desplazados puede salir del anillo de pozo 314 a través de una línea de flujo 235 y depositarse, por ejemplo, en uno o más pozos de retención 240 (por ejemplo, un pozo de lodo). Se puede utilizar un fluido de desplazamiento 322 para empujar la lechada de cemento modificada con resina 220 hacia el anillo 314.

[0082] La lechada de cemento modificada con resina puede endurecerse para formar un cemento fraguado. El cemento fraguado se puede superponer o intersecar con la zona de inyección de dióxido de carbono 330 de la formación subterránea 300 y una roca impermeable 324. La roca impermeable 324 se refiere a un tipo de roca más resistente que se superpone con un tipo de roca menos resistente. La resistencia en esta definición se puede referir a una permeabilidad más baja y/o una porosidad más baja del tipo de roca. De otro modo, la resistencia se puede referir a una mayor impenetrabilidad de dióxido de carbono dispuesto dentro de una región de una formación debajo de la roca impermeable. En algunas formas de realización, un ensamblaje de colgador de tubería de revestimiento corta se puede disponer a cualquier profundidad dentro del pozo, incluso a una profundidad igual o menor que la vaina de cemento 310. Un ensamblaje de colgador de tubería de revestimiento corta puede comprender componentes mecánicos, tales como un receptáculo de pozo pulido de parte superior de tubería de revestimiento corta, también denominado manguito de anclaje, un empacador de parte superior de tubería de revestimiento corta o manguito de ajuste de tubería de revestimiento corta, un manguito de ajuste, un colgador de tubería de revestimiento corta, un sistema de desplazamiento de cemento, un niple de sellado, herramientas de introducción de colgador de tubería de revestimiento corta, collares de colocación, acoplamientos de fraguado superior, adaptadores de servicio y cualquier combinación de estos. El ensamblaje de colgador de tubería de revestimiento corta

también puede comprender componentes hidráulicos.

[0083] En algunas formas de realización, una lechada de cemento modificada con resina de acuerdo con la presente divulgación se puede utilizar como sellador anular o material de taponamiento que tiene una resistencia mejorada a la carbonatación. En algunas formas de realización, el material de taponamiento o sellador anular se puede disponer dentro de la tubería de revestimiento 312 o el anillo 314 de la Figura 3. En algunas formas de realización, la lechada de cemento modificada con resina puede formar una barrera entre el dióxido de carbono inyectado en la zona de inyección de dióxido de carbono 330 para aislar la tubería de revestimiento 312 de la zona de inyección de dióxido de carbono 330. En algunas formas de realización, la barrera puede ser al menos parcialmente impenetrable o eficazmente impenetrable para la carbonatación o tener susceptibilidad reducida a la penetración de un frente de carbonatación en una matriz del cemento fraguado en comparación con un cemento Portland que consiste en cemento Portland y agua sin una resina o un endurecedor. En algunas formas de realización, la barrera puede ser al menos parcialmente impenetrable o tener susceptibilidad reducida a la lixiviación, tal como lixiviación en comparación con un cemento Portland que consiste en cemento Portland y agua sin una resina o un endurecedor. La impenetrabilidad o susceptibilidad reducida ya sea a la penetración de un frente de carbonatación o la lixiviación puede ser atribuible a cualquiera de un componente individual de la lechada de cemento modificada con resina, una combinación de componentes en la composición, microestructuras poliméricas formadas después de que se permite que la composición fragüe y cualquier combinación de estos.

[0084] Con referencia nuevamente a la Figura 3, en algunas formas de realización, se puede introducir dióxido de carbono en la zona de inyección de dióxido de carbono 330 a través de la tubería de revestimiento 312 en el pozo 305 y en fracturas, huecos o espacios dispuestos dentro de la formación subterránea 300. Para utilizar ejemplos no limitativos, la formación subterránea 300 puede contener hidrocarburos, estar agotada o parcialmente agotada. Además de su significado conocido generalmente, en la presente, "agotada" se refiere a una formación que antes contenía hidrocarburos y luego se caracterizó por una reducción en su capacidad o calidad de producción de hidrocarburos. Las formaciones pueden agotarse como consecuencia de una operación de producción de hidrocarburos. Las formaciones agotadas se pueden caracterizar por tener bajas presiones de poro y/o permeabilidades altas y/o porosidades altas, lo que las hace ideales como zonas de inyección para dióxido de carbono. Alternativamente, la lechada de cemento modificada con resina se puede utilizar en métodos donde el dióxido de carbono se introduce en una caverna de sal que tiene condiciones adecuadas para la inyección de dióxido de carbono.

