

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 964 315**

51 Int. Cl.:

**C04B 7/44**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.06.2020 PCT/US2020/040171**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.12.2020 WO20264516**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.06.2020 E 20743480 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.09.2023 EP 3990411**

54 Título: **Método de fabricación de reactivos cementosos**

30 Prioridad:

**27.06.2019 US 201962867480 P**

**03.04.2020 US 202063004673 P**

**14.05.2020 US 202063025148 P**

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

**05.04.2024**

73 Titular/es:

**TERRA CO2 TECHNOLOGY HOLDINGS, INC.**

**(100.0%)**

**601 16th Street Suite C324**

**Golden CO 80401, US**

72 Inventor/es:

**LAKE, DONALD**

74 Agente/Representante:

**SÁEZ MAESO, Ana**

**ES 2 964 315 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**

Método de fabricación de reactivos cementosos

Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

5 Esta solicitud reivindica el beneficio según 35 USC § 119(e) de la Solicitud Provisional de Estados Unidos N° 62/867,480, presentada el 27 de junio de 2019, y de Solicitud Provisional de Estados Unidos No. 63/004,673, presentada el 3 de abril de 2020, y de Solicitud Provisional de Estados Unidos No. 63/025,148, presentada el 14 de mayo de 2020.

Antecedentes

10 El campo de la presente divulgación está relacionado con reactivos cementosos, y más particularmente, con la creación de materiales reactivos cementosos relativamente homogéneos y materiales cementosos a partir de abundantes materias primas heterogéneas.

15 El hormigón ha desempeñado un papel importante en la civilización durante miles de años y sigue siendo el material de construcción más utilizado. El cemento es el componente aglutinante esencial del hormigón que permite que las lechadas de hormigón fluidas se endurezcan hasta formar un material compuesto útil a temperatura ambiente. Se han utilizado con éxito muchas sustancias químicas aglutinantes para fabricar hormigón, pero el cemento Portland y sus variaciones han sido el aglutinante de hormigón dominante durante casi 200 años. A pesar de los avances en la eficiencia de la producción y el rendimiento de los materiales, existen problemas importantes e intrínsecos con la química del cemento Portland que no pueden resolverse a ningún coste razonable con los métodos actuales.

20 La producción de cemento Portland es un proceso intensivo de CO<sub>2</sub> que causa alrededor del 8% de las emisiones antropogénicas globales de CO<sub>2</sub>. Algunas estimaciones proyectan que la demanda de cemento aumentará por 12-23% para 2050. Sin embargo, la creciente demanda absoluta de cemento está en desacuerdo con la necesidad de una descarbonización completa de la economía que también se requiere para 2050 para evitar los efectos catastróficos del cambio climático, según el Informe Climático del IPCC de la ONU 2018. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de reducir drásticamente las emisiones específicas de CO<sub>2</sub> de cemento, especialmente porque el volumen absoluto de producción está aumentando.

25 Una forma en que la industria ha intentado reducir la emisión de CO<sub>2</sub> de cemento se realiza mediante el desarrollo de cementos geopolímeros, que generalmente son polímeros inorgánicos de aluminosilicato que curan mediante un proceso de geopolimerización. Los cementos geopolímeros comercialmente relevantes que se utilizan hoy en día requieren acceso a varios reactivos sólidos específicos (comúnmente: metacaolín (MK-750), escoria granulada molida de alto horno (GGBFS), y cenizas volantes de carbón). Sin embargo, estos reactivos no pueden satisfacer la transición global a cementos bajos en CO<sub>2</sub> porque el suministro es relativamente limitado en geografía y volumen en comparación con la enorme demanda de cemento. Además, el coste de envío de estos productos desde los lugares de producción es significativo en comparación con su valor de mercado.

30 Los reactivos cementosos son útiles tanto en cementos hidráulicos como en geopolímeros. Los reactivos de geopolímero y los materiales cementosos suplementarios (SCM), se seleccionan típicamente de varios materiales cementosos comunes: cenizas de subproductos de la combustión (por ejemplo, cenizas volantes de carbón), subproductos de escoria (por ejemplo, escoria granulada molida de alto horno), arcillas calcinadas (por ejemplo, metacaolín), y puzolanas naturales (por ejemplo, ceniza volcánica). Estos materiales son generalmente sustancialmente no cristalinos y a veces reactivos en sistemas cementosos tales como en sistemas geopoliméricos.

