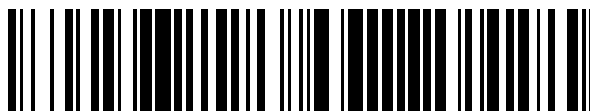


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 778 927**

51 Int. Cl.:

C04B 12/04

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.12.2011 PCT/US2011/065649**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.06.2012 WO12083255**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.12.2011 E 11848040 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.11.2019 EP 2651846**

54 Título: **Material compuesto geopolimérico para hormigón de ultra alto rendimiento**

30 Prioridad:

17.12.2010 US 201061457052 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

12.08.2020

73 Titular/es:

**THE CATHOLIC UNIVERSITY OF AMERICA
(100.0%)**

**620 Michigan Avenue, N.E.
Washington, DC 20064 , US**

72 Inventor/es:

**GONG, WEILIANG;
LUTZE, WERNER y
PEGG, IAN**

74 Agente/Representante:

FÚSTER OLAGUIBEL, Gustavo Nicolás

ES 2 778 927 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Material compuesto geopolimérico para hormigón de ultra alto rendimiento

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a aglutinantes de materiales compuestos geopoliméricos para hormigón de ultra alto rendimiento y a métodos de elaboración y uso de los mismos.

10 **Antecedentes de la invención**

La siguiente descripción de los antecedentes de la invención se proporciona simplemente como una ayuda para entender la invención y no se admite para describir o constituir la técnica anterior a la invención.

15 Durante los últimos diez años, se han realizado considerables avances en el desarrollo de hormigones de alto rendimiento, o más recientemente de ultra alto rendimiento, con cemento Portland. El hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC, por sus siglas en inglés) representa una etapa de desarrollo principal sobre el hormigón de alto rendimiento (HPC, por sus siglas en inglés), a través del logro de resistencia mecánica muy alta y permeabilidad muy baja. Normalmente, la resistencia mecánica a la compresión de los UHPC varía desde 120 hasta 400 MPa, su resistencia a la tracción varía desde 10 hasta 30 MPa, y su módulo de elasticidad está en el intervalo de 60 a 20 100 GPa.

El UHPC se beneficia de ser un material de “defectos mínimos” (un material con una cantidad mínima de defectos tales como microfisuras y poros interconectados con una densidad de empaquetamiento máxima). Un enfoque para 25 minimizar los defectos es el enfoque libre de macrodefectos (MDF, por sus siglas en inglés), que usa polímeros para rellenar los poros en la matriz de hormigón. El procedimiento requerido para fabricar hormigones MDF es muy exigente, e incluye laminación y prensado. Los hormigones MDF son susceptibles al daño por agua, tienen una gran cantidad de fluencia lenta y son muy frágiles. Otro enfoque para minimizar los defectos es el enfoque de densificado con partículas pequeñas (DSP, por sus siglas en inglés), que usa altas cantidades de superplastificante y vapor de 30 sílice en la mezcla de hormigón. Los hormigones DSP deben usar o bien agregados gruesos extremadamente duros o bien eliminarlos completamente para impedir que los agregados sean el componente más débil de la mezcla. Los hormigones DSP no requieren las condiciones de fabricación extremas que los hormigones MDF, pero los hormigones DSP tienen una resistencia a la tracción mucho menor. La adición de fibras de acero se ha considerado que mejora la ductilidad del hormigón DSP.

35 Los principios empleados en el UHPC convencional incluyen homogeneidad mejorada a través de la eliminación de agregado grueso; densidad de empaquetamiento potenciada mediante la optimización de la mezcla granular a través de una distribución amplia de clases de tamaño de polvo; propiedades de la matriz mejoradas mediante la adición de una mezcla puzolánica tal como vapor de sílice; propiedades de la matriz mejoradas reduciendo la razón 40 agua/aglutinante; ductilidad potenciada a través de la inclusión de pequeñas fibras de acero; y rendimiento mecánico mejorado a través de un tratamiento térmico tras el fraguado (90-150°C) para transformar hidratos amorfos en productos cristalinos, haciendo posible una microestructura mejorada (tobermorita, xonotlita).

Se han desarrollado diversos tipos de UHPC en diferentes países y por diferentes fabricantes. La diferencia principal 45 entre los diversos tipos de UHPC es el tipo y la cantidad de fibras usadas. Los cuatro tipos principales de UHPC son Ceracem/BSI, materiales compuestos reforzados compactos (CRC, por sus siglas en inglés), materiales compuestos de cementos multiescala (MSCC, por sus siglas en inglés) y hormigón en polvo reactivo (RPC, por sus siglas en inglés). El RPC es el UHPC normalmente más disponible y uno de estos productos se comercializa actualmente con el nombre Ductual® por Lafarge, Bouygues y Rhodia.

50 La mezcla de hormigones RPC contiene habitualmente arena fina (150-600 μm), cemento Portland (<100 μm), vapor de sílice (0,1-0,2 μm), cuarzo triturado (5-30 μm), fibras cortas, superplastificante y agua. Una mezcla de hormigón RPC típica tiene el 38,8% de arena, el 22,7% de cemento Portland, el 10,6% de vapor de sílice, el 8,1% de cuarzo triturado, el 2,0% de fibra de acero o fibra orgánica, el 1,4% de superplastificante y el 16,5% de agua (todo en 55 porcentaje en volumen).

El cemento Portland es el aglutinante principal usado en el UHPC convencional, pero en una proporción mucho mayor en comparación con el hormigón habitual o HPC. El cemento con altas proporciones de aluminato de tricalcio (C_3A) y silicato de tricalcio (C_3S), y una finza Blaine menor son deseables para el UHPC convencional, ya que el 60 C_3A y C_3S contribuyen a una resistencia mecánica temprana alta y la menor finza Blaine reduce la demanda de agua. La adición de vapor de sílice cumple varios papeles incluyendo el empaquetamiento de partículas, fluidez creciente debido a la naturaleza esférica y reactividad puzolánica (reacción con el hidróxido de calcio del producto de hidratación más débil) que conduce a la producción de silicatos de calcio adicionales. La arena de cuarzo con un diámetro máximo de 600 μm es el mayor constituyente aparte de las fibras de acero. Tanto el cuarzo molido (10 μm) 65 como la arena de cuarzo contribuyen al empaquetamiento optimizado. Reduciendo la cantidad de agua necesaria para producir una mezcla fluida y, por tanto, la permeabilidad, el superplastificante de policarboxilato también

contribuye a mejorar la trabajabilidad y durabilidad. Finalmente, la adición de fibras de acero ayuda a impedir la propagación de microfisuras y macrofisuras y limitando así la permeabilidad y el ancho de la fisura.

A pesar de las ventajas de rendimiento ofrecidas por el UHPC, la implementación ha sido lenta. Existen varios motivos posibles para esto, incluyendo la falta de un beneficio financiero claro para los fabricantes. Como era de esperar, los costes de fabricación de componentes de UHPC son significativamente mayores que los costes de fabricación de componentes de hormigón convencionales. De manera adicional, el mayor coste de los materiales constituyentes en el UHPC significa necesariamente que el UHPC tiene un mayor coste por volumen unitario que los hormigones convencionales y de alto rendimiento. Gran parte del coste del UHPC proviene de su fibra de acero, su superplastificante y sílice pirogénica de alta pureza. El hormigón reforzado con fibras de alto rendimiento se cura generalmente con calor y/o presión para mejorar sus propiedades y acelerar la reacción de hidratación del aglutinante, lo que también aumenta el coste de fabricación. El documento WO 2010/085537 A2 se refiere a un aglutinante de material compuesto geopolimérico, incluyendo aglutinante de material compuesto (i) al menos un material de cenizas volantes que tiene menos de o igual al 15% en peso de óxido de calcio; (ii) al menos un potenciador de gelificación y (iii) al menos un potenciador de endurecimiento que tiene una composición diferente de una composición del al menos un material de cenizas volantes.

La presente invención se refiere al uso de aglutinantes de materiales compuestos geopoliméricos (GC, por sus siglas en inglés), en vez de cemento Portland, para aplicaciones de hormigón de ultra alto rendimiento (GUHPC).

Sumario de la invención

Un aspecto de la presente invención proporciona una mezcla de hormigón de ultra alto rendimiento de material compuesto geopolimérico (GUHPC), que comprende: (a) un aglutinante que comprende uno o más seleccionados del grupo que consiste en aluminosilicato reactivo y aluminosilicato alcalinotérreo reactivo; en la que el aglutinante comprende del 10 al 50% en peso de la mezcla de GUHPC; y (b) un activador alcalino que comprende una disolución acuosa de hidróxido metálico y silicato metálico, (c) uno o más agregados y (d) una o más cargas con un tamaño de partícula de hasta 75 μm , en la que el contenido de carga combinada es de hasta el 35% en peso de la mezcla de GUHPC; en la que un tipo de la una o más cargas comprende una carga que tiene un tamaño de partícula de entre 0,05 y 1 μm , y se selecciona del grupo que consiste en vapor de sílice, sílice precipitada, carbonato de calcio ultrafino, alúmina micrométrica y partículas submicrométricas de óxidos metálicos; y en la que el otro tipo de la una o más cargas tiene un tamaño de partícula de entre 1 y 75 μm y se selecciona del grupo que consiste en cuarzo, zeolita y vidrio esmerilado triturados tal como se define en la reivindicación 1.

El aglutinante comprende del 10 al 50% en peso de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones, el aglutinante comprende uno o más aluminosilicatos reactivos que comprenden del 0 al 30% en peso de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones relacionadas, el uno o más aluminosilicatos reactivos se seleccionan del grupo que consiste en metacaolín, vidrios de aluminosilicato reactivo y cenizas volantes de clase F ultrafinas. En algunas realizaciones, el uno o más aluminosilicatos reactivos comprenden metacaolín.

En algunas realizaciones, el aglutinante comprende uno o más aluminosilicatos alcalinotérreos reactivos, que comprenden del 2 al 40% en peso de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones relacionadas, el uno o más aluminosilicatos alcalinotérreos reactivos se seleccionan del grupo que consiste en escoria de alto horno granulada, aluminosilicato de calcio vítreo (VCAS, por sus siglas en inglés), cenizas volantes de clase C y polvo de horno de hormigón. En algunas realizaciones relacionadas, el uno o más aluminosilicatos alcalinotérreos reactivos comprenden escoria de alto horno granulada molida.

En algunas realizaciones, el aglutinante comprende aluminosilicato reactivo y aluminosilicato alcalinotérreo reactivo. En algunas realizaciones relacionadas, la masa del aluminosilicato reactivo es de hasta 10 veces, preferiblemente hasta 1,5 veces, preferiblemente desde 0,2 hasta 0,8 veces, la masa del aluminosilicato alcalinotérreo reactivo. En algunas realizaciones relacionadas, la masa del aluminosilicato alcalinotérreo reactivo es de hasta 20 veces, preferiblemente desde 2 hasta 5 veces, la masa del aluminosilicato reactivo. En algunas realizaciones relacionadas, el uno o más aluminosilicatos reactivos comprenden del 2 al 15% en peso de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones relacionadas, el aluminosilicato alcalinotérreo reactivo comprende del 8 al 25% en peso de la mezcla de GUHPC.

La mezcla de GUHPC comprende una o más cargas tal como se define en la reivindicación 1 con un tamaño de partícula de hasta 75 μm . El contenido de carga combinada es de hasta el 35% en peso, preferiblemente desde el 2 hasta el 25% en peso, de la mezcla de GUHPC. En la invención, el otro tipo de la una o más cargas tiene un tamaño de partícula de entre 1 y 75 μm , y se selecciona del grupo que consiste en cuarzo, zeolita y vidrio esmerilado triturados tal como se define en las reivindicaciones. En la invención, el un tipo de la una o más cargas tiene un tamaño de partícula de entre 0,05 y 1 μm , y se selecciona del grupo que consiste en vapor de sílice, sílice precipitada, carbonato de calcio ultrafino, alúmina micrométrica y partículas submicrométricas de óxidos metálicos tal como se define también en las reivindicaciones.

- En algunas realizaciones, el uno o más agregados comprenden del 0 al 75% en peso, preferiblemente del 30 al 60% en peso de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones relacionadas, el uno o más agregados comprenden materia particulada con un tamaño de partícula de 0,075 a 10 mm. En algunas realizaciones relacionadas, el uno o más agregados comprenden uno o más agregados gruesos que tienen un tamaño de partícula de entre 0,075 y 10 mm que se seleccionan del grupo que consiste en arena de cuarzo, granito, basalto, gneis, piedra caliza y arena de bauxita calcinada. En algunas realizaciones relacionadas, el uno o más agregados comprenden un agregado fino con un tamaño de partícula de entre 0,075 y 0,75 mm. En algunas realizaciones relacionadas, el uno o más agregados comprenden arena de mampostería, arena de río fina, o ambas.
- En algunas realizaciones, la disolución de activador alcalino comprende del 10 al 40% en peso, más preferiblemente del 15 al 25% en peso, de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones, el hidróxido metálico comprende del 2 al 15% en peso como M_2O de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones, el hidróxido metálico comprende hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, o ambos. En algunas realizaciones, el hidróxido metálico comprende del 2 al 10% en peso como M_2O de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones, el agua de la disolución de activador alcalino comprende del 4 al 25% en peso, más preferiblemente del 5 al 15% en peso, de la mezcla de GUHPC.
- En algunas realizaciones, el silicato metálico comprende del 2 al 10% en peso como SiO_2 de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones, el silicato metálico comprende un silicato de metal alcalino o un silicato de metal alcalinotérreo. En algunas realizaciones, el silicato metálico comprende silicato de sodio, silicato de potasio, o ambos.
- En algunas realizaciones, la mezcla de GUHPC comprende además una o más fibras, que comprenden del 0 al 15% en peso de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones relacionadas, la una o más fibras comprenden una o más fibras seleccionadas del grupo que consiste en fibra orgánica, fibra de vidrio, fibra de carbono, nanofibra y fibra metálica. En algunas realizaciones relacionadas, la una o más fibras comprenden fibra de acero.
- En algunas realizaciones, la mezcla de GUHPC comprende además uno o más potenciadores de la resistencia mecánica, que comprenden hasta el 2% en peso de la mezcla de GUHPC. En algunas realizaciones relacionadas, el uno o más potenciadores de la resistencia mecánica se seleccionan del grupo que consiste en hidróxido de aluminio, carbonato alcalino, fosfato alcalino, sulfato alcalino, oxalato alcalino y fluoruro alcalino. En algunas realizaciones relacionadas, el uno o más potenciadores de la resistencia mecánica se seleccionan del grupo que consiste en hidróxido de aluminio, carbonato de sodio, fosfato de sodio, sulfato de sodio, oxalato de sodio y fluoruro de sodio.
- En algunas realizaciones, la mezcla de GUHPC comprende además sólidos superplastificantes, que comprenden hasta el 5% en peso de la mezcla de GUHPC.
- En algunas realizaciones, la mezcla de GUHPC comprende además un retardador de fraguado. En algunas realizaciones relacionadas, el retardador de fraguado comprende hasta el 5% en peso de la mezcla de GUHPC.
- En algunas realizaciones, la densidad de empaquetamiento de todos los componentes sólidos en la mezcla de GUHPC es de al menos 0,5 (v/v), tal como al menos 0,6 (v/v); tal como al menos 0,75 (v/v).
- En algunas realizaciones, la mezcla de GUHPC da como resultado un producto de GUHPC con una resistencia mecánica a la compresión a los 28 días de al menos 69 MPa (10.000 psi), tal como al menos 138 MPa (20.000 psi), tal como al menos 172 MPa (25.000 psi).
- En algunas realizaciones, la mezcla de GUHPC da como resultado un producto de GUHPC con un tiempo de fraguado de 30 minutos a 3 horas.
- En algunas realizaciones, la mezcla de GUHPC da como resultado un producto de GUHPC con una temperatura de fraguado entre 0 y 150°C, tal como entre 20 y 90°C.
- En otro aspecto, se proporcionan los métodos de elaboración de productos de hormigón de ultra alto rendimiento de material compuesto geopolimérico (GUHPC) a partir de mezclas de GUHPC descritas en el presente documento. En algunos métodos, se mezcla una mezcla seca de GUHPC con una disolución de activador para formar una pasta de GUHPC; que se fragua y se cura para formar un producto de GUHPC. En estos métodos, la mezcla seca de GUHPC comprende un aglutinante a del 10 al 50% en peso, comprendiendo el aglutinante uno o más seleccionados del grupo que consiste en aluminosilicato reactivo y aluminosilicato alcalinotérreo reactivo, y la disolución de activador comprende una disolución acuosa de hidróxido metálico y silicato metálico. La mezcla seca de GUHPC comprende además uno o más agregados y una o más cargas tal como se define en la reivindicación 13.
- En algunas realizaciones, el hidróxido alcalino comprende uno o más de hidróxido de sodio e hidróxido de potasio o ambos.
- En algunas realizaciones, el mezclado se lleva a cabo con una mezcladora intensiva.