[0085] En ejemplos de cementación correctiva, se puede utilizar una lechada de cemento modificada con resina, por ejemplo, en una operación de cementación por compresión o en la colocación de tapones de cemento. A modo de ejemplo, la lechada de cemento modificada con resina se puede colocar en un pozo para tapar huecos, tales como agujeros o grietas en las sartas de tubería; agujeros, grietas, espacios o canales en la vaina; y espacios muy pequeños (comúnmente

denominados "microanillos") entre la vaina y la superficie exterior de la tubería o la pared del pozo. Alternativamente, la lechada de cemento modificada con resina se puede colocar en un pozo para tapar zonas permeables o porosas en la formación o para tapar empaques de grava.

[0086] Las Figuras 4 y 5 ilustran métodos de cementación correctiva o secundaria. Con referencia a la Figura 4, se muestra una sección transversal parcial de un pozo de producción convencional 305 que tiene una tubería de revestimiento 312 sometida a cementación primaria. La vaina de cemento protectora 410 alrededor de la tubería de revestimiento 312 puede tener defectos causados potencialmente por una variedad de problemas, tales como un curado inadecuado de la vaina de cemento protectora 410 mientras se estaba formando. Alternativamente, la cementación primaria puede haber tenido éxito, pero debido a temperaturas y presiones adversas dentro de la formación subterránea 300, la tubería de revestimiento 312 y/o la vaina protectora de cemento 410 que rodean la tubería de revestimiento 312 pueden formar grietas u otros tipos de fugas de revestimiento pequeñas 400. Las pequeñas fugas de revestimiento 400 pueden ser problemáticas ya que pueden facilitar la introducción de fluidos y/o gases indeseables en la tubería de revestimiento 312, tales como gas de dióxido de carbono inyectado en la formación. Como se muestra en la Figura 4, una pequeña fuga de revestimiento 400 se formó en la vaina de cemento protectora 410 y la tubería de revestimiento 312, lo que potencialmente permite la introducción de fluidos o gases indeseables en el interior de la tubería de revestimiento 312.

[0087] Con referencia ahora a la Figura 5, una pequeña fuga de revestimiento 400 se puede rellenar o tapar con una lechada de cemento modificada con resina 220. Un tapón 500 (el tapón 500 puede ser cualquier tipo de tapón, por ejemplo, tapón puente, etc.) puede colocarse inicialmente de manera adyacente a la pequeña fuga de revestimiento 400 y debajo de esta para formar una barrera a fin de impedir que la lechada de cemento modificada con resina 220 fluya hacia abajo por el pozo 305 y, por lo tanto, permitir que la lechada de cemento modificada con resina 220 de la presente divulgación rellene las pequeñas perforaciones 400 en la tubería de revestimiento 312 y la vaina de cemento protectora 410. Como se muestra en la Figura 5, la tubería 505 (por ejemplo, tubería flexible, tubería de perforación, etc.) se puede bajar al pozo 305. Se puede bombear un primer fluido espaciador 318 al interior del pozo 305 a través de la tubería 505 y permitir que fluya hacia abajo por el interior de la tubería 505 y hacia la sección bloqueada del pozo 305 creada por el tapón 500. Una porción del primer fluido espaciador 318 puede fluir luego a través de la pequeña fuga de revestimiento 400 mientras que otra porción puede permanecer en el anillo de pozo 314. Después de bombear el primer fluido espaciador 318 a través de la tubería 305, se puede bombear la lechada de cemento modificada con resina 220 a través de la tubería 505. La lechada de cemento modificada con resina 220 puede bombearse hacia abajo por el interior de la tubería 505 y hacia dentro de la sección bloqueada del pozo 305 creada por el tapón 500. Una porción de la lechada de cemento modificada con resina 220 puede fluir luego a través de la pequeña fuga de revestimiento 400 mientras que otra porción puede permanecer en el anillo de pozo 314. Se puede permitir que la lechada de cemento

modificada con resina 220 fragüe en la pequeña fuga de revestimiento 400 y en una porción del anillo de pozo 314, por ejemplo, para formar una masa endurecida que selle la pequeña fuga de revestimiento 400 para prevenir la migración de fluidos indeseables al interior de la tubería de revestimiento 312. Después de bombear la lechada de cemento modificada con resina 220 en la tubería 505, se puede bombear un segundo fluido espaciador 322 en la tubería 505 y permitir que fluya hacia abajo por el interior de la tubería 505 hacia dentro de la sección bloqueada del pozo 305 creada por el tapón 500 y hacia arriba alrededor de la tubería 505 al interior del anillo de pozo 314. Alternativamente, se puede usar un fluido espaciador o ninguno, y puede que no sea necesario separar la lechada de cemento modificada con resina 220 de otros fluidos introducidos anterior o posteriormente en el pozo 305. Luego, se puede quitar la tubería 505. También se puede quitar el tapón 500. En ejemplos alternativos, el tapón 500 puede permanecer en el pozo 305 y perforarse. Después de retirar la tubería 305, la porción de la lechada de cemento modificada con resina 220 endurecida que queda en el pozo 305 (es decir, la porción que no está en la pequeña fuga de revestimiento 400) luego puede perforarse.