35 Dado que la mayoría de los SCMs que se utilizan en cementos hidráulicos mezclados son subproductos industriales (por ejemplo, combustión de carbón, o producción de hierro de calidad), las propiedades de sus materiales son el resultado del subproducto industrial y no están diseñados específicamente como reactivo cementoso de calidad. En consecuencia, estos materiales carecen de garantía de composición y calidad ideales o incluso consistentes, y su idoneidad como reactivos cementosos varía de una planta a otra, y con el tiempo. Tampoco hay control sobre el lugar de producción y la industria del hormigón carece de control sobre la disponibilidad futura de estos materiales cementosos de importancia crítica. Sería mucho más ventajoso si el lugar de producción pudiera elegirse en función de las necesidades del mercado, sobre todo porque el transporte de materiales cementosos es muy caro.

40 Las cenizas volantes son un subproducto de aluminosilicato parcialmente vítreo de la combustión del carbón. Se utiliza con frecuencia como aditivo en mezclas de cemento hidráulico para mejorar la fluidez y crear una reacción puzolánica para mejorar las propiedades del hormigón, incluida la resistencia, la resistencia a la reacción álcali-sílice y otras. Desafortunadamente, sólo ciertos procesos de carbón y combustión crean un suministro constante de cenizas volantes de una calidad aceptable para su uso en hormigón (por ejemplo, cenizas ASTM tipo C y tipo F, o cenizas CSA tipo C, Cl, y F). La ceniza no se produce como un SCM óptimo; más bien, la combustión se optimiza para la generación de energía y la prevención de la contaminación: no hay una consistencia garantizada de las cenizas de subproducto. Otros problemas para el futuro de las cenizas volantes en el hormigón incluyen una disminución significativa en la disponibilidad regional debido a la transición de la energía del carbón al gas natural en muchos mercados, el carbono

introducido después de la combustión puede afectar negativamente el arrastre de aire en el hormigón, la recuperación de cenizas de los embalses aumentará el coste, y la calidad deben ser verificados mediante pruebas en cada caso.

5 La escoria granulada molida de alto horno (GGBFS) es un subproducto vítreo de  $\text{CaO-SiO}_2$  de la producción de hierro en altos hornos. Los hormigones que incorporan GGBFS tienen muchas propiedades ventajosas que incluyen mayor durabilidad química, blancura, menor calor de hidratación y mitigación de la huella de  $\text{CO}_2$ , y otras propiedades beneficiosas. Desafortunadamente, el suministro de escoria de alto horno es bastante limitado debido al pequeño número de altos hornos que operan en la mayoría de los mercados. Como tal, GGBFS tiene una gran demanda como SCM de calidad y los precios de este subproducto ahora son similares al precio del cemento mismo. Además, el suministro geográfico limitado provoca escasez o al menos altos costes de envío para muchos mercados locales de hormigón. Finalmente, la producción de hierro y el suministro resultante de escoria de alto horno no están directamente relacionados con la demanda de hormigón, lo que deja en gran medida al azar el volumen de suministro, la disponibilidad local, y el precio de mercado de estos importantes aditivos.

15 Las puzolanas naturales son materiales silíceos o aluminosilíceos que son capaces de participar en la reacción puzolánica con  $\text{Ca(OH)}_2$ . Estos incluyen ceniza volcánica extraída o calcinada, tierra de diatomeas, caolinita y otras arcillas, MK-750 y otros minerales y rocas naturales que reaccionan con la cal para producir un compuesto de silicato de calcio hidratado. Las puzolanas naturales pueden ser SCM muy efectivas en el hormigón; sin embargo, requieren extracción de recursos no renovables y las puzolanas a menudo requieren distancias de envío significativas ya que los depósitos no son extremadamente comunes. Además, los materiales naturales a menudo requieren un procesamiento importante tal como la calcinación para mejorar la reactividad de las puzolanas naturales.

20 Las cenizas volantes (generalmente con bajo contenido de  $\text{CaO}$ , como en el tipo F), GGBFS, y ciertas "puzolanas" naturales y procesadas (por ejemplo, cenizas volcánicas, zeolitas y MK-750) también son reactivos geopolímeros comunes, y las mismas desafortunadas limitaciones en el suministro, disponibilidad geográfica, precio, calidad, y consistencia aplican para su aplicación en aglutinantes y cementos geopolímeros.