En algunas realizaciones, la pasta de GUHPC comprende además uno o más seleccionados del grupo que consiste en potenciador de la resistencia mecánica, sólidos superplastificantes y retardador de fraguado.

En algunas realizaciones, el producto de GUHPC comprende una o más fibras, que se añaden a la pasta de GUHPC que puede verterse antes de fraguarse.

En algunas realizaciones, el producto de GUHPC comprende uno o más potenciadores de la resistencia mecánica, que se añaden a la disolución acuosa de uno o más activadores alcalinos antes de mezclar con la mezcla seca de GUHPC.

En algunas realizaciones, la disolución de activador tiene una concentración molar de hidróxido alcalino de desde 5 hasta 15, preferiblemente desde 7 hasta 12.

En otro aspecto, se proporcionan métodos de elaboración de un producto de hormigón de ultra alto rendimiento de material compuesto geopolimérico (GUHPC) a partir de una mezcla de GUHPC en los que los componentes de una mezcla de GUHPC se mezclan en una mezcladora intensiva hasta que la mezcla progresa a través de una consistencia de tipo gránulo y se desarrolla para dar una pasta suave que puede verterse con mezclado continuado. En estas realizaciones, la mezcla de GUHPC comprende una disolución de activador y un aglutinante; comprendiendo la disolución de activador una disolución acuosa de hidróxido metálico y silicato metálico, comprendiendo el aglutinante uno o más seleccionados del grupo que consiste en aluminosilicato reactivo y aluminosilicato alcalinotérreo reactivo. En algunas realizaciones, la mezcla de GUHPC tiene una razón de agua con respecto a sólidos geopoliméricos (W/C) de entre 0,12 y 0,65; tal como entre 0,2 y 0,5; tal como entre 0,3 y 0,45.

El término “ $\pm$ ” tal como se usa en el presente documento en referencia a las mediciones cuantitativas que no incluyen la medición de la masa de un ion, se refiere al valor indicado más o menos el 10%. A menos que se especifique lo contrario, “un” o “una” significa “uno o más.”

El resumen de la invención descrito anteriormente no es limitativo y otras características y ventajas de la invención resultarán evidentes a partir de la siguiente descripción detallada de la invención y de las reivindicaciones.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 muestra un gráfico de la resistencia mecánica a la compresión de diversas muestras de GUHPC en función del tiempo de curado. Los detalles se comentan en el ejemplo 14.

Descripción detallada de la invención

Un aspecto descrito en el presente documento proporciona una composición de mezcla de hormigón de ultra alto rendimiento (GUHPC) de material compuesto geopolimérico. Por lo menos, una mezcla de GUHPC incluye: i) un aglutinante que comprende al menos un material de aluminosilicato reactivo amorfo, tal como metacaolín, y/o al menos un aluminosilicato alcalinotérreo reactivo amorfo, tal como escoria de alto horno granulada molida; y ii) una disolución acuosa que comprende al menos un activador alcalino.

La mezcla de GUHPC incluye una carga (reactiva y/o no reactiva) con un tamaño de partícula de hasta 75 μm , y agregado, tal como arena de mampostería fina de tamaño de partícula entre 75 y 750 μm , tal como 250 μm se incluyen en la mezcla. De manera adicional, los constituyentes tales como fibras, potenciadores de la resistencia mecánica, superplastificante y retardadores de fraguado también pueden incluirse para afectar al rendimiento del GUHPC.

Para formar un GUHPC, los constituyentes secos de la composición de mezcla de GUHPC (aglutinante y carga y agregado, si están presentes) se combinan con una disolución de activador alcalino. Los constituyentes se mezclan para formar una pasta que puede verterse, que fragua para dar un producto de GUHPC como los constituyentes forman geopolímeros. Los geopolímeros consisten en átomos de silicio y aluminio unidos a través de átomos de oxígeno para dar una red polimérica. El procedimiento de formación de geopolímeros implica reacciones de disolución/condensación/policondensación/polimerización, que empiezan en cuanto determinados materiales de aluminosilicatos reactivos se exponen a una disolución alcalina. Usando determinados materiales de aluminosilicato que son muy reactivos en disoluciones alcalinas y optimizando las composiciones y propiedades de las disoluciones alcalinas de activador permiten producir matrices geopoliméricas duraderas muy densas de resistencia mecánica extremadamente alta.

Empleando determinados principios verdaderos para el UHPC convencional tales como homogeneidad aumentada excluyendo agregados gruesos y un empaquetamiento de agregados aumentado seleccionando las distribuciones de tamaño de partícula, puede obtenerse un UHPC con material compuesto geopolimérico con resistencia mecánica a la compresión por encima de 138 MPa (20000 psi). A diferencia del UHPC convencional, no es necesario el uso de tratamiento térmico y la adición de gran cantidad de superplastificante para lograr ultra alto rendimiento. Con una mezcladora intensiva, pueden disminuirse las razones de agua con respecto a sólidos geopoliméricos (W/C) sin

dopado significativo con un superplastificante. Por lo contrario, el UHPC convencional usa grandes cantidades de superplastificante para reducir las razones W/C. Además, el GUHPC no tiene cemento Portland en absoluto, usa principalmente desechos industriales, y no emite dióxido de carbono en producción. Por tanto, el GUHPC es mucho menos costoso que el UHPC convencional, a la vez que es un hormigón bastante ecológico. El GUHPC también muestra una resistencia al calor, al fuego, al impacto y a los ácidos mucho mayor que el UHPC convencional.

Principios del GUHPC

Se conoce bien que el rendimiento de los productos geopoliméricos depende tanto de la reactividad como de la masa del gel formado. Los inventores han encontrado que la activación alcalina de materiales de aluminosilicatos reactivos, tales como metacaolín, genera grandes cantidades de gel de aluminosilicato alcalino (gel AAS, por sus siglas en inglés).

La activación alcalina de materiales de aluminosilicatos alcalinotérreos reactivos, tales como escoria de alto horno granulada molida, aluminosilicato de calcio vítreo o cenizas volantes de clase C, también produce abundante gel de silicato de calcio hidratado (CSH, por sus siglas en inglés) y/o geles relacionados y/o gel de aluminosilicato de calcio hidratado (CASH, por sus siglas en inglés), además del gel AAS.

La activación alcalina de aluminosilicato reactivo y aluminosilicato alcalinotérreo reactivo es muy rápida con reacciones completadas en de unas pocas horas (por ejemplo, metacaolín) a unos pocos días (por ejemplo, escoria de alto horno granulada molida, cenizas volantes de clase C) a temperatura ambiente. Una temperatura creciente potencia significativamente la activación alcalina y los procedimientos de endurecimiento.

Los inventores también han encontrado que un material compuesto geopolimérico elaborado con dos o más materiales de aluminosilicatos reactivos da como resultado una matriz híbrida de AAS, CSH y/o geles relacionados, y/o aluminosilicato de calcio hidratado (CASH) con una mayor tasa de aumento de la resistencia mecánica, así como una mayor resistencia mecánica final del producto geopolimérico. La optimización de la razón de gel AAS con respecto a gel CSH en una matriz de material compuesto geopolimérico puede proporcionar un rendimiento de resistencia mecánica máximo.

Los principios básicos para el UHPC convencional también son ciertos para el GUHPC, tales como homogeneidad aumentada excluyendo agregados gruesos y un empaquetamiento de agregados aumentado seleccionando distribuciones de tamaño de partícula. En algunas realizaciones, pueden usarse arena de río fina o arena de mampostería fácilmente disponibles (por ejemplo, tamaño de partícula de 75 a 750 μm) como agregado fino para reducir el coste de producción. En otras realizaciones, otras arenas, tales como arena de mampostería, pueden usarse como agregado. En determinadas realizaciones, pueden usarse una o más cargas reactivas finas y/o ultrafinas que tienen un tamaño de partícula de entre 3 a 75 μm , eliminándose de ese modo el polvo de cuarzo triturado (de 5 a 30 μm) encontrado en mezclas de hormigón en polvo reactivo (RPC) típicas. En algunas realizaciones, pueden usarse cargas submicrométricas con un tamaño de partícula que oscila desde 0,05 hasta 1 μm . Mientras que las cargas reactivas (finas, ultrafinas y submicrométricas) actúan como relleno de los huecos en la siguiente clase granular más grande en la mezcla, las cargas también reaccionan con fuentes alcalinas (reacción puzolánica) con un tiempo de curado creciente y producen un gel AAS adicional para ayudar al crecimiento de la resistencia mecánica a largo plazo.

En algunas realizaciones, la inclusión de materiales de agregados y cargas en la mezcla de GUHPC da como resultado una densidad de empaquetamiento de todos los aditivos sólidos (es decir, materiales aglutinantes, agregado (si está presente) y carga (si está presente)) de al menos 0,5 (v/v); tal como al menos 0,6 (v/v); tal como 0,75 (v/v).

Se ha usado la razón agua/sólidos geopoliméricos (W/C) como indicador de la resistencia mecánica del hormigón. El término sólidos geopoliméricos se define como la suma de los constituyentes del aglutinante y la sílice y los óxidos alcalinos disueltos en la disolución de activador. W/C afecta a la porosidad y las distribuciones de tamaño de poro de la matriz geopolimérica. Una razón W/C más pequeña da como resultado habitualmente un gel geopolimérico con poros más pequeños (por ejemplo, de 20 a 100 nm de tamaño) y a su vez mayor resistencia mecánica a la compresión.

Los inventores han determinado que una mezcla de GUHPC con W/C óptima o casi óptima muestra una progresión característica a través de diversas fases con mezclado intensivo continuado. Con una razón W/C óptima o casi óptima, se observa que la mezcla de GUHPC desarrolla inicialmente una consistencia de tipo arena o gránulo, lo que sugiere que está presente una cantidad insuficiente de agua. Sin embargo, el mezclado continuado, sin adición de agua adicional, da como resultado la mezcla de tipo arena o gránulo que forma una mezcla con consistencia de tipo masa, y finalmente una pasta fluida homogénea que puede trabajarse que está lista para verterse. Los inventores han determinado además que los productos de GUHPC elaborados con mezclas de GUHPC que muestran esta secuencia son excepcionalmente fuertes, con resistencia mecánica a la compresión superior a 138 MPa (20.000 psi) curados durante 28 días a temperatura ambiente.

Los inventores han determinado que el intervalo de W/C preferido para mezclas de GUHPC tal como se describen en el presente documento está dentro del intervalo de 0,12 a 0,65; tal como de 0,2 a 0,5; tal como de 0,3 a 0,45.

Lo siguiente es una descripción más detallada de diversos constituyentes que pueden presentarse en determinadas mezclas de GUHPC de la presente invención. Los constituyentes a partir de los que se elabora el GUHPC incluyen al menos un aglutinante que comprende al menos un aluminosilicato reactivo y/o al menos un aluminosilicato alcalinotérreo reactivo, y una disolución acuosa de activador. Los componentes adicionales incluidos estudiados en el presente documento incluyen carga y agregado. Los componentes adicionales incluidos en determinadas realizaciones estudiados en el presente documento incluyen fibra, potenciadores de la resistencia mecánica, superplastificante, retardador de fraguado, y cualquier combinación de los mismos. No se pretende que esta lista sea exhaustiva, y tal como entiende un experto en la técnica, también pueden incluirse otros componentes.

Materiales de aluminosilicatos reactivos

El primer constituyente en una mezcla de GUHPC es el aglutinante, que comprende aluminosilicato reactivo y/o aluminosilicato alcalinotérreo reactivo. Los ejemplos de aluminosilicato reactivo que contiene materiales adecuados para su uso en la presente invención incluyen metacaolín (MK, por sus siglas en inglés), escoria de alto horno granulada molida (GGBFS, por sus siglas en inglés), aluminosilicato de calcio vítreo (VCAS), cenizas volantes de clase F (FFA, por sus siglas en inglés) y cenizas volantes de clase C (CFA, por sus siglas en inglés).

El metacaolín es una de las puzolanas de aluminosilicato más reactivas, un material finamente dividido (por ejemplo, dentro del intervalo de 0,1 a 20 micrómetros) que reacciona con cal apagada a la temperatura habitual y en presencia de humedad para formar un cemento fuerte de endurecimiento lento. El metacaolín se forma calcinando caolinita purificada, generalmente entre 650-700°C, en un horno rotatorio. La activación alcalina de metacaolín puede completarse en el plazo de varias horas.

Dependiendo de la composición química y el método de producción, la escoria de alto horno granulada molida (GGBFS) es un material granular vítreo que varía desde una estructura desmenuzable gruesa similar a las palomitas de maíz con tamaño de partícula mayor de 4,75 mm de diámetro, hasta granos de tipo arena densos. La molienda reduce el tamaño de partícula hasta fineza del cemento, permitiendo su uso como material cementoso complementario en el hormigón a base de cemento Portland. La escoria de alto horno granulada molida típica incluye el 27-38% de SiO₂, el 7-12% de Al₂O₃, el 34-43% de CaO, el 7-15% de MgO, el 0,2-1,6% de Fe₂O₃, el 0,15-0,76% de MnO y el 1,0-1,9% de otros en peso. Ya que la GGBFS es casi vítreo al 100% (o "amorfa"), es generalmente más reactiva que la mayoría de las cenizas volantes. La GGBFS produce una mayor proporción del silicato de calcio hidratado (CSH) que potencia la resistencia mecánica que la del cemento Portland, dando como resultado así en una mayor resistencia mecánica final que la del hormigón elaborado con cemento Portland.