[0088] La Figura 6 describe otro ejemplo para rellenar una fuga de revestimiento 400 con una lechada de cemento modificada con resina 220. Un tapón 500 (el tapón 500 puede ser cualquier tipo de tapón, por ejemplo, tapón puente, etc.) puede colocarse inicialmente de manera adyacente a la fuga de revestimiento 400 y debajo de esta para formar una barrera que pueda permitir el bombeo presurizado de una lechada de cemento modificada con resina 220 de la presente divulgación para rellenar cualquier fuga de revestimiento 400 en la tubería de revestimiento 312 y la vaina de cemento protectora 310. Como se muestra en la Figura 6, la tubería 505 (por ejemplo, tubería flexible, tubería de perforación, etc.) se puede bajar al pozo 305. La tubería 505 se puede unir a un retenedor 600 o se puede insertar en un retenedor 600 ya colocado en el pozo 305. El retenedor 600 puede permitir el bombeo presurizado de la lechada de cemento modificada con resina 220 hacia cualquier pequeña fuga de revestimiento 400. El retenedor 600 debe colocarse de manera adyacente a la fuga de revestimiento 400 que se ha de rellenar con la lechada de cemento modificada con resina 220, y por encima de esta. El retenedor 600 puede ser cualquier tipo de retenedor, por ejemplo, un retenedor de cemento. Después de colocar el tapón 500, la tubería 505 y el retenedor 600, se puede bombear un primer fluido espaciador 318 al interior del pozo 305 a través de la tubería 505 y dejar que fluya hacia abajo por el interior de la tubería 505 y hacia la sección bloqueada del pozo 305 creada por el tapón 500. Una porción del primer fluido espaciador 318 puede fluir luego a través de la fuga de revestimiento 400. Después de bombear el primer fluido espaciador 318 a través de la tubería 505, se puede bombear la lechada de cemento modificada con resina 220 a través de la tubería 505. La lechada de cemento modificada con resina 220 puede bombearse hacia abajo por el interior de la tubería 505 y hacia dentro de la sección bloqueada del pozo 305 creada por el tapón 500. Una porción de la lechada de cemento modificada con resina 220 puede fluir luego a través de la fuga de revestimiento 400 mientras que otra porción puede permanecer en el espacio formado entre el tapón 500 y el retenedor 600. Se puede permitir que la lechada de cemento modificada con resina

220 fragüe en la fuga de revestimiento 400 y en el espacio formado entre el tapón 500 y el retenedor 600. Luego, la lechada de cemento modificada con resina 220 puede endurecerse para formar una masa endurecida que selle la pequeña fuga de revestimiento 400 para impedir la migración de fluidos indeseables al interior de la tubería de revestimiento 312. Después de bombear la lechada de cemento modificada con resina 220 en la tubería 505, se puede bombear un segundo fluido espaciador 322 en la tubería 505 y permitir que fluya hacia abajo por el interior de la tubería 505 hacia dentro de la sección bloqueada del pozo 305 creada por el tapón 500 y hacia el espacio formado entre el tapón 500 y el retenedor 600. Alternativamente, se puede usar un fluido espaciador o ninguno, y puede que no sea necesario separar la lechada de cemento modificada con resina 220 de otros fluidos introducidos anterior o posteriormente en el pozo 305. Luego, se puede quitar la tubería 505. También se puede quitar el tapón 500. En ejemplos alternativos, el tapón 500 puede permanecer en el pozo 305 y perforarse. También se puede quitar el retenedor 600. A la inversa, en ejemplos alternativos, el retenedor 600 puede perforarse. Después de retirar la tubería 505, la porción de la lechada de cemento modificada con resina 220 endurecida que queda en el pozo 305 (es decir, la porción que no está en la pequeña fuga de revestimiento 400) luego puede perforarse.