25 Para superar ciertas limitaciones de estos suministros de reactivos de geopolímero y SCM existentes, se han realizado varios intentos para mejorar aspectos de los métodos tradicionales. A pesar de algunas mejoras, estos productos o composiciones artificiales todavía poseen numerosas deficiencias, por ejemplo con respecto a la reactividad y la química de los reactivos para su uso en la química de geopolímeros (por ejemplo, optimización de reactivos para posteriormente producir polímeros de aluminosilicato alcalinos/alcalinotérreos tridimensionales, ramificados y de alta coordinación). También requieren costosos reactivos de laboratorio y no pueden simplemente utilizar materias primas abundantes en todo el mundo.

30 Además, los reactivos cementosos vítreos fabricados previamente tienen una morfología de partículas angulares o fibrosas. Por lo tanto, las pastas de cemento hechas a partir de dichos reactivos requieren mucha agua y tienen una trabajabilidad relativamente pobre (por ejemplo, con un límite elástico excesivo o una viscosidad plástica superior a la óptima) lo que es una barrera para su uso en aplicaciones prácticas de hormigón.

35 Las cenizas de combustión y el humo de sílice típicamente no tienen morfología de partículas angulares. Sin embargo, estos no están disponibles en cantidades suficientes, no tienen la química adecuada y/o son demasiado caros para soportar una transición a gran escala a cementos hidráulicos o geopolímeros con una mezcla alta de SCM. El documento WO 2016/198176 A1 se refiere a materiales cementosos suplementarios que comprenden sedimentos dragados.

40 Por lo tanto existe la necesidad de reactivos cementosos que resuelvan los problemas de trabajabilidad existentes con un grado de efectividad similar al de los súper plastificantes y reductores de agua en diseños de mezclas de cemento Portland equivalentes. También existe la necesidad de un método para reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$  en la producción de cemento Portland, y en particular, la necesidad de un reactivo cementoso diseñado con un nivel bajo o nulo de emisiones de  $\text{CO}_2$  en el proceso que pueden ser utilizados como material cementoso suplementario en cementos hidráulicos, y/o como reactivo de geopolímero sólido.

45 También existe la necesidad de un reactivo cementoso que pueda producirse de forma ubicua a partir de materias primas abundantes en todo el mundo, que sea reactivo en sistemas cementosos y que proporcione mezclas de cemento viables y de bajo rendimiento.

50 Además, existe la necesidad de producir reactivos cementosos en los que el lugar de producción pueda elegirse con base en las necesidades del mercado. Existe particularmente una necesidad de partículas no angulares o partículas vítreas microesferoidales útiles en reactivos cementosos, reactivos de geopolímeros, materiales cementosos suplementarios (SCM), mezclas de cemento y hormigón.

55 También existe la necesidad de producir de forma económica tales partículas vítreas microesferoidales, por ejemplo utilizando materias primas abundantes en todo el mundo. También existe la necesidad de aparatos, sistemas y métodos que utilicen fusión/inactivación en vuelo, de manera que las partículas sólidas se hagan volar en suspensión, se fundan en suspensión, y luego se inactiven en suspensión.

La presente invención aborda estas necesidades y otras necesidades como resultará evidente a partir de la revisión de la divulgación y descripción de las características de la invención a continuación.

5 El cemento dominante que se utiliza hoy en día en el hormigón es un producto de silicato de calcio que cura por hidratación conocido como cemento Portland. Desafortunadamente, la fabricación de clinker de cemento Portland produce emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso (provenientes del calentamiento de piedra caliza) que tienen un impacto global (alrededor del 3-5%, sin contar las emisiones de GHG derivadas de combustibles). El proceso se lleva a cabo en un horno rotatorio con harina cruda fluyendo en contracorriente al quemador del horno. El proceso consume mucha energía y consume entre ~3-5 GJ/tonelada, de los cuales alrededor de 1.5 GJ/tonelada se gastan simplemente en calcinar piedra caliza. De las pocas estrategias viables para disminuir el impacto ambiental del cemento, la química de geopolímeros proporciona un cemento alternativo globalmente viable con un mejor desempeño ambiental y material. El suministro inconsistente y la disponibilidad geográfica limitada de los reactivos geopolímeros tradicionales, como las cenizas volantes y las escorias han limitado la estandarización y la adopción de los hormigones geopolímeros. Por otro lado, una creciente demanda de materiales cementosos suplementarios (SCM) en cementos hidráulicos (para mejorar el desempeño ambiental y del material) ha reducido aún más la demanda de estos materiales.