Las cenizas volantes son un subproducto en polvo fino formado a partir de la combustión de carbón. Los hornos de instalaciones de centrales eléctricas que queman carbón pulverizado producen la mayoría de las cenizas volantes disponibles comercialmente. Estas cenizas volantes consisten principalmente en partículas vítreas sustancialmente esféricas, así como hematita, magnetita, carbono sin quemar, y algunas fases cristalinas formadas durante el enfriamiento. La norma de la American Society for Testing and Materials (ASTM) C618 reconoce dos clases principales de cenizas volantes para su uso en hormigón: la clase C y la clase F. En la norma ASTM C618, una diferencia de especificación principal entre las cenizas volantes de clase F y las cenizas volantes de clase C es el límite inferior de (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) en la composición. El límite inferior de (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) para cenizas volantes de clase F es del 70% y para las cenizas volantes de clase C es del 50%. Por consiguiente, las cenizas volantes de clase F tienen generalmente un contenido de óxido de calcio del 15% en peso o menos, mientras que las cenizas volantes de clase C tienen generalmente un contenido de óxido de calcio mayor (por ejemplo, mayor del 15% en peso, tal como del 20 al 40% en peso). Un alto contenido de óxido de calcio hace que las cenizas volantes de clase C posean propiedades cementosas que conducen a la formación de silicato de calcio y aluminato de calcio hidratados cuando se mezclan con agua.

Puede usarse cualquier aluminosilicato reactivo conocido en la técnica, pero el metacaolín es el más favorable ya que está disponible fácilmente y tiene un tamaño de partícula pequeño, tal como desde 0,5 hasta 20 µm. Las tasas de disolución y polimerización de metacaolín en una disolución alcalina pueden ser muy altas (es decir, desde minutos hasta horas), y el agua expulsada durante la geopolimerización puede ayudar a mejorar la trabajabilidad de la pasta de GUHPC y mejorar la hidratación/activación alcalina de un aluminosilicato alcalinotérreo reactivo.

Determinados materiales puzolánicos sintéticos son incluso más reactivos que el metacaolín. Por ejemplo, los inventores han sintetizado vidrios de aluminosilicato reactivo con composiciones químicas análogas a las de las cenizas volantes de clase F a temperaturas entre 1400°C y 1500°C. Las materias primas útiles para la síntesis de vidrios de aluminosilicato reactivo incluyen cenizas volantes de clase F con la adición de una pequeña cantidad de componentes de flujo (tal como sosa) u otros productos químicos individuales. Antes de su uso en mezclas de GUHPC, el vidrio sintético puede molerse haciéndolo pasar por un tamaño de 325 de malla. La activación alcalina de los polvos de vidrio sintético proporciona habitualmente una resistencia mecánica a la compresión por encima de 138 MPa (20.000 psi) después del curado durante 28 días.

En general, las cenizas volantes de clase F son menos reactivas que el metacaolín, aunque las cenizas volantes de clase F son esencialmente un vidrio de aluminosilicato. La reactividad de las cenizas volantes de clase F depende de la cantidad de la fase amorfa contenida en las mismas, del tamaño de partícula del sólido de cenizas volantes esférico, y de la temperatura de curado. Según las mediciones de los inventores, la energía de activación de hidratación puede ser tan alta como de 100 kJ/mol para los geopolímeros a base de cenizas volantes de clase F convencionales en el intervalo de temperaturas de 20 a 75°C. En comparación, las energías de activación de hidratación de cementos Portland y escoria de horno oscilan desde 20 hasta 50 kJ/mol. Sin el tratamiento térmico después del fraguado, tal como se aplican habitualmente a la fabricación de UHPC convencional, las cenizas volantes de clase F convencionales pueden no ser un aluminosilicato reactivo preferido en un GUHPC dependiendo del tamaño de partícula.

Para usarse como un aluminosilicato reactivo en una mezcla de GUHPC curada a temperatura ambiente, las cenizas volantes de clase F tienen preferiblemente un tamaño de partícula más pequeño de 15 µm, así como bajas cantidades de carbono sin quemar, tal como menos del 1% en peso. Tales cenizas volantes de clase F tienen preferiblemente un tamaño de partícula medio de 3 µm, y pueden procesarse a partir de cenizas volantes de partida mediante retirada mecánica de las partículas más gruesas. También pueden producirse cenizas volantes ultrafinas mediante un procedimiento de molienda. También pueden generarse de esta manera cenizas volantes con una mediana de tamaño de partícula en el intervalo de 6 a 10 µm.

Aluminosilicato alcalinotérreo reactivo

Tal como ya se ha comentado, el aglutinante comprende aluminosilicato reactivo y/o aluminosilicato alcalinotérreo reactivo. Los ejemplos de materiales de aluminosilicatos alcalinotérreos reactivos son escoria de alto horno granulada molida (GGBFS), aluminosilicato de calcio vítreo (VCAS), cenizas volantes de clase C (CFA) y polvo de horno de cemento (CKD).

La GGBFS es el aluminosilicato alcalinotérreo reactivo más favorable debido a su alta reactividad en disolución alcalina y su bajo coste. Aunque las tres calidades de escoria de horno (es decir 80, 100 y 120 según la norma ASTM C989-92) son adecuadas para una mezcla de GUHPC, se prefiere la calidad de escoria de horno 120 debido a que muestra mayor reactividad en disolución alcalina. Además, la GGBFS ultrafina es incluso más reactiva en comparación con la calidad de escoria de horno 120. Por ejemplo, el cemento MC-500® Microfine® (de neef Construction Chemicals) es una escoria de horno ultrafina con tamaños de partícula de menos de 10 µm y un área superficial específica de 800 m²/kg que es más reactiva que la calidad de escoria de horno 120.

El VCAS es un producto de desecho de la producción de fibra de vidrio. En una instalación de fabricación de fibra de vidrio representativa, normalmente el 10-20% en peso del material de vidrio procesado no se convierte en el producto final y se rechaza como subproducto o VCAS de desecho y se envía para su eliminación a un vertedero. El VCAS es amorfo al 100% y su composición es muy constante, incluyendo principalmente del 50-55% en peso de SiO₂, el 15-20% en peso de Al₂O₃ y el 20-25% en peso de CaO. El VCAS molido muestra actividad puzolánica comparable al vapor de sílice y el metacaolín cuando se somete a prueba según las normas ASTM C618 y CI240. Por tanto, puede ser un aluminosilicato alcalinotérreo muy reactivo formando compuestos cementosos adicionales tales como geles CSH y CASH.

El CKD es un subproducto de la fabricación de cemento Portland, y por tanto un desecho industrial. Más de 30 millones de toneladas de CKD se producen anualmente en el mundo, con cantidades significativas depositadas en vertederos. El CKD típico contiene el 38-64% en peso de CaO, el 9-16% en peso de SiO₂, el 2,6-6,0% en peso de Al₂O₃, el 1,0-4,0% en peso de Fe₂O₃, el 0,0-3,2% en peso de MgO, el 2,4-13% en peso de K₂O, el 0,0-2,0% en peso de Na₂O, el 1,6-18% en peso de SO₃, el 0,0-5,3% en peso de Cl⁻ y el 5,0-25% en peso de LOI. El CKD es generalmente un polvo muy fino (por ejemplo, área superficial específica de 4600-14000 cm²/g) y es un buen aluminosilicato alcalinotérreo reactivo. Cuando se usa CKD en una formulación de GUHPC, las elevadas concentraciones de los óxidos alcalinos contenidos en él mejoran la geopolimerización. La formación de gel CSH, etringita (3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·32H₂O), y/o singenita (un sulfato de calcio alcalino mixto) puede ayudar a desarrollar resistencia mecánica temprana de GUHPC.

La composición del hormigón comprende del 2 al 40% en peso de aluminosilicato alcalinotérreo reactivo, y preferiblemente del 8 al 25% en peso. La composición del hormigón comprende hasta el 30% en peso de aluminosilicato reactivo. Los materiales aglutinantes comprenden aluminosilicato alcalinotérreo reactivo y aluminosilicato reactivo, que contribuyen hasta el 50% en peso, tal como del 20 al 40% en peso, tal como del 15 al 30% en peso, de una mezcla de GUHPC.

En el aglutinante, una razón en masa de aluminosilicato reactivo con respecto a aluminosilicato alcalinotérreo reactivo oscila desde 0,0 hasta 10; se prefiere una razón en masa de entre 0,2 y 0,8.

En el aglutinante, se prefiere una razón en masa de aluminosilicato alcalinotérreo reactivo con respecto a aluminosilicato reactivo de entre 0,0 y 20; tal como entre 1 y 10; tal como entre 2 y 5.

Disolución de activador

El segundo constituyente crítico en una mezcla de GUHPC es la disolución de activador. Además del aglutinante descrito anteriormente, debe añadirse una disolución de activación alcalina ("disolución de activador") a una mezcla de constituyente seco de GUHPC para formar una mezcla de GUHPC completa. El activador es en efecto una disolución de uno o más hidróxidos metálicos y uno o más silicatos metálicos.

En una realización, el uno o más hidróxidos metálicos comprenden uno o más hidróxidos de metales alcalinos, tales como hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, o ambos.

El uno o más silicatos metálicos pueden comprender uno o más silicatos de metales alcalinos y/o uno o más silicatos de metales alcalinotérreos. Son deseables los silicatos de metales alcalinos, particularmente una disolución mixta de silicatos de potasio y sodio.

El vapor de sílice o la microsílíce se compone de partículas de sílice vítrea (SiO_2) muy pequeñas (por ejemplo, de $0,1 \mu\text{m}$ de tamaño) que son sustancialmente esféricas con un área superficial específica del orden de $20 \text{ m}^2/\text{g}$. El vapor de sílice es extremadamente reactivo en disolución alcalina. Una disolución de activador se prepara disolviendo vapor de sílice en disolución de hidróxido alcalino. En algunas realizaciones de la presente invención, el vapor de sílice también se aplica como carga reactiva. A diferencia del UHPC a base de cemento Portland convencional, el GUHPC es tolerante al carbono no quemado presente en el vapor de sílice residual industrial hasta el 5% en peso, tal como en el vapor de sílice de la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio. El GUHPC fabricado a partir de tal vapor de sílice residual industrial puede aparecer de color gris o más oscuro. Sin embargo, el GUHPC que comprende vapor de sílice blanco, tal como el de la industria del circonio, contiene mucho menos carbón no quemado y aparece de color blanco. Por tanto, pueden añadirse determinados colorantes o pigmentos al GUHPC fabricado a partir de vapor de sílice blanco para lograr una variedad de colores en el producto final.

En algunas realizaciones, puede usarse vapor de sílice para preparar la disolución de activador disolviéndola en una disolución de hidróxido alcalino, junto con potenciadores de la resistencia mecánica (si están presentes). En otras realizaciones, los polvos de vidrio de silicato alcalino pueden disolverse en disolución de hidróxido alcalino para preparar una disolución de activador. La temperatura elevada puede ayudar a aumentar la tasa de disolución de los polvos de vidrio de silicato alcalino. Los ejemplos de vidrios de silicato alcalino solubles disponibles comercialmente incluyen silicato de sodio SS® y silicato de potasio Kasolv® de PQ Corporation. En otras realizaciones, pueden usarse disoluciones de silicato alcalino disponibles comercialmente para preparar disoluciones de activador. Los ejemplos de tales disoluciones de silicato alcalino incluyen disolución de silicato de sodio Ru™ y disolución de silicato de potasio KASIL®6 de PQ Corporation. Cuando estos materiales comerciales de silicato alcalino soluble se usan para preparar disoluciones de activador, los productos de GUHPC son habitualmente de color claro. Si se desea, pueden añadirse determinados pigmentos para crear diversos colores de acabado.

La disolución de activador contribuye a la mezcla de GUHPC de la siguiente manera: hidróxido metálico como M_2O ($\text{M} = \text{Na}, \text{K}$, o ambos) a del 2 al 15% en peso, silicato como SiCO_2 a del 2 al 15% en peso, y agua a del 4 al 25% en peso.

Preferiblemente, se añade hidróxido metálico como hidróxidos de sodio, potasio, o ambos; más preferiblemente, del 2 al 10% en peso, Na_2O (añadido como NaOH), K_2O (añadido como KOH), o ambos; más preferiblemente, del 2 al 8% en peso, Na_2O (añadido como NaOH), K_2O (añadido como KOH), o ambos.

Preferiblemente, se añade SiO_2 como vapor de sílice. Preferiblemente, el SiO_2 disuelto está presente en la mezcla de GUHPC a del 2 al 10% en peso, más preferiblemente del 2 al 8% en peso.

Preferiblemente, el agua está presente en la mezcla de GUHPC a del 4 al 25% en peso; más preferiblemente del 7 al 15% en peso.

Carga

Un constituyente en una mezcla de GUHPC es una carga con un tamaño de partícula de hasta $75 \mu\text{m}$. Pueden clasificarse dos tipos de cargas en cuanto a sus tamaños de partícula y reactividad en disolución alcalina. Un tipo de carga comprende principalmente partículas submicrométricas reactivas que tienen un tamaño de partícula de entre $0,05$ y $1 \mu\text{m}$. Otro tipo de carga comprende partículas finas y ultrafinas que tienen tamaños de partícula de entre 1 y $75 \mu\text{m}$.

La carga combinada comprende hasta el 35% en peso de una mezcla de GUHPC. Preferiblemente, la carga combinada comprende entre el 2 y el 35% en peso. Más preferiblemente, la carga combinada comprende entre el 2 y el 25% en peso.

Las cargas finas y ultrafinas a modo de ejemplo incluyen zeolitas calcinadas y polvo de vidrio de desecho molido. En

general, estas partículas de carga también son bastante reactivas tras la exposición a una disolución alcalina. Se divulgan pero no se reivindican las cenizas volantes, incluyendo cenizas volantes de clase F y clase C, que generalmente tienen un tamaño de partícula de entre 5 y 75 μm . Se prefieren las cenizas volantes con tamaños de partícula más pequeños, tales como cenizas volantes ultrafinas (UFFA) con un tamaño de partícula medio de 1 a 10 μm . Las UFFA se procesan cuidadosamente separando mecánicamente la fracción ultrafina de la ceniza volante original. Las cenizas volantes de gasificación de carbón se descargan de las centrales eléctricas de gasificación de carbón, habitualmente como partículas sustancialmente esféricas ricas en SiO_2 que tienen un tamaño de partícula máximo de 5 a 10 μm . Por tanto, la ceniza volante de gasificación de carbón también es una carga adecuada.

La ceniza volante de clase F es esencialmente un vidrio de aluminosilicato que es menos reactivo que el metacaolín en disolución alcalina. La reactividad de la ceniza volante de clase F depende de la cantidad de fase amorfa contenida en la misma, del tamaño de partícula del sólido de cenizas volantes y de la temperatura de curado. Según las mediciones de los inventores, la energía de activación de hidratación puede ser tan alta como 100 kJ/mol para un geopolímero a base de cenizas volantes de clase F en el intervalo de temperatura de 20 a 75°C. En comparación, las energías de activación de la hidratación de los cementos Portland oscilan desde 20 hasta 50 kJ/mol.

Los ejemplos de zeolitas incluyen zeolita tipo 5 A, zeolita tipo 13X, clinoptilolita y filipsita. Las fases de zeolita tienen razones molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de desde 2 hasta 7, que están dentro del intervalo favorable de formación de composiciones de geopolímeros. El tratamiento térmico de los materiales zeolíticos a temperaturas de entre 500 y 800°C los hace amorfos en estructura y reactivos tras la exposición a una disolución altamente alcalina. Los materiales zeolíticos calcinados tienen normalmente un tamaño de partícula de entre 0,5 y 10 μm .