[0089] La Figura 7 ilustra la inyección de dióxido de carbono 706 en una zona permeable 714 de una formación subterránea. Una zona de inyección de dióxido de carbono 704 está dispuesta en un pozo de CCUS 700. El equipo de superficie 702 se puede disponer en la superficie y puede incluir uno o más camiones, bombas, compresores y/o tanques. El equipo de superficie 702 puede configurarse para suministrar el dióxido de carbono 706 al pozo 700 a través de un cabezal de pozo 724 acoplado de manera fluida al pozo 700. El dióxido de carbono 706 puede ser un gas, líquido, sólido, vapor, fluido supercrítico o cualquier combinación de estos. La presión puede ser suficiente para hacer que el dióxido de carbono 706 penetre la zona de inyección de dióxido de carbono 704 y penetre la zona permeable 714 de la formación. La zona de inyección de dióxido de carbono 704 puede estar dispuesta debajo de una roca impermeable 708. La roca impermeable puede comprender una roca impermeable superpuesta sobre la zona permeable 714. La zona de inyección de dióxido de carbono 704 puede ser permeable y/o altamente porosa. La zona permeable 714 y/o zona de inyección de dióxido de carbono 704 puede formar parte de un depósito de petróleo agotado caracterizado por tener alta porosidad, gradiente de presión de poro bajo, alta permeabilidad o por haber tenido una reducción de presión de poro. Alternativamente, la zona permeable 714 y/o zona de inyección de dióxido de carbono 704 puede formar parte de una caverna de sal o cualquier formación adecuada para la inyección de dióxido de carbono. Una barrera de pozo resistente a la carbonatación 710 se muestra superpuesta con la zona de roca impermeable y con la zona de inyección de dióxido de carbono 704. La barrera de pozo resistente a la carbonatación 710 comprende un cemento fraguado de la resina que contiene lechada de cemento descrita en la presente. Alternativamente, la barrera de pozo resistente a la carbonatación 710 podría superponerse con la zona de inyección de dióxido de carbono 704 y la zapata de una tubería de revestimiento anterior o con un ensamblaje de colgador de tubería

de revestimiento corta dispuesto a cualquier profundidad dentro del pozo 700. La tubería de revestimiento 712 está dispuesta dentro del pozo 700. En algunas formas de realización, un conducto adicional opcional 716 se puede disponer dentro de la tubería de revestimiento 712. En formas de realización que incluyen el conducto adicional opcional 716, se puede inyectar dióxido de carbono 706 en la zona de inyección de dióxido de carbono 704 a través del conducto adicional opcional 716 mediante el equipo de superficie 702. También se puede utilizar una lechada de cemento modificada con resina de acuerdo con la presente divulgación para formar un tapón de cemento resistente a la carbonatación dentro de la tubería de revestimiento 712 y/o un sellador anular resistente a la carbonatación sin la tubería de revestimiento 712 antes, durante o después de la inyección del dióxido de carbono 706 mediante el equipo de superficie 702. La lechada de cemento modificada con resina que se puede utilizar para formar el tapón de cemento resistente a la carbonatación puede fraguar para formar un cemento fraguado dentro de la tubería de revestimiento 701 para evitar que el dióxido de carbono 706 se escape de la formación y/o para ajustar el conducto adicional opcional 716 dentro de la tubería de revestimiento 712. En algunas formas de realización, el tapón resistente a la carbonatación también se puede utilizar para tapar el conducto adicional opcional 716 o para formar una tapa de cemento resistente a la carbonatación dentro del conducto adicional opcional 716. Alternativamente, el conducto adicional opcional 716 puede estar tapado con una tapa removible o no removible para que sea accesible para su uso futuro. El uso futuro puede comprender quitar la capa removible e inyectar dióxido de carbono a través del pozo 700. Alternativamente, el uso futuro puede comprender inyectar dióxido de carbono en el pozo 700 a través de la tubería de revestimiento adicional opcional 716. La tapa puede comprender cualquier material adecuado para el almacenamiento de dióxido de carbono, incluso, entre otros, acero inoxidable, cobre, bronce, latón, acero galvanizado, combinaciones o aleaciones de estos, por ejemplo. La tapa no removible se puede operar para comunicarse de manera fluida con el equipo de superficie 702 para transmitir el dióxido de carbono hacia la formación sin quitar la tapa. Alternativamente, la tapa puede comprender o estar unida a una entrada o salida de un cabezal de pozo de inyección y/o "árbol de navidad" mostrado como el cabezal de pozo 724. El cabezal de pozo de inyección puede funcionar para acoplar de manera fluida el conducto adicional o cabezal de pozo a una o más fuentes de gas de dióxido de carbono. Un sistema de monitoreo puede estar acoplado electrónicamente a una o más válvulas y/o sensores dispuestos dentro de la tapa o sobre esta para monitorear y/o controlar el flujo del gas de dióxido de carbono hacia la formación, tal como al regular electrónicamente una o más posiciones de válvula. La inyección se puede realizar en cualquier momento adecuado después de la colocación del conducto adicional opcional en el pozo, tal como después de 1 día, después de 1 mes, después de 1 año o cualquier otra cantidad de tiempo adecuada. La roca impermeable 708 se muestra como dispuesta a aproximadamente la misma profundidad que la vaina de cemento 714, sin embargo, la roca impermeable 708 se puede disponer a cualquier profundidad por debajo de la vaina de cemento 714. Por ejemplo, la roca impermeable se podría disponer entre la zona de inyección de

dióxido de carbono 704 y la vaina de cemento 714 y superponerse con la zona de inyección de dióxido de carbono 704 y la vaina de cemento 714, con ambas o con ninguna de estas. Se puede inyectar dióxido de carbono 706 en el pozo 700 y almacenarse en la zona permeable 714 de la formación en cualquier momento después, antes o durante la introducción de la lechada de cemento modificada con resina en el pozo 700.