15 Como se mencionó anteriormente, se han realizado varios intentos para fabricar reactivos cementosos. Sin embargo, estos métodos adolecen de deficiencias cruciales que han impedido un proceso de fabricación económico para reactivos cementosos vítreos.

20 Por ejemplo, se han utilizado hornos y crisoles revestidos de material refractario de alta temperatura para contener directamente vidrio fundido en investigaciones académicas existentes sobre reactivos cementosos (una extensión natural de las técnicas tradicionales de fabricación de vidrio). Sin embargo, los materiales refractarios sólidos en crisoles y hornos convencionales circundantes requieren bajas tasas de calentamiento y enfriamiento (del orden de 10-50 C/min) para evitar roturas por choque térmico. Los hornos de fusión convencionales tienen una masa térmica elevada, lo que hace que el mantenimiento sea difícil y costoso como resultado de largos ciclos de arranque y parada. Es preferible evitar la necesidad de refractarios que entren en contacto directo con la masa fundida, para evitar, 25 complejidad, desgaste, y también tiempos considerables de arranque y parada.

30 El enfriamiento del vidrio fundido para reactivos cementosos (escoria de alto horno, por ejemplo) anteriormente requería agua, lo cual es costoso, inhibe la recuperación de calor, podría tener consecuencias ambientales negativas y puede requerir una complicación adicional de la separación sólido/líquido. Por lo tanto, los métodos de enfriamiento en estado fundido eran un desperdicio o eran lentos, lo que disminuía la reactividad. Los métodos de enfriamiento con aire para enfriar fundidos son demasiado lentos o requieren una química muy específica para garantizar viscosidades de fundido bajas de aproximadamente 1 Pa\*s o menos, lo que no es factible para la mayoría de los materiales de materia prima deseados.

Los métodos anteriores de fabricación de vidrio requerían una costosa reducción del tamaño de las partículas (molienda) del producto vítreo (típicamente antes y después del procesamiento térmico).

35 En consecuencia, todavía existe la necesidad de un método conveniente y económico para fabricar un reactivo cementoso vítreo a partir de materias primas abundantes en todo el mundo.

También existe la necesidad de minimizar el consumo de energía y hacer frente a viscosidades fundidas muy altas y variables sin necesidad de fundentes.

40 También existe una necesidad de métodos para producir partículas vítreas microesferoidales y de aparatos y sistemas útiles para producir tales partículas vítreas microesferoidales.

La presente invención aborda estas necesidades y otras necesidades, como resultará evidente a partir de la revisión de la divulgación y descripción de las características de la invención a continuación.

#### Resumen

45 La presente invención proporciona un método de acuerdo con las reivindicaciones adjuntas. Las realizaciones se refieren, entre otras cosas, a un material de cemento alternativo (ACM), que en algunas realizaciones comprende partículas vítreas microesferoidales sólidas que comprenden una o más de las siguientes propiedades: redondez media (R) > 0.8; y menos de aproximadamente 40% de partículas que tienen morfología angular (R < 0.7).

50 En algunas realizaciones, las partículas comprenden una redondez media (R) de al menos 0.9. En realizaciones, menos de aproximadamente el 30% de partículas, o menos de aproximadamente el 25% de partículas, o menos de aproximadamente el 20% de partículas, o menos de aproximadamente el 15% de partículas, o menos de aproximadamente el 10% de partículas tienen una morfología angular (R < 0.7).

55 En algunas realizaciones, las partículas comprenden el óxido medio Fórmula 1: (CaO,MgO)<sup>a</sup>(Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O)<sup>b</sup>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sup>c</sup>(SiO<sub>2</sub>)<sup>d</sup> [Fórmula 1]; en donde a es de aproximadamente 0 a aproximadamente 4, b es de aproximadamente 0.1 a aproximadamente 1, c es 1, y d es de aproximadamente 1 a aproximadamente 20.