Las cargas submicrométricas a modo de ejemplo útiles en la presente invención incluyen vapor de sílice, sílice precipitada y alúmina de tamaño micrométrico, siendo el vapor de sílice el más preferido. Estas cargas submicrométricas suelen ser extremadamente reactivas tras la exposición a una disolución alcalina. También pueden usarse partículas ultrafinas de carbonato de calcio que tienen un área superficial específica igual a o mayor de 10 m^2/g como carga submicrométrica, aunque menos reactivas que el vapor de sílice. Otros materiales que tienen un tamaño de partícula de menos de 1 μm también pueden usarse como carga submicrométrica, aunque pueden no ser necesariamente reactivos. Los ejemplos de tales partículas submicrométricas incluyen Fe_2O_3 , ZrO_2 y partículas de SiC de tamaño apropiado.

Tal como se usa en UHPC convencional, puede usarse polvo de cuarzo triturado que tiene un tamaño de partícula de entre 1 y 75 μm , y más preferiblemente entre 5 y 30 μm , para potenciar la optimización de la distribución del tamaño de partícula y se considera inerte. Sin embargo, el cuarzo triturado puede volverse relativamente reactivo en GUHPC ya que las partículas de cuarzo con área superficial alta se disuelven en disoluciones altamente alcalinas con $\text{pH} > 14$. Por tanto, en las mezclas de GUHPC de la presente invención, el polvo de cuarzo triturado puede clasificarse como carga reactiva débil.

En algunas realizaciones, se incorpora una única carga, preferiblemente una única carga reactiva, en una mezcla de GUHPC. En algunas de estas realizaciones, la carga única es vapor de sílice. En estas realizaciones, se incorpora hasta el 5% en peso de vapor de sílice en mezclas de GUHPC. En otras realizaciones, se incorporan múltiples cargas, que pueden incluir o no una o más cargas reactivas, en mezclas de GUHPC. Por ejemplo, pueden incorporarse dos cargas en una mezcla de GUHPC. En determinadas realizaciones, el vapor de sílice y la zeolita calcinada tipo 5A pueden incorporarse en una mezcla de GUHPC con cantidades combinadas de hasta el 10% en peso. En otras realizaciones, pueden incorporarse vapor de sílice y polvo de cuarzo triturado en una mezcla de GUHPC con una cantidad de polvo de cuarzo triturado de hasta el 25% en peso, tal como hasta el 10% en peso, y la cantidad de vapor de sílice de hasta el 8% en peso, tal como hasta el 5% en peso. En aún otras realizaciones, pueden incorporarse más de dos, tal como tres, cuatro o más, cargas en una mezcla de GUHPC.

En una mezcla de GUHPC, pueden añadirse cargas con diferentes tamaños de partícula y reactividades para lograr la mayor densidad de empaquetamiento de una mezcla de GUHPC y potenciar la geopolimerización, lo que puede conducir a una mejora del rendimiento del producto. Tanto el vapor de sílice/cenizas volantes (clase C y/o clase F) como el vapor de sílice/polvo de cuarzo triturado son ejemplos preferibles de tales combinaciones.

Agregado

Un segundo constituyente en una mezcla de GUHPC es un agregado. El agregado confina la matriz geopolimérica para añadir resistencia mecánica, y puede ser fino o grueso, entendiéndose que los agregados finos tienen un tamaño de partícula que oscila desde 0,075 mm hasta 1 mm, tal como desde 0,15 hasta 0,60 mm. Si se usa un agregado fino en la mezcla de GUHPC, puede usarse cualquier agregado fino conocido en la técnica. Un agregado fino a modo de ejemplo es arena de río fina común, que puede añadirse a una mezcla de GUHPC hasta el 75% en peso, tal como desde el 30 hasta el 60% en peso, tal como desde el 40 hasta el 60% en peso, tal como desde el 25 hasta el 55% en peso, tal como hasta el 50% en peso, tal como desde el 10 hasta el 30%, tal como desde el 15 hasta el 25% en peso.

Opcionalmente, el agregado con un tamaño de partícula de entre 0,75 y 10 mm, tal como entre 1 y 5 mm, tal como entre 1 y 2 mm, también puede añadirse a una mezcla de GUHPC hasta el 50% en peso, preferiblemente junto con agregado fino. Los ejemplos de agregado grueso incluyen, pero no se limitan a, cuarzo triturado, granito, gneis, basalto, piedra caliza y arenas de bauxita calcinadas.

Potenciadores de la resistencia mecánica

Opcionalmente, puede añadirse al menos un potenciador de la resistencia mecánica a la disolución de activador en hasta el 2% en peso, tal como desde el 0 hasta el 3% en peso, tal como desde el 0 hasta el 2% en peso, tal como desde el 0,5 hasta el 1,5% en peso, o tal como del 0 al 1,5% en peso, tal como del 0 al 0,75% en peso de la mezcla de GUHPC. Puede usarse cualquier potenciador de la resistencia mecánica conocido en la técnica, o combinaciones del mismo. Los potenciadores de la resistencia mecánica a modo de ejemplo incluyen, pero no se limitan a, fluoruro de sodio, fluoruro de potasio, sulfato de sodio, oxalato de sodio, fosfato de sodio y compuestos relacionados, e hidróxido de aluminio.

Fibras para refuerzo

Opcionalmente, puede añadirse fibra a una mezcla de GUHPC hasta el 15% en peso, tal como hasta el 10%, tal como hasta el 7,5% en peso, para asegurar el comportamiento dúctil deseable del producto endurecido. Las fibras a modo de ejemplo incluyen fibras cortas tales como: fibras orgánicas (por ejemplo, fibras de poli(alcohol vinílico) y fibras de poliacrilonitrilo); fibras de vidrio (por ejemplo, fibras de basalto); fibras de carbono; y fibras metálicas.

Se prefieren las fibras metálicas debido a su ductilidad sustancial y la ductilidad aumentada que confieren a un producto de GUHPC. Las fibras metálicas se eligen generalmente de fibras de acero, tales como fibras de acero de alta resistencia mecánica y fibras de acero inoxidable. La longitud individual de las fibras metálicas es generalmente de al menos 2 mm y preferiblemente está entre 10 y 30 mm. La razón de la longitud con respecto al diámetro de las fibras metálicas usadas para refuerzo está normalmente dentro del intervalo de 10 a 300, y preferiblemente está dentro del intervalo de 30 a 100. Pueden usarse fibras con una geometría variable (tal como estar plegadas, corrugadas o con forma de gancho en el extremo). La unión de las fibras metálicas en la matriz geopolimérica puede mejorarse tratando las superficies de las fibras mediante métodos conocidos en la técnica, tales como grabado químico con ácido o recubrimiento de las fibras con capas cerámicas. Las fibras de acero Dramix® (tales como de 13 mm de longitud y 0,20 mm de diámetro) de Bekaert Corporation son fibras metálicas a modo de ejemplo que los inventores usaron para preparar determinados productos de GUHPC a modo de ejemplo.

Reductores de agua/sólidos superplastificantes

Opcionalmente, pueden usarse reductores de agua o sólidos superplastificantes para disminuir la cantidad de agua necesaria para preparar una disolución de activador para una mezcla de GUHPC. Los sólidos superplastificantes pertenecen a una nueva clase de reductores de agua capaces de reducir el contenido de agua en un 30% para los hormigones a base de cemento Portland. Los superplastificantes más recientes incluyen compuestos policarboxílicos, tales como poliacrilatos, aunque puede usarse cualquier superplastificante conocido en la técnica.

Si se incluyen, los sólidos superplastificantes se usan preferiblemente en hasta un 5% en peso, tal como hasta el 2,5% en peso, tal como hasta el 1,5% en peso.

Retardadores de fraguado

Opcionalmente, pueden incluirse uno o más retardadores de fraguado (por ejemplo, ácido bórico, determinados productos comerciales tales como Daratar 17 de Grace-Constructions, etc.) para extender los tiempos de fraguado de una pasta de GUHPC. Puede incluirse cualquier retardador de fraguado conocido en la técnica en niveles apropiados.

Método de preparación genérico y resumen de constituyentes

En una realización, la disolución de activador se prepara disolviendo vapor de sílice en disolución de hidróxido alcalino. Opcionalmente, la disolución de activador puede envejecerse con agitación intermitente. Los constituyentes secos descritos anteriormente, excepto la carga submicrométrica, se mezclan previamente en una mezcladora apropiada, tal como una mezcladora intensiva. Luego, la disolución de activación alcalina, junto con el superplastificante (si lo hay) y/o el potenciador de la resistencia mecánica (si lo hay), se vierten en la mezcla seca y se mezclan. Con una razón W/C casi óptima, la mezcla seca se convierte en una mezcla similar a gránulo, que se convierte en una mezcla similar a arena con mezclado continuo a una alta velocidad de cizalladura, por ejemplo, a 250 revoluciones por minuto o más. Luego se añade y se mezcla la carga submicrométrica, tal como vapor de sílice, y la mezcla similar a arena se convierte en una mezcla similar a masa que finalmente se convierte en una pasta homogénea, trabajable y fluida que está lista para verter. Las fibras cortas (si las hay) se añaden preferiblemente cerca del final del procedimiento de mezclado, tal como junto con la carga submicrométrica o después.

Los hormigones geopoliméricos de ultra alto rendimiento (GUHPC) de la presente invención pueden fabricarse mediante métodos conocidos, tales como métodos conocidos de mezclado de constituyentes secos con una disolución de activador, conformado y colocación (moldeo, moldeo por colada, inyección, bombeo, extrusión, compactación con rodillos, etc.), curado y endurecimiento. El procedimiento de curado de GHUPC según la presente invención no está sujeto a ninguna limitación particular. Cualquier procedimiento de curado común puede usarse para moldear por colada en el lugar y moldear previamente por colada hormigones.

Los constituyentes anteriores y sus proporciones en diversas mezclas de GUHPC se recopilan y se presentan en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Constituyentes y sus proporciones en mezclas de GUHPC

Constituyente		Intervalo (% en peso)
Aglutinante	Aluminosilicato reactivo o aluminosilicato alcalinotérreo reactivo o ambos	10 - 50
Carga		0 - 35
Agregado		0 - 75
Activador	M ₂ O (M = K, Na, o ambos)	2 - 15
	SiO ₂	2 - 15
	Agua	4 - 25
	Potenciador de la resistencia mecánica	0 - 2
Fibra		0 - 15
Sólidos superplastificantes		0 - 5

Tabla 2. Constituyentes y sus proporciones preferidas en mezclas de GUHPC

Tipo de materiales	Constituyentes	Intervalo I (% en peso)	Intervalo II (% en peso)
Aglutinante	Aluminosilicato reactivo	0 - 30	2 - 15
	Aluminosilicato alcalinotérreo	2 - 40	8 - 25
Carga		2 - 35	2 - 25
Agregado		15 - 75	30 - 60
Activador	M ₂ O (M = K, Na, o ambos)	2 - 10	2 - 8
	SiO ₂	2 - 10	2 - 8
	Agua	5 - 20	7 - 15
	Potenciador de la resistencia mecánica	0 - 1,5	0 - 0,75
Fibra		0 - 10	0 - 7,5
Sólidos superplastificantes		0 - 2,5	0 - 1,5

Parámetros restrictivos

Los parámetros restrictivos y sus respectivos intervalos pueden usarse para definir determinadas formulaciones no limitativas de GUHPC. Los parámetros restrictivos se establecen para los constituyentes específicos usados en la mezcla de GUHPC.

En las realizaciones en las que se usa metacaolín como aluminosilicato reactivo, los parámetros restrictivos del metacaolín incluyen un conjunto de razones molares de SiO₂/Al₂O₃, M₂O/Al₂O₃ y H₂O/M₂O, en las que M representa uno o más metales alcalinos (por ejemplo, Na, K, Li) o metales alcalinotérreos. La razón molar SiO₂/Al₂O₃ en metacaolín es de 2. Se añaden hidróxido alcalino y silicato alcalino a la disolución para obtener los valores requeridos para las razones molares características de una disolución de activación. Estas razones molares características son SiO₂/Al₂O₃ de desde 3,0 hasta 6,0, tal como desde 3,25 hasta 4,5, tal como desde 3,5 a 4,0; M₂O/Al₂O₃ de desde 0,7 hasta 1,5, tal como desde 0,9 hasta 1,25, o de 1,0 a 1,35; y H₂O/M₂O de desde 5,0 hasta

18,0, tal como desde 5,0 hasta 14,0, tal como de 6,0 a 10,0.

En realizaciones en las que se usa polvo de vidrio sintético de cenizas volantes como aluminosilicato reactivo; se usa aluminosilicato de calcio vítreo como aluminosilicato alcalinotérreo reactivo; se usa escoria de alto horno como aluminosilicato alcalinotérreo reactivo; o alguna combinación de los mismos, los parámetros restrictivos son los siguientes. Los parámetros restrictivos incluyen un conjunto de fracciones en masa de M_2O , SiO_2 , H_2O y la razón molar SiO_2/M_2O que se usan para formular una disolución de activación. Tanto el aluminosilicato reactivo como el aluminosilicato alcalinotérreo reactivo son materiales puzolánicos responsables de formar una matriz geopolimérica. Las fracciones en masa de M_2O o SiO_2 de los materiales puzolánicos puede oscilar desde 0,03 hasta 0,15, tal como de 0,05 a 0,10. La razón molar SiO_2/M_2O oscila desde 0,2 hasta 2,5, tal como de 0,8 a 1,5. La fracción en masa de H_2O oscila desde 0,15 hasta 0,40, tal como desde 0,25 hasta 0,30. Los metales alcalinos pueden ser cualquiera de Na, K o Li, o cualquier combinación, siendo Na particularmente útil para ahorrar costes. Las cantidades de hidróxido alcalino, silicato alcalino y agua necesarias para los componentes reactivos se componen para formular una composición de disolución de activación.

Los parámetros restrictivos para CKD como aluminosilicato alcalinotérreo reactivo incluyen las fracciones en masa de SiO_2 (sílice disuelta o cualquier fuente de material de sílice amorfo, por ejemplo, microsilíce, vapor de sílice, etc.), Al_2O_3 (aluminato disuelto, alúmina, hidróxidos de aluminio, etc.) y H_2O . El CKD es rico en cal libre y yeso, mostrando una fuerte propiedad puzolánica hidráulica. Las fracciones en masa de SiO_2 oscilan desde 0,05 hasta 0,75, tal como de 0,25 a 0,5. La fracción en masa de Al_2O_3 oscila desde 0,00 hasta 1,0, y la fracción en masa de agua oscila desde 0,15 hasta 0,6, preferiblemente desde 0,25 hasta 0,35. Las composiciones de gel resultantes incluirán CSH, ettringita, CASH y AAS.

No se requieren parámetros restrictivos para el uso de uno o más de sílice pirogénica, sílice precipitada, alúmina o zeolita calcinada como carga reactiva si estas cargas reactivas se añaden a una mezcla de GUHPC en una pequeña cantidad, por ejemplo, menos del 2% en peso de la mezcla. Sin embargo, si las cargas reactivas combinadas exceden el 2% en peso de la mezcla, deben aplicarse determinados parámetros restrictivos. Las fracciones en masa de M_2O para las cargas reactivas indicadas puede oscilar desde 0,0 hasta 0,10, tal como desde 0,025 hasta 0,05. La fracción en masa de H_2O oscila desde 0,0 hasta 0,15, tal como desde 0,025 hasta 0,05.