[0090] Las composiciones y métodos de cementación divulgados en la presente pueden afectar directa o indirectamente a uno o más componentes o piezas de equipo asociados con la preparación, el suministro, la recuperación, el reciclado, la reutilización y/o el desecho de las composiciones de cementación. Por ejemplo, las composiciones de cementación pueden afectar directa o indirectamente a uno o más mezcladoras, equipos de mezcla relacionados, pozos de lodo, instalaciones o unidades de almacenamiento, separadores de composición, intercambiadores de calor, sensores, manómetros, bombas, compresores y similares utilizados para generar, almacenar, controlar, regular y/o reacondicionar las composiciones de cementación de ejemplo. Las composiciones de cementación también pueden afectar directa o indirectamente a cualquier equipo de transporte o suministro utilizado para transportar las composiciones de cementación a un sitio de pozo o fondo de pozo tal como, por ejemplo, cualquier tipo de recipientes de transporte, conductos, tuberías, camiones, tubulares y/o tubos utilizados para mover composicionalmente las composiciones de cementación de una ubicación a otra, cualquier tipo de bombas, compresores o motores (por ejemplo, en la parte superior o en el fondo de pozo) utilizados para impulsar el fluido de fracturamiento en movimiento, cualquier tipo de válvulas o juntas relacionadas utilizadas para regular la presión o velocidad de flujo de las composiciones de cementación y cualquier tipo de sensores (es decir, de presión y temperatura), calibradores y/o combinaciones de estos y similares. Las composiciones de cementación divulgadas también pueden afectar directa o indirectamente a los diversos equipos y herramientas de fondo de pozo que pueden entrar en contacto con las composiciones de cementación, tales como, entre otros, tubería de revestimiento de pozo, tubería de revestimiento de pozo corta, sarta de terminación, sarta de inserción, sarta de perforación, tubería bobinada, línea de acero, cableado eléctrico, tubería de perforación, collares de perforación, motores de lodo, motores y/o bombas de fondo de pozo, bombas de cemento, motores y/o bombas montados en la superficie, centralizadores, turbolizadores, raspadores, flotadores (por ejemplo, zapatas, collares, válvulas, etc.), herramientas de registro y equipos de telemetría relacionados, accionadores (por ejemplo, dispositivos electromecánicos, dispositivos hidromecánicos, etc.), manguitos deslizantes, manguitos de producción, tapones, cedazos, filtros, dispositivos de control de flujo (por ejemplo, dispositivos de control de flujo de entrada, dispositivos de control de flujo de entrada autónomos, dispositivos de control de flujo de salida, etc.), acoplamientos (por ejemplo, conexión húmeda electrohidráulica, conexión seca, acoplador inductivo, etc.), líneas de control (por ejemplo, eléctricas, de fibra óptica, hidráulicas, etc.), líneas de vigilancia, brocas y escariadores, sensores o sensores distribuidos, intercambiadores de calor de fondo de pozo, válvulas y dispositivos de

accionamiento correspondientes, sellos de herramientas, empacadores, tapones de cemento, tapones puente y otros dispositivos o componentes de aislamiento de pozo y similares.

[0091] Los sistemas y métodos para utilizar lechadas de cemento modificadas con resina en pozos de CCUS pueden incluir cualquiera de las diversas características de los sistemas y métodos divulgados en la presente, que incluyen una o más de las siguientes declaraciones.

[0092] Declaración 1. Un método que comprende: introducir una lechada de cemento modificada con resina en un pozo que penetra una formación subterránea, en donde la formación subterránea comprende una roca impermeable y una zona de inyección de dióxido de carbono, en donde la lechada de cemento modificada con resina comprende: una resina; un endurecedor; un cemento hidráulico; y agua; y fraguar la lechada de cemento modificada con resina para formar un cemento fraguado, en donde el cemento fraguado forma una barrera resistente a la carbonatación en la zona de inyección de dióxido de carbono en la formación subterránea.

[0093] Declaración 2. El método de acuerdo con la declaración 1, en donde la barrera resistente a la carbonatación se superpone con la zona de inyección de dióxido de carbono y al menos una zona seleccionada del grupo que consiste en una zona que comprende la roca impermeable, una zona que contiene una zapata de una tubería de revestimiento anterior, una zona que contiene un ensamblaje de colgador de tubería de revestimiento corta y combinaciones de estas.

[0094] Declaración 3. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-2, en donde la formación subterránea comprende un depósito agotado que tiene al menos una característica seleccionada del grupo que consiste en gradiente de presión de poro menor de 9 kPa/m, porosidad de 5 % o mayor, permeabilidad de 0,1 mD o mayor y combinaciones de estos.