En algunas realizaciones, las partículas comprenden además una o más de las siguientes propiedades: (i) un contenido de 45%-100%, y preferiblemente 90-100%, de sólido amorfo a rayos X; y (ii) relaciones de composición molar de  $(Ca,Mg)_{0-12} \cdot (Na,K)_{0.05-1} \cdot (Al, Fe^{3+})_1 \cdot Si_{1-20}$ .

5 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un reactivo cementoso que comprende una mezcla de partículas vítreas microesferoidales como se define en el presente documento.

10 En el presente documento se describe pero no se reivindica explícitamente un reactivo cementoso que comprende una mezcla de partículas vítreas microesferoidales, comprendiendo estas partículas una o más de las siguientes propiedades: (i) redondez media  $(R) > 0.8$ ; (ii) menos de aproximadamente el 20% de partículas que tienen morfología angular  $(R < 0.7)$ ; (iii) el óxido de Fórmula 1 como se define anteriormente en el presente documento; (iv) un contenido de 45%-100%, y preferiblemente 90-100%, de sólido amorfo a rayos X; y (v) relaciones de composición molar de  $(Ca,Mg)_{0-12} \cdot (Na,K)_{0.05-1} \cdot (Al, Fe^{3+})_1 \cdot Si_{1-20}$ ; y (vi) un contenido bajo de calcio de aproximadamente  $< 10\%$  en peso de CaO, o un contenido de calcio intermedio de aproximadamente 10 a aproximadamente 20% en peso de CaO, o un contenido alto de calcio de  $> 30\%$  en peso de CaO.

15 En algunas realizaciones, el reactivo cementoso está en forma de un sólido no cristalino. En algunas realizaciones, el reactivo cementoso está en forma de polvo. En algunas realizaciones, la distribución del tamaño de partícula con  $D[3,2]$  (es decir, área superficial media, o diámetro medio Sauter) de aproximadamente  $20 \mu m$  o menos, más preferiblemente  $10 \mu m$  o menos, o lo más preferiblemente  $5 \mu m$  o menos. En una realización, la mezcla de partículas vítreas microesferoidales del reactivo cementoso comprende el óxido de Fórmula 1 como se define anteriormente en el presente documento. En algunas realizaciones, el reactivo cementoso comprende menos de aproximadamente 10% en peso de CaO. En algunas realizaciones, el reactivo cementoso comprende más de aproximadamente 30% en peso de CaO. En algunas realizaciones, el reactivo cementoso es aproximadamente 40-100% y preferiblemente aproximadamente 80% amorfo a los rayos X, 90% amorfo a los rayos X, y hasta aproximadamente 100% amorfo a los rayos X, y en algunas realizaciones, es 100% no- cristalino.

25 De acuerdo con algunas realizaciones, un aglutinante de geopolímero comprende un reactivo cementoso como se define en el presente documento. En el presente documento se describe pero no se reivindica explícitamente un material cementoso suplementario (SCM) que comprende un reactivo cementoso como se define en el presente documento, por ejemplo un SCM que comprende al menos un 20% en peso del reactivo cementoso.

En el presente documento se describe pero no se reivindica explícitamente un hormigón sólido que comprende un reactivo cementoso como se define en el presente documento.

30 Se describe en el presente documento pero no se reivindica explícitamente el uso de partículas vítreas microesferoidales como se define en el presente documento, y el uso de un reactivo cementoso como se define, para fabricar un aglutinante o cemento de geopolímero, un cemento hidráulico, un material cementoso suplementario (SCM) y/u hormigón sólido.

35 La presente invención se refiere a un método para producir un reactivo cementoso a partir de materiales de aluminosilicato según la reivindicación 1.

En algunas realizaciones, el método comprende además la etapa (iii) de moler dicho polvo de partículas vítreas microesferoidales hasta obtener un polvo más fino. En una realización, el polvo comprende una distribución del tamaño de partículas con  $D[3,2]$  de aproximadamente  $20 \mu m$  o menos, más preferiblemente  $10 \mu m$  o menos, o lo más preferiblemente  $5 \mu m$  o menos.