En realizaciones en las que se usa ceniza volante como carga reactiva, puede añadirse sílice soluble adicional a la disolución de activador con fracciones en masa de SiO_2 de las cargas reactivas que oscilan desde 0,0 hasta 0,10, tal como de 0,025 a 0,05. La razón molar SiO_2/M_2O oscila desde 0,2 hasta 2,5, tal como de 0,8 a 1,5.

La razón en masa de agua con respecto a sólidos geopoliméricos (W/C) es un parámetro muy importante para una mezcla de GUHPC. Tal como se usa en el presente documento, el término "sólidos geopoliméricos" se define como la suma de las masas de constituyentes reactivos en el aglutinante (es decir, aluminosilicato reactivo y/o aluminosilicato alcalinotérreo reactivo) y masas de óxido alcalino y dióxido de silicio disuelto en el activador. La razón W/C está determinada por un conjunto de parámetros restrictivos tales como la razón molar H_2O/M_2O para metacaolín (si está presente), fracción en masa de H_2O para aluminosilicato alcalinotérreo reactivo y otros materiales de aluminosilicato reactivo que no sean metacaolín (si los hay), fracción en masa de H_2O para cargas reactivas, así como si se aplica un superplastificante y cuánto. En determinados ejemplos presentados en el presente documento, se usa arena de mampostería con una humedad del 2,5% en peso como agregado fino. Si el contenido de humedad del agregado fino se desvía del 2,5% en peso, la mezcla debe corregirse por la diferencia de H_2O . Normalmente, las razones W/C en mezclas de GUHPC oscilan desde 0,12 hasta 0,60, tal como de 0,20 a 0,50, tal como de 0,30 a 0,45.

La tabla 3 muestra las restricciones generales y los valores preferidos usados para formular la disolución de activador para una mezcla de GUHPC.

Tabla 3. Restricciones e intervalos preferidos para la disolución de activador

Constituyentes	Razón o material	Intervalo	Intervalo preferido
Aluminosilicato reactivo (razón molar)	SiO_2/Al_2O_3	3,00-5,00	3,50-3,90
	M_2O/Al_2O_3	0,70-1,50	1,00-1,35
	H_2O/M_2O (M = K, Na, o ambos)	5-18	6,0-10,0
Aluminosilicato alcalinotérreo reactivo (razón en masa)	H_2O/BFS^*	0,15-0,40	0,25-0,30
	SiO_2/BFS^*	0,03-0,15	0,07-0,09
	M_2O/BFS^* (M = K, Na, o ambos)	0,03-0,15	0,07-0,09

Cargas reactivas (razón en masa)	H ₂ O/carga reactiva (por ejemplo, cenizas volantes)	0,-0,15	0,025
	M ₂ O/carga reactiva (por ejemplo, cenizas volantes)	0-0,05	0-0,025

* BFS representa aluminosilicato alcalinotérreo reactivo

Formulación de la mezcla de GUHPC

Lo siguiente es un enfoque general para formular una mezcla de GUHPC. En primer lugar, se indican los porcentajes en peso de agregado, carga, fibra (si la hay) y sólidos superplastificantes (si los hay). En segundo lugar, se establecen los porcentajes en peso del aluminosilicato alcalinotérreo reactivo y el aluminosilicato reactivo con una razón en masa deseada. En tercer lugar, pueden optimizarse entonces las proporciones de agregado, carga y aglutinante en cuanto a la teoría de la densidad máxima. La composición de una disolución de activación se formula basándose en un conjunto de parámetros restrictivos y sus respectivos intervalos para los constituyentes (es decir, aluminosilicato reactivo, aluminosilicato alcalinotérreo reactivo y determinadas cargas reactivas) sumando las cantidades necesarias de hidróxido alcalino, sílice disuelta y/o alúmina disuelta (si la hay) y agua. Finalmente, se normalizan entonces el aglutinante (aluminosilicato reactivo y/o aluminosilicato alcalinotérreo reactivo), la carga (si la hay), el agregado (si lo hay), la fibra (si la hay), los superplastificantes (si los hay), los retardantes de fraguado (si los hay) y la disolución de activación de modo que el total de la composición de mezcla de GUHPC asciende al 100% en peso.

En principio, el rendimiento de GUHPC depende al menos parcialmente de la densidad de empaquetamiento de todas las partículas de los constituyentes secos, incluyendo aluminosilicato reactivo, aluminosilicato alcalinotérreo reactivo, agregado y carga. Debido a que los productos de GUHPC pueden fabricarse con materiales disponibles localmente, es beneficioso determinar las densidades de empaquetamiento de las muestras de ensayo con diferentes proporciones de constituyentes mediante el uso de métodos de empaquetamiento tanto en seco como en húmedo. Las composiciones con mayores densidades de empaquetamiento de partículas pueden someterse luego a procedimientos de optimización adicionales.

Las razones características de una disolución de activación incluyen la razón W/C; la razón de activador con respecto a sólidos geopoliméricos; la razón de óxido alcalino con respecto a sólidos geopoliméricos; la razón de sílice soluble con respecto a sólidos geopoliméricos; y la razón de sílice soluble con respecto a óxido alcalino, todas en peso. Los intervalos preferidos en estas razones características se determinan restringiendo los parámetros y sus respectivos intervalos establecidos para cada uno de los componentes de GUHPC cuando se aplican.

La razón en peso de M₂O (M = K, Na) con respecto a sólidos geopoliméricos está generalmente en el intervalo de 0,01 a 0,25, tal como de 0,02 a 0,15, tal como de 0,05 a 0,10. La razón de SiO₂ con respecto a sólidos geopoliméricos está generalmente en el intervalo de 0,01 a 0,25, tal como de 0,03 a 0,25, tal como de 0,02 a 0,20, tal como de 0,05 a 0,15. La razón en peso de SiO₂ con respecto a Na₂O está generalmente en el intervalo de 0,1 a 2,0, tal como de 0,5 a 1,5, tal como de 0,75 a 1,25. La razón en peso de activador con respecto a sólidos geopoliméricos está generalmente en el intervalo de 0,20 a 1,25, tal como de 0,50 a 1,0. La razón de activador con respecto a sólido total está generalmente en el intervalo de 0,05 a 0,70, tal como de 0,30 a 0,50. Para una disolución de activación, el silicato metálico preferido es una mezcla de silicatos alcalinos, tal como K y Na con razones en masa de K₂O/Na₂O de 0 a 5; y el hidróxido alcalino preferido es una mezcla de hidróxidos alcalinos, tales como K y Na con razones en masa de K₂O/Na₂O de 0,1 a 3.

Las concentraciones molares de hidróxido alcalino (por ejemplo, KOH y NaOH) en la disolución de activador están generalmente en el intervalo de 5 a 15 M, preferiblemente desde 7,5 hasta 12 M. La humedad presente en el agregado se incluye generalmente para tales cálculos.

La disolución de activador oscila desde el 10% en peso hasta el 40% en peso de la mezcla de hormigón.

La manipulación de las proporciones constituyentes dentro de los intervalos dados (véase, por ejemplo, la tabla 1) permite la optimización de las composiciones de mezcla de GUHPC para lograr un crecimiento rápido de resistencia mecánica y una alta resistencia mecánica final. Las mezclas de GUHPC descritas en el presente documento pueden formularse para aplicaciones a temperaturas ambientales, o formularse específicamente para cualquier aplicación a cualquier otra temperatura aplicada comúnmente en la industria de la construcción, tal como para aplicaciones de moldeado previo por colada que generalmente requieren curado a temperaturas elevadas para lograr altas tasas de producción. Una ventaja de las mezclas GUHPC descritas en el presente documento es que, además de la alta resistencia mecánica a la compresión del producto final, puede no ser necesario el curado térmico. La temperatura de curado puede ser inferior a la de los UHPC convencionales. Por ejemplo, el curado puede llevarse a cabo a menos de o igual a 250°C, tal como menos de o igual a 100°C, tal como menos de o igual a 75°C, tal como menos de o igual a 50°C, tal como menos de o igual a 45°C, tal como menos de o igual a 30°C, tal como menos de o igual a 25°C, tal como menos de o igual a 20°C.

El tiempo de fraguado inicial para las mezclas de GUHPC descritas en el presente documento puede ser de desde

0,5 hasta 3 horas, tal como de 0,5 a 1 hora. Después de que se fragüe la composición, se cura durante 24 horas o más, tal como de 24 horas a una semana o más, a una temperatura de curado de entre 20°C y 75°C. Los tiempos de fraguado deseados pueden lograrse mediante la optimización de la composición de aglutinante y de carga (por ejemplo, seleccionando composiciones de aglutinante y de carga con diferentes reactividades en disoluciones alcalinas), o mediante otros métodos conocidos en la técnica.

Los siguientes ejemplos sirven para ilustrar la invención. No se pretende en absoluto que estos ejemplos limiten el alcance de los métodos.

Ejemplos

En los siguientes ejemplos, todas las pastas de GUHPC se curaron a temperatura ambiente, por ejemplo, a 25°C, excepto cuando se especifican otras temperaturas de curado.

Se usó arena de mampostería de Aggregates Industries como agregado fino que tiene un tamaño de partícula entre 50 y 600 µm con una mediana de tamaño de 250 µm. La humedad en el agregado fino fue del 2,5% en peso a temperatura ambiente. Se incluyó la humedad en el agregado fino para calcular las concentraciones molares de hidróxido alcalino y la razón de agua con respecto a sólidos geopoliméricos. Se corrigió la desviación de humedad real del 2,5% en peso.

Se usó QROK n.º 4 como arena de cuarzo gruesa que tenía un tamaño de partícula entre 0,6 y 1,7 mm, y se usó Min U-SIL® como polvo de cuarzo triturado que tenía un tamaño de partícula entre 1 y 25 µm con una mediana de diámetro de 5 µm. Ambos productos de cuarzo eran de U.S. Silica.

El metacaolín (Kaorock) era de Thiele Kaolin Company, Sandersville, GA. El metacaolín tenía un tamaño de partícula entre 0,5 y 50 µm con un 50% en volumen inferior a 4 µm.

La escoria de alto horno granulada molida calidad 120 (cemento de escoria NewCem) era de Lafarge, North America Inc. (Baltimore Terminal). La escoria de horno tenía un tamaño de partícula entre 0,5 y 60 µm, con un 50% en volumen inferior a 7 µm.

El vapor de sílice, un producto de desecho industrial de la aleación de Fe-Si, era de Norchem Inc. El vapor de sílice contenía el 2,42% en peso de carbono. El vapor de sílice se usó para preparar disoluciones de activador disolviendo el vapor de sílice en disolución de hidróxido alcalino, o se añadió como carga reactiva submicrométrica.

Unas cenizas volantes de clase F (Micron³) eran de Boral Material Technologies Inc. Las cenizas volantes de Boral tenían un tamaño de partícula entre 0,5 y 125 µm con un 50% en volumen por debajo de 15 µm. Otras cenizas volantes de clase F de la central eléctrica de Brandon Shores, Baltimore, MD, eran de Separation Technologies LLC. Las cenizas volantes de Brandon Shores tenían un contenido de CaO más bajo (0,9% en peso) y una baja pérdida de ignición (<1,5% en peso) y se comercializaron bajo el nombre ProAsh. Las cenizas volantes de Brandon Shores tenían un tamaño de partícula entre 0,6 y 300 µm con un 50% en volumen por debajo de 26 µm. Otras cenizas volantes de clase F de la central eléctrica de Limestone, Jewett, Texas, eran de Headwater Resources. Las cenizas volantes de Jewett contenían el 12% en peso de CaO y tenían un tamaño de partícula entre 0,5 y 300 µm con un 50% en volumen por debajo de 15 µm. Se usaron fibras de acero Dramix® (13 mm de longitud y 0,20 mm de diámetro) de Bekaert Corporation para mejorar la ductilidad.

Se midió la resistencia mecánica a la compresión en una máquina de compresión CM-4000-SD de Test Mark, siguiendo el método de la norma ASTM C39/C 39M. Durante las pruebas, todas las muestras se taparon con almohadillas de caucho ya que las superficies superior e inferior no eran lo suficientemente paralelas al plano para una medición básica.

Ejemplo 1

Se disolvieron KOH (90%) y NaOH (98%) en agua del grifo para elaborar una disolución alcalina usando un agitador mecánico, y se disolvió vapor de sílice en la disolución de KOH y NaOH. El vapor de sílice de Norchem Inc. contenía el 2,42% en peso de carbono. La disolución de activador era negra debido al carbono no disuelto. La disolución de activador se envejeció durante 2 días antes de la preparación de la muestra.

Se usó arena de mampostería con el 2,5% en peso de humedad como agregado fino.

Para preparar el GUHPC, se mezclaron en seco en primer lugar los siguientes constituyentes:

metacaolín como aluminosilicato reactivo (12,65% en peso),

escoria de alto horno granulada molida como aluminosilicato alcalinotérreo (32,65 % en peso), zeolita calcinada 13X

y vapor de sílice como cargas reactivas (2% en peso en total),
y arena de mampostería como agregado fino (19,00% en peso).

5 Luego, se preparó un activador mezclando:

Na_2O (2,52% en peso) como NaOH ,

K_2O (6,18% en peso) como KOH ,

10 SiO_2 (8,44% en peso) como vapor de sílice,

H_2O (16,55% en peso), y

15 potenciadores de la resistencia mecánica.

Los potenciadores de la resistencia mecánica usados en la mezcla incluían hidróxido de aluminio, carbonato de sodio, fosfato de sodio, sulfato de sodio, oxalato de sodio y fluoruro. La adición total fue del 1,25% en peso de la mezcla de hormigón. Estos se disolvieron en agua antes de su uso.

20 La disolución de activador se mezcló con los constituyentes secos premezclados con una mezcladora manual UNITEC EHR23 (velocidad máxima de 275 rpm). Durante el mezclado, se observaron las siguientes etapas: mezcla seca, mezcla similar a arena, mezcla similar a gránulo, mezcla similar a masa, y finalmente la mezcla similar a masa se convirtió en una pasta delgada que podía verterse, lo que indica que la mezcla tenía una razón W/C casi óptima u

25 óptima. El tiempo factible de la etapa final (la pasta delgada) fue de 50 min.

La pasta se llenó en moldes cilíndricos (2 por 4 pulgadas), se hizo vibrar mientras se llenaba durante 3 minutos para que escaparan las burbujas, y luego se curó a temperatura ambiente. Después de 24 horas, los cilindros se desmoldaron y almacenaron a temperatura ambiente. Después de curar durante 28 días, se midió que la resistencia mecánica a la compresión de las muestras era de 160,93 MPa (23341 psi).

30

Ejemplo 2

Se preparó un segundo GUHPC a modo de ejemplo de la siguiente manera.

35 Se disolvieron KOH (90%) y NaOH (98%) en agua del grifo para elaborar una disolución alcalina usando un agitador mecánico, y se disolvió vapor de sílice de alta pureza (99,5% en peso) de Cabot Corporation en la disolución de KOH y NaOH .

40 Se disolvió en agua del grifo en primer lugar fluoruro de sodio, usado como potenciador de la resistencia mecánica. La adición fue del 0,5% en peso de la mezcla de hormigón.

Se mezclaron en seco los siguientes constituyentes (a menos que se indique lo contrario, obtenidos de las fuentes indicadas anteriormente):

45 metacaolín como aluminosilicato reactivo (12,87% en peso),

escoria de alto horno granulada molida como aluminosilicato alcalinotérreo (33,20% en peso),

50 zeolita calcinada 13X y vapor de sílice como cargas reactivas (total el 2% en peso),

fluoruro de sodio como potenciador de la resistencia mecánica (0,6% en peso del GUHPC seco), y

arena de mampostería como agregado fino (19,00% en peso).