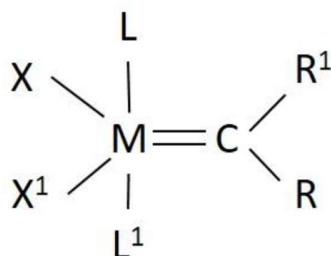
[0095] Declaración 4. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-3, en donde la resina comprende al menos una resina seleccionada del grupo que consiste en olefinas cíclicas, resinas de fenol-aldehído, resinas de urea-aldehído, resinas de uretano, resinas fenólicas, resinas de furano, resinas de furano y alcohol furfurílico, resinas de látex, resinas de fenol formaldehído, resinas de butoximetil butil glicidil éter, resinas de bisfenol A-epiclorohidrina, resinas de bisfenol F, resinas de bisfenol F diglicidil éter, ciclohexan dimetanol diglicidil éter, resinas de glicidil éter, resinas de poliéster e híbridos y copolímeros de estas, resinas de poliuretano e híbridos y copolímeros de estas, resinas de acrilato, un cicloalqueno, resinas a base de epoxi, resinas novolac, resinas de poliepóxido, resinas fenólicas, resinas de bisfenol A diglicidil éter, resinas de poliamina y combinaciones de estos.

[0096] Declaración 5. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-4, en donde el endurecedor comprende al menos un endurecedor seleccionado del grupo que consiste en aminas aromáticas, catalizadores de metal de transición, aminas alifáticas terciarias, aminas alifáticas, aminas cicloalifáticas, aminas heterocíclicas, amido aminas, poliamidas, polietilaminas, polieteraminas, polioxialquilenaminas, anhídridos carboxílicos, trietilentetraamina, etilendiamina, N-cocoalquiltrimetileno, isoforona diamina, N-aminofenil piperazina, imidazolina, 1,2-

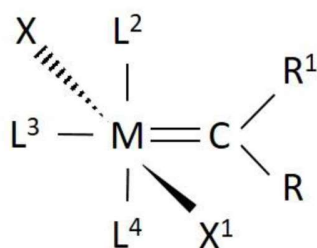
diaminociclohexano, polieteramina, dietiltoluendiamina, 4,4'-diaminodifenil metano, anhídrido metiltetrahidroftálico, anhídrido hexahidroftálico, anhídrido maleico, polianhídrido poliazelaico, anhídrido ftálico, fenilendiaminas dialquiladas y combinaciones de estos.

[0097] Declaración 6. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-5, en donde la lechada de cemento modificada con resina está libre de resina de bisfenol A diglicidil éter y resina epoxi fenol novolac.

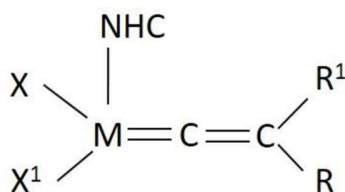
[0098] Declaración 7. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-6, en donde la resina comprende un cicloalqueno y el endurecedor comprende un catalizador de compuesto de metal de transición, en donde el catalizador de compuesto de metal de transición comprende un catalizador que tiene una estructura seleccionada del grupo que consiste en:



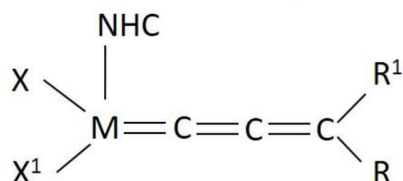
Estructura 1;



Estructura 2;



Estructura 3; y



Estructura 4,

donde M es rutenio u osmio, R y R1 se seleccionan independientemente de hidrógeno, C2-C20 alqueno, C2-C20 alquino, C2-C20 alquilo, arilo, C1-C20 carboxilato, C1-C20 alcoxi, C2-C20 alquenoilo, C2-C20 alquinoilo, arilo, C2-C20 alcoxycarbonilo, C1-C20 alquino, C1-C20 alquilsulfonilo o C1-C20 alquilsulfino, X y X1 son cada uno un ligando aniónico, L y L1 son cada uno un donante de electrones neutro, y NHC es un ligando de carbeno N-heterocíclico.

[0099] Declaración 8. El método de acuerdo con la declaración 7, en donde el cicloalqueno se selecciona del grupo que consiste en ciclopentadieno, dicitriclopentadieno, tricitriclopentadieno, ciclobutadieno, derivados de ciclobutadieno, ciclohexadieno, terpineno, norbornadieno, isómeros de estos y combinaciones de estos.

[0100] Declaración 9. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 7-8, en donde la resina y el catalizador de compuesto de metal de transición están presentes en una relación de masa de alrededor de 50:1 a alrededor de 10000:1 de la resina con respecto al catalizador de compuesto de metal de transición.