40 En algunas realizaciones, el reactivo cementoso obtenido mediante el método comprende una o más de las siguientes propiedades: es reactivo en sistemas cementosos y/o en sistemas geopoliméricos; ofrece mezclas de cemento geopolímero trabajables con bajo límite elástico por debajo de 25 Pa cuando una pasta de cemento tiene una relación molar de óxido de  $H_2O/(Na_2O, K_2O) < 20$ ; requiere un contenido de agua en la pasta de cemento tal que la relación molar de óxido  $H_2O/(Na_2O, K_2O) < 20$ ; y proporciona una pasta de cemento con mayor trabajabilidad que una pasta equivalente con una morfología sustancialmente angular, dado el mismo contenido de agua.

45 En algunas realizaciones, el método comprende además la etapa de ajustar la composición de un material de aluminosilicato sólido no ideal a un contenido deseado de los elementos Ca, Na, K, Al, Fe, y Si. En una realización, el ajuste comprende mezclar un material de aluminosilicato no ideal con un material de ajuste de composición para alcanzar las relaciones deseadas con respecto a uno o varios de los elementos Ca, Na, K, Al, Fe, y Si.

50 En algunas realizaciones, el método comprende además la etapa de clasificar el material de aluminosilicato sólido para obtener un polvo de partículas de aluminosilicato de un tamaño deseado. En algunas realizaciones, el método comprende además la etapa de descartar material de desecho indeseable de dicho material de aluminosilicato sólido.

55 En algunas realizaciones, la fusión en vuelo comprende calentar a una temperatura por encima de la temperatura de la fase líquida para obtener un líquido. En algunas realizaciones, la temperatura está entre aproximadamente  $1000-1600^\circ C$ , o entre aproximadamente  $1300-1550^\circ C$ .

En algunas realizaciones, el método comprende además la etapa de agregar un material fundente al material de aluminosilicato sólido para reducir su punto de fusión y/o inducir una mayor entalpía, volumen, o despolimerización del líquido. En algunas realizaciones, el material fundente se mezcla con el material de aluminosilicato sólido antes, o durante la fusión.

- 5 En algunas realizaciones, la fusión/inactivación en vuelo comprende reducir la temperatura del líquido por debajo de la temperatura de transición vítrea para lograr un sólido. En algunas realizaciones, la fusión/inactivación en vuelo comprende reducir la temperatura del líquido por debajo de aproximadamente 500°C, o preferiblemente por debajo de aproximadamente 200°C o menos. En algunas realizaciones, reducir la temperatura del líquido comprende enfriar a una tasa de aproximadamente  $10^2 \text{ K}^{\text{s}^{-1}}$  a aproximadamente  $10^6 \text{ K}^{\text{s}^{-1}}$ , preferiblemente a una tasa de  $>10^{3.5} \text{ K}^{\text{s}^{-1}}$ . En algunas realizaciones, inactivar comprende una corriente de aire frío, vapor, o agua. En una realización, el método comprende además separar partículas sólidas inactivadas de gases calientes en un separador ciclónico.
- 10

- En algunas realizaciones, el método para producir un reactivo cementoso a partir de materiales de aluminosilicato comprende además reducir el tamaño de partícula del polvo de partículas vítreas microesferoidales sólidas. En algunas realizaciones, reducir el tamaño de las partículas comprende triturar y/o pulverizar el polvo en un molino de bolas, un molino de rodillos, un molino de rodillos vertical o similar.
- 15

En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente un aparato para producir partículas vítreas microesferoidales, comprendiendo el aparato un quemador, una cámara de fusión y una cámara de inactivación rápido. La cámara de fusión y la cámara de inactivación pueden estar completamente separadas o pueden ser secciones primera y segunda de la misma cámara, respectivamente.

- 20 El aparato puede configurarse de manera que las partículas sólidas se hagan volar en suspensión, se fundan en suspensión, y luego se enfríen en suspensión en el aparato.

- En algunas realizaciones, el quemador proporciona una llama que calienta partículas sólidas en suspensión a una temperatura de calentamiento suficiente para fundir sustancialmente dichas partículas sólidas en un líquido. En algunas realizaciones, el quemador comprende una llama que se alimenta con un gas que arrastra partículas de materia prima de aluminosilicato hacia la cámara de fusión/inactivación. El gas puede comprender un gas oxidante y un fuel combustible. En algunas realizaciones, el quemador comprende al menos uno de un soplete de plasma, un quemador de oxcombustible, un quemador de aire-combustible, un quemador de biomasa, y un horno de concentración solar.
- 25

- En algunas realizaciones, la cámara de inactivación del aparato comprende un sistema de enfriamiento para proporcionar aire frío dentro de la cámara de inactivación, el aire frío que inactiva las partículas fundidas a partículas vítreas microesferoidales sólidas. En algunas realizaciones, el sistema de enfriamiento comprende un circuito de enfriamiento líquido colocado alrededor de la cámara de inactivación.
- 30

En algunas realizaciones, el aparato comprende además un separador ciclónico para recoger partículas vítreas microesferoidales.