55 Luego, se preparó un activador mezclando:

Na_2O (2,57% en peso) como NaOH ,

60 K_2O (6,28% en peso) como KOH ,

SiO_2 (8,59% en peso) como vapor de sílice, y H_2O (15,50% en peso).

Se añadió superplastificante ADVA 140M de Grace Constructions al activador antes de mezclarlo con los componentes secos premezclados. La dosis de superplastificante fue de 1500 ml por 100 kg de producto seco.

65

Durante el mezclado de los constituyentes secos con la disolución de activador, se observaron las mismas etapas (mezcla seca, mezcla similar a arena, mezcla similar a gránulo, mezcla similar a masa y finalmente una pasta delgada). El tiempo factible de la etapa final (la pasta delgada) fue de 50 min. Como en el ejemplo 1, se vertieron muestras, se curaron a temperatura ambiente, se desmoldaron después de curar 24 horas y se almacenaron a temperatura ambiente. Después de curar durante 28 días, se midió que la resistencia mecánica a la compresión de las muestras era de 146.50 MPa (21248 psi).

Ejemplo 3

Usando el mismo procedimiento descrito en el ejemplo 1, sin superplastificante añadido, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 3-9) para someter a prueba el efecto de los potenciadores de la resistencia mecánica individuales en la disolución de activador. Los potenciadores de la resistencia mecánica individuales evaluados en las muestras 2-4 y 6-9 fueron fluoruro de estaño, fluoruro de sodio, oxalato de sodio, sulfato de sodio e hidróxido de aluminio. Cada adición fue del 0,5% en peso de las mezclas de hormigón. No se incluyó potenciador de la resistencia mecánica en la muestra 5. Las resistencias mecánicas a la compresión se midieron después de curar durante 28 días. Todas las muestras midieron por encima de 138 MPa (20.000 psi) en resistencia mecánica a la compresión. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 4

Tabla 4. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras de GUHPC*

Muestra	Componentes secos					Activador				Suma	W/C	(K,Na)OH M	psi	MPa
	MK	BFS	SFF	ZT	Arena	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua					
n.º 3	13,02	33,60	1,01	1,01	19,23	5,15	8,69	2,60	15,69	100,00	0,26	11,94	21049	145,13
n.º 4	12,78	32,97	1,01	1,01	19,23	5,07	8,54	2,55	16,85	100,00	0,28	10,95	20693	142,67
n.º 5	12,80	33,03	1,01	1,01	19,23	5,07	8,55	2,55	16,75	100,00	0,28	11,03	20617	142,15
n.º 6	12,80	33,03	1,01	1,01	19,23	5,07	8,55	2,55	16,75	100,00	0,28	11,03	20144	138,89
n.º 7	12,80	33,03	1,01	1,01	19,23	5,07	8,55	2,55	16,75	100,00	0,28	11,03	20989	144,71
n.º 8	12,80	33,03	1,01	1,01	19,23	5,07	8,55	2,55	16,75	100,00	0,28	11,03	20281	139,83
n.º 9	12,80	33,03	1,01	1,01	19,23	5,07	8,55	2,55	16,75	100,00	0,28	11,03	20700	142,72

*SFF = carga de vapor de sílice, ZT = zeolita; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador

Ejemplo 4

Usando el mismo procedimiento descrito en el ejemplo 1, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 10-16). Sus resistencias mecánicas a la compresión se midieron después de curar durante 28 días. Se añadió el 1,2% en peso de sólidos superplastificantes (ADVA Cast 575 de Grace Constructions) para reducir la demanda de agua y mejorar la fluidez de las pastas. Los potenciadores de la resistencia mecánica que incluyen fluoruro de sodio, oxalato de sodio, sulfato de sodio e hidróxido de aluminio se añadieron juntos al 1,15% en peso. En la muestra 13, se añadió fibra de acero de Bekaert Corporation al 2% en peso (no mostrado en la tabla 5) en la última etapa del mezclado para mejorar la ductilidad. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos						Disolución de activador				Suma	W/C	(K,Na) OH M	psi	MPa
	MK	BFS	SFF	ZT	Arena	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	SP	Agua					
n.º 10	10,46	27,00	2,00	1,00	29,97	4,66	6,98	2,15	1,20	14,58	100,00	0,30	10,97	21653	149,29
n.º 11	9,67	24,95	2,00	1,00	34,97	4,32	6,46	2,00	1,20	13,44	100,00	0,30	10,90	21970	151,48
n.º 12	8,87	22,89	2,00	1,00	39,97	3,95	5,92	1,84	1,20	12,35	100,00	0,31	10,74	21930	151,20
n.º 13	8,44	21,77	1,97	0,99	39,46	4,17	5,64	1,76	1,18	12,65	100,00	0,33	10,65	20468	141,12
n.º 14	11,26	29,07	2,00	1,00	24,98	5,01	7,51	2,30	1,20	15,67	100,00	0,30	11,09	20454	141,03
n.º 15	12,06	31,12	2,00	1,00	19,98	5,38	8,05	2,46	1,20	16,76	100,00	0,29	11,22	20488	141,26
n.º 16	7,17	18,50	1,97	0,98	49,23	3,20	4,78	1,51	1,18	11,48	100,00	0,36	9,17	19326	133,25

*SFF = carga de vapor de sílice, ZT = zeolita; SP = sólidos superplastificantes; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos respectivos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador

Ejemplo 5

Usando el mismo procedimiento descrito en el ejemplo 1, se prepararon muestras adicionales de GUHPC (muestras 17-33). Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 28 días. Se usó cuarzo triturado (QZ) con un tamaño de partícula medio de 15 µm de U.S. Silica como carga reactiva débil para mejorar la densidad de empaquetamiento de los productos. No se añadió superplastificante. En las muestras 18, 23, 29 y 32, se añadió el 2% en peso de fibra de acero de Bekaert Corporation para mejorar la ductilidad. En las muestras 20-22, el fluoruro (F)/Si molar en la disolución de activador se aumentó de desde 0,2 hasta 0,3 y 0,4, respectivamente, para evaluar el efecto de la concentración de fluoruro en el rendimiento. En consecuencia, el fluoruro de sodio se aumentó de desde el 0,90, el 1,35 hasta el 1,79% en peso de la mezcla de hormigón. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos							Activador				Suma	(K,Na)OH M	W/C	psi	MPa
	MK	BFS	SFF	ZT	QZ	Arena	Fibra	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua					
n.º 17	8,84	22,81	2,98	-	6,95	34,75	-	3,96	5,91	1,79	12,03	100,00	11,98	0,30	24094	166,12
n.º 18	7,48	19,29	2,95	-	7,87	39,33	1,97	3,33	4,99	1,52	11,29	100,00	9,75	0,34	24961	172,10
n.º 19	9,63	24,85	3,00	-	5,99	29,97	-	4,33	6,44	1,94	13,84	100,00	10,59	0,31	20469	141,13
n.º 20	9,63	24,85	3,00	-	5,99	29,97	-	4,33	6,44	1,94	13,84	100,00	10,59	0,31	24212	166,94
n.º 21	9,63	24,85	3,00	-	5,99	29,97	-	4,33	6,44	1,94	13,84	100,00	10,59	0,31	23370	161,13
n.º 22	9,63	24,85	3,00	-	5,99	29,97	-	4,33	6,44	1,94	13,84	100,00	10,59	0,31	20910	144,17
n.º 23	7,28	18,79	1,96	0,98	7,84	39,19	1,96	3,47	4,87	1,53	12,13	100,00	9,39	0,36	24150	166,51
n.º 24	7,68	19,82	1,98	0,99	7,93	39,64	-	3,59	5,13	1,61	11,62	100,00	10,17	0,33	23459	161,75
n.º 25	10,26	26,47	1,99	0,99	4,97	24,86	-	4,64	6,86	2,25	16,71	100,00	9,87	0,34	21929	151,20
n.º 26	11,37	29,33	1,97	0,98	3,94	19,69	-	5,27	7,59	2,32	17,54	100,00	10,36	0,32	20657	142,43
n.º 27	6,65	17,15	1,97	0,98	8,86	44,28	-	3,18	4,45	1,41	11,08	100,00	9,27	0,37	26005	179,30
n.º 28	6,48	16,73	2,00	1,00	9,00	45,00	-	3,19	4,33	1,61	10,65	100,00	10,16	0,36	24698	170,29
n.º 29	5,95	15,36	2,00	1,00	9,00	45,00	2,00	3,00	3,97	1,67	11,05	100,00	9,65	0,41	23188	159,88
n.º 30	5,70	14,71	1,97	0,98	9,84	49,19	-	2,76	3,81	1,23	9,82	100,00	8,89	0,39	21717	149,73
n.º 31	8,39	21,64	1,99	0,99	6,96	34,80	-	3,82	5,61	1,86	13,94	100,00	9,53	0,36	22955	158,27
n.º 32	5,12	13,21	2,00	-	10,00	50,00	2,00	2,95	3,49	1,24	10,00	100,00	9,12	0,43	21487	148,15
n.º 33	4,29	11,07	1,95	1,00	10,71	53,53	-	2,39	2,86	1,13	11,10	100,00	7,03	0,57	21456	147,93

*SFF = carga de vapor de sílice, ZT = zeolita; Fibra = fibra de acero; QZ = cuarzo triturado; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador

Ejemplo 6

Usando el mismo procedimiento descrito en el ejemplo 1, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 34-42). Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 28 días. En estas muestras, se usó arena de mampostería como agregado fino, y se añadieron vapor de sílice y zeolita juntas como cargas reactivas. Los potenciadores de la resistencia mecánica que incluyen fluoruro de sodio, oxalato de sodio, sulfato de sodio e hidróxido de aluminio se añadieron juntos al 1,15% en peso de la mezcla de hormigón en las muestras 34-40. Se añadieron fluoruro de sodio y oxalato de sodio al 0,8% en peso de la mezcla de hormigón en las muestras 41 y 42. No se añadió superplastificante. En la muestra 40, se añadió fibra de acero de Bekaert Corporation para mejorar la ductilidad. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos						Activador				Suma	(K,Na)OH M	W/C	psi	MPa
	MK	BFS	SFF	ZT	Arena	Fibra	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua					
n.º 34	10,20	26,32	2,00	1,00	29,97	-	4,56	6,94	2,24	16,77	100,00	9,65	0,35	20667	142,49
n.º 35	9,41	24,28	1,99	0,99	34,81	-	4,62	6,41	2,07	15,41	100,00	10,14	0,35	20672	142,53
n.º 36	8,60	22,20	2,00	1,00	39,96	-	3,88	5,86	2,07	14,44	100,00	9,66	0,36	20746	143,04
n.º 37	7,85	20,26	2,00	1,00	44,97	-	3,52	5,35	1,91	13,15	100,00	9,55	0,37	20775	143,24
n.º 38	11,16	28,79	2,00	1,00	25,00	-	5,47	7,60	2,43	16,55	100,00	11,33	0,31	20414	140,75
n.º 39	7,14	18,42	2,00	1,00	50,12	-	3,72	4,86	1,70	11,03	100,00	10,89	0,34	21432	147,77
n.º 40	5,96	15,38	2,00	1,00	55,00	2,00	3,29	4,06	1,46	9,85	100,00	10,43	0,37	20400	140,65
n.º 41	7,13	18,40	2,00	1,00	50,00	-	3,78	4,76	1,58	11,35	100,00	10,41	0,35	21296	146,83
n.º 42	6,30	16,26	2,00	1,00	55,00	-	3,39	4,21	1,49	10,35	100,00	10,23	0,37	20475	141,17

*SFF = carga de vapor de sílice, ZT = zeolita; Fibra = fibra de acero; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos respectivos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador

Ejemplo 7

Usando el mismo procedimiento descrito en el ejemplo 1, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 43-48). Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 28 días. En estas muestras, se usó arena de mampostería como agregado fino, y se añadieron vapor de sílice y/o zeolita como cargas reactivas. Los potenciadores de la resistencia mecánica que incluyen fluoruro de sodio, oxalato de sodio, sulfato de sodio e hidróxido de aluminio se añadieron juntos al 1,15% en peso de la mezcla de hormigón en las muestras 43-45. Se añadieron fluoruro de sodio y/o oxalato de sodio como potenciadores de la resistencia mecánica al 0,7% en peso de la mezcla de hormigón en las muestras 46-48. No se añadió superplastificante. Se usaron cenizas volantes de clase F de Boral Material Technologies como carga reactiva. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos						Activador				Suma	(K,Na)OH M	W/C	psi	MPa
	MK	BFS	SFF	ZT	FAF	Arena	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua					
n.º 43	4,61	11,90	2,00	-	10,00	55,00	2,50	3,14	1,70	9,15	100,00	10,26	0,44	22624	155,99
n.º 44	6,26	16,15	2,00	1,00	9,00	45,00	3,07	4,34	1,73	11,45	100,00	9,63	0,40	22862	157,63
n.º 45	7,16	18,49	2,00	1,00	8,00	40,00	3,52	4,97	1,91	12,95	100,00	9,77	0,39	22235	153,30
n.º 46	4,77	12,32	2,96	-	8,89	54,36	2,65	3,09	1,46	9,52	100,00	9,50	0,45	21652	149,29
n.º 47	4,68	12,08	2,00	-	10,00	55,00	2,58	3,19	1,72	8,75	100,00	10,88	0,42	19970	137,69
n.º 48	4,39	11,33	2,00	2,00	5,00	60,00	2,46	2,99	1,59	8,25	100,00	10,60	0,43	23007	158,63

*SFF = carga de vapor de sílice, ZT = zeolita; FFA = cenizas volantes de clase F; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para

preparar disoluciones de activador

Ejemplo 8

Usando el mismo procedimiento descrito en el ejemplo 1, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 49-52). Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 28 días. En estas muestras, se usó arena de mampostería como agregado fino, y se añadieron vapor de sílice y/o zeolita como carga reactiva. Se usó cuarzo triturado (QZ) con un tamaño de partícula medio de 15 µm de U.S. Silica como carga reactiva débil. Además, se añadió arena de cuarzo gruesa (Q-ROK n.º 4) de U.S. Silica para mejorar la densidad de empaquetamiento. Los potenciadores de la resistencia mecánica usados en estas muestras incluían hidróxido de aluminio, carbonato de sodio, fosfato de sodio, sulfato de sodio, oxalato de sodio y fluoruro. La adición total de potenciadores de la resistencia mecánica fue del 0,85% en peso de la mezcla de hormigón en las muestras 49 y 51. Se añadió fluoruro de sodio solo como potenciador de la resistencia mecánica al 0,25% en peso de la mezcla de hormigón en las muestras 50 y 52. No se añadió superplastificante. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos						Activador				Suma	(K,Na)OH M	W/C	psi	MPa
	MK	BFS	SFF	CA	QZ	Arena	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua					
n.º 49	5,84	15,06	2,98	35,11	6,50	14,96	3,13	4,05	1,35	11,02	100,00	9,66	0,36	21892	150,94
n.º 50	7,54	19,47	1,99	29,61	5,48	12,61	4,12	5,23	1,29	12,65	100,00	9,96	0,38	22699	156,50
n.º 51	6,68	17,24	2,98	32,06	5,94	13,65	3,43	4,63	1,54	11,86	100,00	10,04	0,34	20169	139,06
n.º 52	5,06	13,05	2,98	38,17	7,07	16,26	2,73	3,51	1,25	9,94	100,00	9,49	0,40	20561	141,76