[0101] Declaración 10. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-9, en donde la resina y el endurecedor están presentes en una cantidad combinada de alrededor de 5 % a alrededor de 50 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina.

[0102] Declaración 11. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-10, en donde la resina está presente en la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad de alrededor de 1 % a alrededor de 20 % en peso de la lechada de cemento modificada con resina y en donde el endurecedor está presente en la lechada de cemento modificada con resina en una cantidad de alrededor de 0,05 % a alrededor de 5 % en peso de la lechada de cemento modificada con resina.

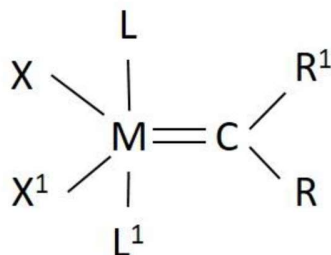
[0103] Declaración 12. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 1-12, en donde la lechada de cemento modificada con resina comprende además al menos un aditivo complementario seleccionado del grupo que consiste en componentes cementosos complementarios, aglutinantes hidráulicos, sólidos micronizados, partículas o micropartículas de sólidos inertes, microesferas huecas, microesferas elásticas de baja densidad, agentes densificantes, 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 formadores de espuma, aditivos tixotrópicos, dispersantes, retardadores, aceleradores y combinaciones de estos.

[0104] Declaración 13. Un método que comprende: proporcionar un sistema de almacenamiento subterráneo de captura de carbono, en donde el sistema de almacenamiento subterráneo de captura de carbono comprende: un pozo que penetra una formación subterránea que comprende una zona de inyección de dióxido de carbono; y una barrera resistente a la carbonatación, en donde la barrera resistente a la carbonatación comprende un cemento fraguado formado a partir de una lechada de cemento modificada con resina que comprende una resina, un endurecedor, un cemento hidráulico y agua, y en donde la barrera resistente a la

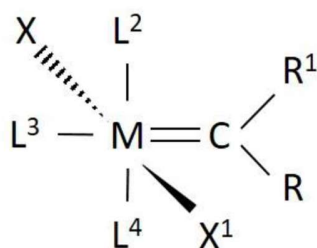
carbonatación se superpone con al menos una porción de la zona de inyección de dióxido de carbono en la formación subterránea; introducir dióxido de carbono en el sistema de almacenamiento subterráneo de captura de carbono; y hacer fluir el dióxido de carbono hacia la zona de inyección de dióxido de carbono.

[0105] Declaración 14. El método de acuerdo con la declaración 13, en donde la resina comprende una resina a base de epoxi, en donde el endurecedor comprende dietiltoluendiamina, y en donde el cemento hidráulico comprende un cemento Portland.

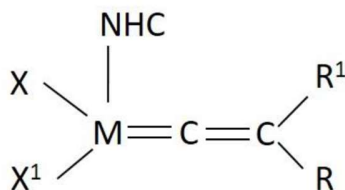
[0106] Declaración 15. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 13-14, en donde la resina comprende un cicloalqueno y el endurecedor comprende un catalizador de compuesto de metal de transición, en donde el catalizador de compuesto de metal de transición comprende un catalizador que tiene una estructura seleccionada del grupo que consiste en:



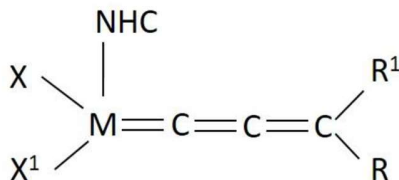
Estructura 1;



Estructura 2;



Estructura 3; y



Estructura 4,

donde M es rutenio u osmio, R y R¹ se seleccionan independientemente de hidrógeno, C₂-C₂₀ alqueno, C₂-C₂₀ alquino, C₂-C₂₀ alquilo, arilo, C₁-C₂₀ carboxilato, C₁-C₂₀ alcoxi, C₂-C₂₀ alquenoiloxi, C₂-C₂₀ alquinoiloxi, ariloxi, C₂-C₂₀ alcóxicarbonilo, C₁-C₂₀ alquiltio, C₁-C₂₀ alquilsulfonilo o C₁-C₂₀ alquilsulfonilo, X y X¹ son cada uno un ligando aniónico, L y L¹ son cada uno un donante de electrones neutro, y NHC es un ligando de carbeno N-heterocíclico.

[0107] Declaración 16. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 13-15, en donde el cicloalqueno se selecciona del grupo que consiste en ciclopentadieno, dicitopentadieno, tricitopentadieno, ciclobutadieno, derivados de ciclobutadieno, ciclohexadieno, terpineno, norbornadieno, isómeros de estos y combinaciones de estos.

[0108] Declaración 17. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 13-16, en donde la resina y el catalizador de compuesto de metal de transición están presentes en una relación de masa de alrededor de 50:1 a alrededor de 10000:1 de la resina con respecto al catalizador de compuesto de metal de transición.

[0109] Declaración 18. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 13-17, en donde la resina y el endurecedor están presentes en una cantidad combinada de alrededor de 5 % a alrededor de 50 % en volumen de la lechada de cemento modificada con resina.

[0110] Declaración 19. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 13-18, en donde la zona de inyección de dióxido de carbono comprende al menos una zona seleccionada del grupo que consiste en una formación altamente porosa o permeable, un depósito agotado, una formación agotada, una caverna de sal y combinaciones de estos.

[0111] Declaración 20. El método de acuerdo con cualquiera de las declaraciones 13-19, en donde el dióxido de carbono se introduce en el sistema de almacenamiento subterráneo de captura de carbono como un gas, un líquido, un vapor, un fluido supercrítico o una combinación de estos.

[0112] Para facilitar una mejor comprensión de la presente invención, se proporcionan los siguientes ejemplos de ciertos aspectos de algunas formas de realización. De ninguna manera debería considerarse que los siguientes ejemplos limitan, o definen, el alcance completo de la divulgación.

EJEMPLO 1

[0113] En este ejemplo, se evaluó la resistencia a la carbonatación del cemento hidráulico en combinación con resina. Se prepararon dos muestras de cemento de acuerdo con la Tabla 1. La muestra 1 se preparó con 15 % de resina en volumen hasta una densidad de 15,5 lbm/gal y la muestra 2 se mezcló hasta 16 lbm/gal.

Tabla 1

	Muestra 1	Muestra 2
cemento clase H	65,6 % en peso	69,3 % en peso
agua	25,3 % en peso	30,6 % en peso
resina epoxi	6,9 % en peso	-
endurecedor de amina aromática	2,0 % en peso	-
auxiliar de suspensión	-	0,1 % en peso

[0114] La resistencia a la carbonatación se determinó al medir la penetración de un frente de carbonatación en una matriz de cemento de un cemento fraguado mediante el uso de una prueba de fenolftaleína. Una coloración fucsia de la fenolftaleína puede indicar un entorno básico, ácido o neutro. Las muestras de cada cemento preparadas de acuerdo con la Tabla 1 se expusieron a CO₂ durante 1 mes en condiciones de CO₂ supercrítico seco, durante 1 mes en condiciones de CO₂ supercrítico húmedo, durante 1 mes sumergidas en ácido carbónico, y durante 1 mes sin exposición a CO₂. Un frente de carbonatación distinto se observó para cada muestra evaluada que no contenía resina. Se observó además que las muestras que contenían resina no tuvieron un frente de carbonatación distinto.

EJEMPLO 2

[0115] En este ejemplo, los cementos se prepararon y se expusieron a CO₂ supercrítico durante un período de tiempo. Los resultados se muestran en las Figuras 8A-8H para una semana y en las Figuras 9A-9H para un mes después de tinción con fenolftaleína. Se observó que el cemento modificado con resina tenía la menor cantidad de carbonatación.

[0116] Si bien la presente divulgación y sus ventajas se han descrito en detalle, debe entenderse que pueden realizarse diversos cambios, sustituciones y alteraciones en la presente sin apartarse del espíritu y el alcance de la divulgación tal como se define en las reivindicaciones adjuntas. La descripción anterior proporciona diversos ejemplos de los sistemas y métodos de uso divulgados en la presente que pueden contener diferentes etapas del método y combinaciones alternativas de componentes. Debe entenderse que, aunque se pueden analizar ejemplos individuales en la presente, la presente divulgación cubre todas las combinaciones de los ejemplos divulgados, lo que incluye, entre otros, las diferentes combinaciones de componentes, combinaciones de etapas del método y propiedades del sistema. 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, como se usa en las reivindicaciones, el artículo indefinido "un" o "una" se define en

la presente como uno o más de uno de los elementos que introduce.

[0117] Por razones de brevedad, en la presente solamente se divulgan de manera explícita ciertos rangos. Sin embargo, los rangos de cualquier límite inferior se pueden combinar con cualquier límite superior para enumerar un rango no enumerado explícitamente, al igual que los rangos de cualquier límite inferior se pueden combinar con cualquier otro límite inferior para enumerar un rango no enumerado explícitamente. De la misma manera, los rangos de cualquier límite superior se pueden combinar con cualquier límite superior para enumerar un rango no enumerado explícitamente. Además, siempre que se divulgue 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 están enumerados 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.

[0118] Por lo tanto, los presentes ejemplos están bien adaptados para lograr los fines y las ventajas mencionados, así como aquellos que son inherentes a estos. Los ejemplos particulares divulgados anteriormente son solo ilustrativos y pueden 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 cubre todas las combinaciones de todos los 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 corriente a menos que el titular de la patente los defina explícita y claramente de otra manera. 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 estos ejemplos. 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.