*SFF = carga de vapor de sílice, CA = agregado más grueso; QZ = cuarzo triturado; Fibra = fibra de acero; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos respectivos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador

Ejemplo 9

Usando el mismo procedimiento descrito en el ejemplo 1, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 53-56). Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 28 días. En estas muestras, se usó arena de mampostería como agregado fino; y se añadió vapor de sílice como carga reactiva submicrométrica. Se usó cuarzo triturado (QZ) de U.S. Silica como carga reactiva débil. Se añadió fluoruro de sodio (NaF) al 0,25% en peso de la mezcla de hormigón como potenciador de la resistencia mecánica. No se añadió superplastificante. En la muestra 55, se añadió fibra de acero de Bekaert Corporation para mejorar la ductilidad. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos						Activador				Suma	(K,Na)OH M	W/C	psi	MPa
	MK	FS	SFF	CZ	Arena	Fibra	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua					
n.º 53	6,51	16,80	2,00	9,00	45,00	-	3,34	4,52	1,48	11,35	100,00	9,51	9,51	25072	172,87
n.º 54	5,55	14,32	2,00	10,00	50,00	-	2,97	3,85	1,27	10,05	100,00	9,20	9,20	25681	177,06
n.º 55	4,91	12,67	2,93	9,76	48,78	1,95	2,83	3,41	1,21	11,56	100,00	7,76	7,76	20997	144,77
n.º 56	5,88	15,17	2,94	13,71	41,14	-	3,43	4,11	1,44	12,19	100,00	9,02	9,02	22154	152,75

*SFF = carga de vapor de sílice, QZ = cuarzo triturado; Fibra = fibra de acero; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador

Ejemplo 10

Usando el mismo procedimiento descrito en el ejemplo 1, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 57-64). Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 28 días. En estas muestras, se usó arena de mampostería como agregado fino; y se añadieron vapor de sílice y/o zeolita como carga reactiva. Se usó cuarzo triturado (QZ) de U.S. Silica como carga reactiva débil en las muestras 62 y 64. Las disoluciones de activador se prepararon usando predominantemente

hidróxido de sodio y vapor de sílice de desechos industriales de Norchem Inc. Los potenciadores de la resistencia mecánica usados en estas muestras incluían hidróxido de aluminio, carbonato de sodio, fosfato de sodio, sulfato de sodio, oxalato de sodio y fluoruro. La adición total de potenciadores de la resistencia mecánica fue menor del 1,0% en peso de la mezcla de hormigón. Estos se disolvieron en agua antes de la disolución de hidróxidos alcalinos. No se añadió superplastificante. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 11.

Tabla 11. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos						Activador				Suma	(Na,K)OH M	W/C	psi	MPa
	MK	BFS	SFF	ZT	QZ	Arena	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua					
n.º 57	9,93	25,62	1,98	0,99	-	34,66	0,13	6,63	5,19	14,86	100,00	10,84	0,31	23804	164,13
n.º 58	10,56	27,26	1,97	0,98	-	29,51	0,39	7,06	5,53	16,74	100,00	10,69	0,34	20258	139,67
n.º 59	8,99	23,21	1,96	0,98	-	39,25	0,60	6,01	4,72	14,28	100,00	10,82	0,35	20529	141,54
n.º 60	11,34	29,26	1,96	0,98	-	24,55	0,58	7,58	5,93	17,82	100,00	11,05	0,34	20910	144,17
n.º 61	12,10	31,22	1,96	0,98	-	19,65	0,57	8,09	6,30	19,13	100,00	10,98	0,34	19760	136,24
n.º 62	5,67	14,64	1,97	-	9,87	49,35	0,42	3,83	3,49	10,76	100,00	10,13	0,43	22433	154,67
n.º 63	7,55	19,49	2,00	-	-	50,00	-	5,05	4,16	11,75	100,00	10,32	0,36	21596	148,90
n.º 64	6,52	16,82	1,96	-	8,80	44,02	0,31	4,35	3,86	13,37	100,00	9,06	0,45	20898	144,09

*SFF = carga de vapor de sílice, QZ = cuarzo triturado; Fibra = fibra de acero; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos respectivos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador.

Ejemplo 11

Usando un procedimiento similar al descrito en el ejemplo 1, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 65-67). Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 28 días. En estas muestras, se usó arena de mampostería como agregado fino; y se usó vapor de sílice de Norchem Inc. como carga reactiva submicrométrica. Se usó cuarzo triturado (QZ) de U.S. Silica como carga reactiva débil en las muestras 65 y 66. Se usaron cenizas volantes de clase F de Boral Material Technologies para reemplazar el polvo de cuarzo triturado en la muestra 67. Las disoluciones de activador se prepararon usando disolución de silicato de sodio disponible comercialmente (disolución de silicato de sodio RuTM, PQ Inc.), en lugar de disolver el vapor de sílice en una disolución de hidróxido alcalino. Se añadió fluoruro de sodio (NaF) al 0,25% en peso de la mezcla de hormigón como potenciador de la resistencia mecánica. No se añadió superplastificante. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos						Activador				Suma	(Na,K)OH M	W/C	psi	MPa
	MK	FS	SFF	QZ	FAF	Arena	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua					
n.º 65	6,77	17,46	1,98	8,89	-	44,46	0,41	4,52	3,90	11,60	100,00	10,60	0,38	22485	155,03
n.º 66	5,51	14,22	1,99	9,95	-	49,74	0,13	3,68	3,70	11,08	100,00	9,90	0,45	20622	142,18
n.º 67	5,58	14,41	1,99	-	9,93	49,64	0,23	3,73	3,63	10,87	100,00	10,07	0,44	21448	147,88

*SFF = carga de vapor de sílice; QZ = cuarzo triturado; FFA = cenizas volantes de clase F

Ejemplo 12

Usando el mismo procedimiento tal como se describe en el ejemplo 1, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 68-70). Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 28 días. En estas muestras, se usó arena de mampostería como agregado fino; y se usaron vapor de sílice de Norchem Inc. junto con cenizas volantes de clase F de Boral Material Technologies como carga reactiva en las muestras 68 y 70. Se usó vapor de sílice junto con cuarzo triturado (QZ) de U.S. Silica como carga reactiva en la muestra 69. Las disoluciones de activador se prepararon disolviendo vapor de sílice de Norchem Inc. en disolución de hidróxido alcalino con razones en masa K₂O/Na₂O a 0,8. Se añadió fluoruro de sodio (NaF) al 0,25% en peso de la mezcla de hormigón como potenciador de la resistencia mecánica. No se añadió superplastificante. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos							Activador				Suma	(Na,K)OH M	W/C	psi	MPa
	MK	FS	SFF	ZT	QZ	FAF	Arena	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua					
n.º 68	6,31	16,29	2,98	0,99	-	8,95	44,73	2,05	4,04	2,63	11,03	100,00	10,43	0,39	22653	156,19
n.º 69	5,48	14,15	2,95	-	9,82	-	49,09	2,25	3,37	2,33	10,56	100,00	10,27	0,43	24582	169,49
n.º 70	5,46	14,10	2,96	-	-	9,88	49,39	2,02	3,51	2,45	10,23	100,00	10,47	0,42	23307	160,70

*SFF = carga de vapor de sílice, ZT = zeolita; QZ = cuarzo triturado; FAF = cenizas volantes de clase F; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos respectivos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador.

Ejemplo 13

Usando un procedimiento similar al descrito en el ejemplo 1, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 71-88). El mezclado se llevó a cabo con una mezcladora de alta intensidad (mezcladora K-Lab de Lancaster Products). Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 28 días. En estas muestras, se usó arena de mampostería como agregado fino; y se usó vapor de sílice de Norchem Inc. junto con cuarzo triturado (QZ) de U.S. Silica en las muestras 71-79. Se usaron vapor de sílice junto con cenizas volantes de clase F de Boral Material Technologies como carga reactiva en las muestras 80 a 86. Se usó zeolita como carga reactiva en las muestras 87 y 88. Las disoluciones de activador se prepararon disolviendo vapor de sílice de Norchem Inc. en disolución de hidróxido alcalino con razones en masa de K₂O/Na₂O a de 2 a 3. Se añadió fibra de acero de Bekaert Corporation para mejorar la ductilidad en las muestras 71, 73, 76, 81, 85 y 87. Se añadió fluoruro de sodio (NaF) al 0,25% en peso de la mezcla de hormigón como potenciador de la resistencia mecánica. No se añadió superplastificante. La composición, la W/C, la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador y la resistencia mecánica a la compresión de las muestras adicionales se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) (MPa) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos							Activador				Suma	(K,Na)OH M	W/C	psi	MPa
	MK	BFS	SFF	QZ	FAF	Arena	Fibra	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua					
n.º 71	6,37	16,43	1,95	8,78	-	43,88	2,50	3,38	4,41	1,44	10,87	100,00	9,90	0,37	23342	160,94
n.º 72	6,56	16,92	2,01	9,04	-	45,20	-	3,49	4,54	1,49	10,75	100,00	10,27	0,36	25686	177,10
n.º 73	6,39	16,50	1,96	8,81	-	44,07	2,51	3,40	4,43	1,45	10,48	100,00	10,27	0,36	25918	178,70
n.º 74	5,57	14,37	2,00	10,00	-	50,00	-	3,00	3,86	1,34	9,85	100,00	9,64	0,39	21200	146,17
n.º 75	5,64	14,55	2,00	10,00	-	50,00	-	3,08	3,92	1,36	9,45	100,00	10,21	0,37	24269	167,33
n.º 76	5,50	14,19	1,95	9,75	-	48,75	2,50	3,00	3,82	1,33	9,21	100,00	10,21	0,34	24652	169,97
n.º 77	4,63	11,94	2,00	11,00	-	55,00	-	2,55	3,09	1,14	8,65	100,00	9,08	0,43	20638	142,30
n.º 78	4,62	11,92	2,00	11,00	-	55,00	-	2,55	3,09	1,18	8,65	100,00	9,19	0,43	20700	142,72
n.º 79	4,93	19,77	2,00	9,00	-	45,00	-	2,80	4,02	1,73	10,75	100,00	9,71	0,36	21132	145,70
n.º 80	4,72	12,17	2,00	-	10,00	55,00	-	2,55	3,21	1,60	8,75	100,00	10,46	0,42	20343	140,26
n.º 81	4,60	11,86	1,95	-	9,75	53,62	2,50	2,49	3,13	1,56	8,53	100,00	10,46	0,42	21285	146,75
n.º 82	4,70	12,13	2,00	-	10,02	55,12	-	2,92	3,21	1,35	8,55	100,00	10,64	0,41	22952	158,25
n.º 83	4,58	11,82	1,95	-	9,77	53,74	2,51	2,85	3,12	1,32	8,33	100,00	10,64	0,41	23807	164,14
n.º 84	4,84	12,48	2,02	-	10,08	55,46	-	2,83	3,30	1,41	7,59	100,00	11,78	0,36	27415	189,02
n.º 85	4,71	12,16	1,97	-	9,83	54,06	2,52	2,76	3,21	1,38	7,40	100,00	11,78	0,35	23369	161,12
n.º 86	4,80	12,37	2,00	-	10,00	55,00	-	2,81	3,27	1,40	8,35	100,00	11,30	0,38	20816	143,52
n.º 87	6,18	15,95	1,95	-	0,971	53,62	2,50	3,36	4,13	1,42	9,90	100,00	10,45	0,36	22688	156,43
n.º 88	6,34	16,36	2,00	-	1,00**	55,00	-	3,45	4,24	1,46	10,15	100,00	10,45	0,36	21532	148,46

*SFF = carga de vapor de sílice, QZ = cuarzo triturado; FAF = cenizas volantes de clase F; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador.

** Zeolita

Ejemplo 14

Usando el mismo procedimiento tal como se describe en los ejemplos 71-88, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 89-92). El mezclado se llevó a cabo con una mezcladora de alta intensidad (mezcladora K-Lab de Lancaster Products). Se determinó el tiempo de fraguado inicial usando un sistema Vicat. Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 3 horas, 6 horas, 1 día, 3 días, 7 días, 15 días, 21 días y 28 días. En estas muestras, se usó arena de mampostería como agregado fino; y se usaron vapor de sílice de Norchem Inc. junto con cenizas volantes de clase F de Boral Material Technologies como carga reactiva en el ejemplo 89. Se usaron vapor de sílice junto con cuarzo triturado (QZ) de U.S. Silica como carga reactiva en las muestras 90-92. Las disoluciones de activador se prepararon disolviendo vapor de sílice de Norchem Inc. en disolución de hidróxido alcalino con razones en masa de K₂O/Na₂O a 2,2. No se añadió superplastificante. Se añadió fluoruro de sodio (NaF) como potenciador de la resistencia mecánica. La composición, la W/C y la concentración de hidróxidos alcalinos en la disolución de activador de las muestras adicionales se muestran en la tabla 15. Las resistencias mecánicas a la compresión de las muestras 89-92 en los tiempos indicados anteriormente se muestran en la tabla 16. En la figura 1 se muestra un gráfico de estas resistencias mecánicas a la compresión frente al tiempo de curado.

Tabla 15. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componentes secos						Activador				Suma	(K,Na)OH M	W/C
	MK	BFsl	SFF	QZ	FFA	Arena	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua			
n.º 89	4,82	12,43	2,01	-	10,04	55,24	2,82	3,28	1,41	7,94	100,00	11,30	0,38
n.º 90	6,56	16,92	2,01	9,04	-	45,20	3,49	4,54	1,49	10,75	100,00	10,27	0,36
n.º 91	5,64	14,55	2,00	10,00	-	50,00	3,08	3,92	1,36	9,45	100,00	9,96	0,37
n.º 92	4,62	11,92	2,00	11,00	-	55,00	2,55	3,09	1,18	8,65	100,00	9,19	0,43

*SFF = carga de vapor de sílice, QZ = cuarzo triturado; FAF = cenizas volantes de clase F; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador.

** Zeolita

Tabla 16. Resistencia mecánica a la compresión (psi) de muestras curadas para diferentes tiempos

Muestra	Tiempos de fraguado inicial/final	Resistencia mecánica a la compresión (psi)							
		3 horas	6 horas	24 horas	3 días	7 días	15 días	21 días	28 días
n.º 89	25/35 min	1095	2339	7026	13794	17360	21361	20949	23633
n.º 90	63/75 min	1512	2846	7518	15278	19351	24268	22918	27211
n.º 91	50/57 min	1312	2567	5780	14435	19221	25390	29104	25847
n.º 92	42/68 min	1257	2016	6043	13823	17972	22080	23524	23174

Tabla 16'. Resistencia mecánica a la compresión (MPa) de muestras curadas para diferentes tiempos

Muestra	Tiempos de fraguado inicial/final	Resistencia mecánica a la compresión (MPa)							
		3 horas	6 horas	24 horas	3 días	7 días	15 días	21 días	28 días
n.º 89	25/35 min	7,55	16,13	48,44	95,11	119,70	147,28	144,44	162,94
n.º 90	63/75 min	10,42	19,62	51,83	105,34	133,42	167,32	158,01	187,61
n.º 91	50/57 min	9,05	17,70	39,85	99,53	132,52	175,06	200,67	178,21
n.º 92	42/68 min	8,67	13,90	41,67	95,31	123,91	152,24	162,19	159,78

Ejemplo 15

Usando el mismo procedimiento tal como se describe en el ejemplo 13, se prepararon muestras de GUHPC adicionales (muestras 93-98). El mezclado se llevó a cabo con una mezcladora de alta intensidad (mezcladora K-Lab de Lancaster Products). Las muestras se curaron a temperatura ambiente y se midieron sus resistencias mecánicas a la compresión después de curar durante 3 horas, 6 horas, 1 día, 3 días, 7 días, 15 días, 21 días y 28 días. En estas muestras, se usó arena de mampostería como agregado fino; y se usaron vapor de sílice de Norchem Inc. junto con cenizas volantes de clase F de bajo contenido de CaO de las centrales eléctricas de Brandon Shores, Baltimore, Maryland (Separation Technologies) como carga reactiva en las muestras 93, 95, 97 y 99. Se usó vapor de sílice de Norchem Inc. junto con cenizas volantes de clase F de alto contenido de CaO de la central eléctrica de Limestone, Jewett, Texas (Headwater Resources) como carga reactiva en las muestras 94, 96, 98 y 100. Las disoluciones de activador se prepararon disolviendo el vapor de sílice de Norchem Inc. en disolución de hidróxido alcalino con razones en masa de K_2O/Na_2O a 2,2. No se añadió superplastificante. Se añadió fluoruro de sodio (NaF) al 0,25% en peso de la mezcla de hormigón como potenciador de la resistencia mecánica. La composición, la W/C y la concentración de hidróxidos alcalinos en disolución de activador de las muestras adicionales se muestran en la tabla 17. Las resistencias mecánicas a la compresión de las muestras 93-98 en los tiempos indicados anteriormente se muestran en la tabla 18.

Tabla 17. Composición (% en peso), W/C, concentración molar de hidróxidos alcalinos en disolución de activador y resistencia mecánica a la compresión (psi) de muestras adicionales de GUHPC*

Muestra	Componente seco					Activador				Suma	(K,Na)OH (M)	W/C	Tipo de FFA
	MK	BFS	SFF	FFA	Arena	K ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	Agua				
n.º 93	5,64	14,55	2,00	10,00	50,00	3,08	3,92	1,36	9,45	100,00	10,21	0,38	Bajo contenido de CaO
n.º 94	5,64	14,55	2,00	10,00	50,00	3,08	3,92	1,36	9,45	100,00	10,21	0,38	Alto contenido de CaO
n.º 95	4,62	11,92	2,00	11,00	55,00	2,55	3,09	1,18	8,65	100,00	9,19	0,43	Bajo contenido de CaO
n.º 96	4,62	11,92	2,00	11,00	55,00	2,55	3,09	1,18	8,65	100,00	9,19	0,43	Alto contenido de CaO
n.º 97	4,80	12,37	2,00	10,00	55,00	2,81	3,27	1,40	8,35	100,00	10,78	0,38	Bajo contenido de CaO
n.º 98	4,80	12,37	2,00	10,00	55,00	2,81	3,27	1,40	8,35	100,00	10,78	0,38	Alto contenido de CaO
n.º 99	6,53	16,85	2,00	3,47	4,52	1,48	45,00	9,00	11,15	100,00	9,90	0,36	Bajo contenido de CaO
n.º 100	6,53	16,85	2,00	3,47	4,52	1,48	45,00	9,00	11,15	100,00	9,90	0,36	Alto contenido de CaO

*SFF = carga de vapor de sílice; FFA = cenizas volantes de clase F; Na₂O y K₂O añadidos como hidróxidos respectivos, y SiO₂ añadido como vapor de sílice (por ejemplo, producto de desecho de aleación de Fe-Si) para preparar disoluciones de activador

Tabla 18. Resistencia mecánica a la compresión (psi) de muestras curadas para diferentes tiempos

Muestra	Resistencia mecánica a la compresión (psi)							
	3 horas	6 horas	24 horas	3 días	7 días	14 días	21 días	28 días
n.º 93	2497	5793	10468	16210	19322	24645	21210	22506
n.º 94	2107	4403	10875	15940	19357	20634	21896	21982
n.º 95	1430	2098	6663	12054	15287	19263	20143	ND
n.º 96	1233	2452	7263	12625	16905	20968	ND	ND
n.º 97	1313	3207	9355	13420	16932	18048	20901	20873

n.º 98	1666	3609	9179	-	18621	20589	20649	ND
n.º 99	3243	6272	7795	12772	15381	20950	ND	ND
n.º 100	2445	3453	8744	12625	18931	20968	ND	ND

Tabla 18'. Resistencia mecánica a la compresión (MPa) de muestras curadas para diferentes tiempos

Muestra	3 horas	6 horas	24 horas	3 días	7 días	14 días	21 días	28 días
n.º 93	17,22	39,94	72,17	111,76	133,22	169,92	146,24	155,17
n.º 94	14,53	30,36	74,89	109,90	133,46	142,27	150,97	151,56
n.º 95	9,86	14,47	45,94	83,11	105,40	132,81	138,88	ND
n.º 96	8,50	16,91	50,08	87,05	116,55	144,57	ND	ND
n.º 97	9,05	22,11	64,50	92,53	116,74	124,44	144,11	143,91
n.º 98	11,49	24,88	63,29	-	128,39	141,96	142,37	ND
n.º 99	22,36	43,24	53,74	88,06	106,05	144,45	ND	ND
n.º 100	16,86	23,81	60,29	87,05	130,52	144,57	ND	ND

- 5 Los métodos descritos de manera ilustrativa en el presente documento pueden practicarse adecuadamente en ausencia de cualquier elemento o elementos, limitación o limitaciones, no divulgados específicamente en el presente documento. Por tanto, por ejemplo, los términos “que comprende”, “que incluye”, “que contiene”, etc., se leerán de manera expansiva y sin limitación. Además, los términos y expresiones empleados en el presente documento se han usado como términos de descripción y no de limitación, y no hay intención en el uso de tales términos y expresiones
- 10 de excluir cualquier equivalente de las características mostradas y descritas o partes de las mismas. Se reconoce que son posibles diversas modificaciones dentro del alcance de la invención reivindicada. Por tanto, debe entenderse que, aunque la presente invención se ha divulgado específicamente mediante realizaciones preferidas y características opcionales, los expertos en la técnica pueden recurrir a la modificación y variación de la invención realizada en este respecto divulgada en el presente documento, y que tales modificaciones y variaciones se
- 15 consideran dentro del alcance de esta invención.

La invención se ha descrito de manera amplia y genérica en el presente documento. Cada una de las especies más estrechas y agrupaciones subgenéricas que están dentro de la divulgación genérica también forman parte de los métodos. Esto incluye la descripción genérica de los métodos con una condición o limitación negativa que elimina

20 cualquier objeto del género, independientemente de si el material eliminado se menciona o no específicamente en el presente documento, siempre que estén dentro del alcance de las reivindicaciones independientes.

Otras realizaciones están dentro de las siguientes reivindicaciones. Además, cuando las características o los aspectos de los métodos se describen en cuanto a grupos de Markush, los expertos en la técnica reconocerán que

25 la invención también se describe así en cuanto a cualquier miembro individual o subgrupo de miembros del grupo de Markush.

REIVINDICACIONES

1. Mezcla de hormigón de ultra alto rendimiento de material compuesto geopolimérico (GUHPC), que comprende:
 - (a) un aglutinante que comprende uno o más seleccionados del grupo que consiste en aluminosilicato reactivo y aluminosilicato alcalinotérreo reactivo; en la que el aglutinante comprende del 10 al 50% en peso de la mezcla de GUHPC;
 - (b) un activador alcalino que comprende una disolución acuosa de hidróxido metálico y silicato metálico;
 - (c) uno o más agregados; y
 - (d) una o más cargas con un tamaño de partícula de hasta 75 μm , en la que el contenido de carga combinada es de hasta el 35% en peso de la mezcla de GUHPC;en la que un tipo de la una o más cargas comprende una carga que tiene un tamaño de partícula de entre 0,05 y 1 μm , y se selecciona del grupo que consiste en vapor de sílice, sílice precipitada, carbonato de calcio ultrafino, alúmina micrométrica y partículas submicrométricas de óxidos metálicos;
 - y en la que el otro tipo de la una o más cargas tiene un tamaño de partícula de entre 1 y 75 μm y se selecciona del grupo que consiste en cuarzo, zeolita y vidrio esmerilado triturados.
2. Mezcla de GUHPC según la reivindicación 1, en la que el aglutinante comprende uno o más aluminosilicatos reactivos que comprenden del 0 al 30% en peso de la mezcla de GUHPC; en la que opcionalmente el uno o más aluminosilicatos reactivos se seleccionan del grupo que consiste en metacaolín, vidrios de aluminosilicato reactivo y cenizas volantes de clase F ultrafinas;
 - o en la que el aglutinante comprende uno o más aluminosilicatos alcalinotérreos reactivos que comprenden del 2 al 40% en peso de la mezcla de GUHPC; en la que opcionalmente el uno o más aluminosilicatos alcalinotérreos reactivos se seleccionan del grupo que consiste en escoria de alto horno granulada, aluminosilicato de calcio vítreo (VCAS), cenizas volantes de clase C y polvo de horno de hormigón.
3. Mezcla de GUHPC según la reivindicación 1, en la que el aglutinante comprende aluminosilicato reactivo y aluminosilicato alcalinotérreo reactivo; en la que opcionalmente el aluminosilicato reactivo es metacaolín y en la que el aluminosilicato alcalinotérreo reactivo es escoria de alto horno granulada molida;
 - en la que opcionalmente el aluminosilicato reactivo comprende del 2 al 15% en peso de la mezcla de GUHPC;
 - o en la que el aluminosilicato alcalinotérreo reactivo comprende del 8 al 25% en peso de la mezcla de GUHPC.
4. Mezcla de GUHPC según la reivindicación 1, en la que el contenido de carga combinada es de desde el 2 hasta el 25% en peso de la mezcla de GUHPC.
5. Mezcla de GUHPC según la reivindicación 1, en la que el uno o más agregados tiene un tamaño de partícula entre 0,075 y 10 mm, y comprende hasta el 75% en peso, preferiblemente del 30 al 60% en peso de la mezcla de GUHPC;
 - en la que opcionalmente el uno o más agregados se selecciona del grupo que consiste en cuarzo, granito, basalto, gneis, piedra caliza y bauxita calcinada.
6. Mezcla de GUHPC según la reivindicación 1, en la que el uno o más agregados comprenden uno o más agregados finos con un tamaño de partícula de entre 0,075 y 0,75 mm; o
 - en la que la disolución de activador alcalino es del 10 al 40% en peso, más preferiblemente del 15 al 25% en peso, de la mezcla de GUHPC.
7. Mezcla de GUHPC según la reivindicación 1, en la que el hidróxido metálico comprende hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, o ambos;
 - o en la que el hidróxido metálico comprende del 2 al 10% en peso como M_2O de la mezcla de GUHPC;
 - o en la que el silicato metálico comprende silicato de sodio, silicato de potasio, o ambos;

o en la que el silicato metálico comprende del 2 al 10% en peso como SiO_2 de la mezcla de GUHPC;

o en la que el activador alcalino comprende agua a del 4 al 25% en peso, más preferiblemente del 5 al 15% en peso, de la mezcla de GUHPC.

8. Mezcla de GUHPC según la reivindicación 1, que comprende además una o más fibras, que comprenden hasta el 15% en peso de la mezcla de GUHPC; opcionalmente en la que la una o más fibras se seleccionan del grupo que consiste en fibra orgánica, fibra de vidrio, fibra mineral, fibra de basalto, fibra de carbono, nanofibra y fibra metálica.

9. Mezcla de GUHPC según la reivindicación 1, que comprende además uno o más potenciadores de la resistencia mecánica, que comprenden hasta el 2% en peso de la mezcla de GUHPC; en la que el uno o más potenciadores de la resistencia mecánica se seleccionan del grupo que consiste en carbonato alcalino, fosfato alcalino, sulfato alcalino, oxalato alcalino y fluoruro alcalino.

10. Mezcla de GUHPC según la reivindicación 1, que comprende además sólidos superplastificantes, que comprenden hasta el 5% en peso de la mezcla de GUHPC;

o que comprenden además un retardador de fraguado, que comprende hasta el 5% en peso de la mezcla de GUHPC.

11. Mezcla de GUHPC según la reivindicación 1, en la que la densidad de empaquetamiento de todos los componentes sólidos en la mezcla de GUHPC es de al menos 0,5 (v/v), preferiblemente al menos 0,6 (v/v), más preferiblemente al menos 0,7 (v/v).

12. Mezcla de GUHPC según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en la que la mezcla de GUHPC tiene una razón de agua con respecto a sólidos geopoliméricos (W/C) de entre 0,20 y 0,50 y más preferiblemente entre 0,30 y 0,45, en la que el término "sólidos geopoliméricos" se define como la suma de las masas de constituyentes reactivos en el aglutinante, es decir, aluminosilicato reactivo y/o aluminosilicato alcalinotérreo reactivo, y masas de óxido alcalino y dióxido de silicio disueltas en el activador; la razón W/C se determina mediante un conjunto de parámetros restrictivos tales como la razón molar $\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$ para el metacaolín si está presente, la fracción en masa de H_2O para el aluminosilicato alcalinotérreo reactivo y otros materiales de aluminosilicatos reactivos distintos del metacaolín, la fracción en masa de H_2O para las cargas reactivas, así como si se aplica un superplastificante y cuánto; si el contenido de humedad del agregado fino se desvía desde aproximadamente el 2,5% en peso, la mezcla debe corregirse por la diferencia de H_2O .

13. Método de elaboración de un producto de hormigón de ultra alto rendimiento de material compuesto geopolimérico (GUHPC), que comprende:

a. mezclar una mezcla seca de GUHPC con una disolución de activador para formar una pasta de GUHPC; y

b. fraguar y curar la pasta de GUHPC para formar un producto de GUHPC;

en el que dicha mezcla seca de GUHPC comprende un aglutinante a del 10 al 50% en peso, comprendiendo el aglutinante uno o más seleccionados del grupo que consiste en aluminosilicato reactivo y aluminosilicato alcalinotérreo reactivo, y la disolución de activador comprende una disolución acuosa de hidróxido metálico y silicato metálico; la mezcla seca comprende además uno o más agregados, y una o más cargas;

en el que el contenido de carga combinada es de hasta el 35% en peso de la mezcla de GUHPC;

en el que un tipo de la una o más cargas con un tamaño de partícula de hasta $75\ \mu\text{m}$, tiene un tamaño de partícula de entre $0,05$ y $1\ \mu\text{m}$, y se selecciona del grupo que consiste en vapor de sílice, sílice precipitada, carbonato de calcio ultrafino, alúmina micrométrica y partículas submicrométricas de óxidos metálicos;

y en el que el otro tipo de la una o más cargas tiene un tamaño de partícula de entre 1 y $75\ \mu\text{m}$ y se selecciona del grupo que consiste en cuarzo, zeolita y vidrio esmerilado triturados.

14. Método según la reivindicación 13, en el que el fraguado de la pasta de GUHPC tiene un tiempo de fraguado de 30 minutos a 3 horas.

15. Método según la reivindicación 13, en el que el fraguado de la pasta de GUHPC tiene una temperatura de fraguado de entre 20 y 90°C .

Figura 1