- 35 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente un método para producir partículas vítreas microesferoidales que comprende las etapas de: proporcionar un aparato de fusión/inactivación en vuelo que comprende un quemador, una cámara de fusión y una cámara de inactivación; proporcionar partículas sólidas; hacer fluir dichas partículas sólidas en suspensión en un gas para ser quemado por dicho quemador; calentar dichas partículas sólidas en dicha cámara de fusión hasta una temperatura de calentamiento superior a la fase líquida para obtener partículas líquidas en suspensión; e inactivar dichas partículas líquidas en suspensión a una temperatura de enfriamiento por debajo de la fase líquida para obtener un polvo que comprende partículas vítreas microesferoidales sólidas.
- 40

- En algunas realizaciones de estos métodos, las partículas sólidas comprenden materiales de aluminosilicato. En algunas realizaciones de estos métodos, la temperatura de calentamiento está entre aproximadamente 1000-1600°C, o entre aproximadamente 1300-1550°C. En algunas realizaciones de estos métodos, la temperatura de enfriamiento (inactivación) está por debajo de aproximadamente 500°C, o por debajo de aproximadamente 200°C.
- 45

En algunas realizaciones de estos métodos, la inactivación comprende proporcionar aire frío dentro de la cámara de inactivación. En algunas realizaciones, estos métodos comprenden además recoger el polvo con un separador ciclónico.

- 50 Se describe en el presente documento, pero no se reivindica explícitamente, el uso de un aparato como se define en el presente documento, particularmente un aparato que comprende al menos uno de un soplete de plasma, un quemador de oxcombustible, un quemador de aire-combustible, un quemador de biomasa, y un horno de concentración solar, para producir partículas vítreas microesferoidales mediante fusión/inactivación en vuelo.

- 55 Se describe en el presente documento, pero no se reivindica explícitamente, el uso de un aparato como se define en el presente documento, particularmente un aparato que comprende al menos uno de un soplete de plasma, un quemador de oxcombustible, un quemador de aire-combustible, un quemador de biomasa, y un horno de

concentración solar, para producir un reactivo cementoso a partir de materiales de aluminosilicato mediante fusión/inactivación en vuelo.

5 Aspectos, ventajas y características adicionales de la presente invención resultarán más evidentes tras la lectura de la siguiente descripción no restrictiva de realizaciones preferidas que son ejemplares y no deben interpretarse como limitantes del alcance de la invención.

Breve descripción de los dibujos

Se obtendrá una mejor comprensión de las características, ventajas y principios de la presente divulgación haciendo referencia a la siguiente descripción detallada que establece realizaciones ilustrativas, y cuyos dibujos adjuntos:

10 La FIG. 1 es un diagrama de flujo que muestra la producción de un reactivo cementoso a partir de un material de aluminosilicato sólido, de acuerdo con algunas realizaciones;

La FIG.2 es un conjunto de cuatro diagramas de composición ternarios de CaO, MgO - SiO<sub>2</sub> - (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O) -(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de acuerdo con algunas realizaciones;

15 La FIG. 3 es un diagrama cuaternario tridimensional en el espacio (CaO, MgO) - (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) - (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) - (SiO<sub>2</sub>) usando los mismos datos de composición del material representados en la Figura 2, de acuerdo con algunas realizaciones;

20 La FIG.4 es un gráfico de distribución del tamaño de partículas que compara las distribuciones de tamaños de partículas angulares y esféricas para polvo de vidrio volcánico natural disponible comercialmente (morfología angular) y partículas producidas de acuerdo con el Ejemplo 1 (morfología esférica). El porcentaje de partículas en volumen por debajo de un diámetro determinado (eje y) se proporciona como función del diámetro de las partículas en micrómetros (eje x). Las microfotografías electrónicas demuestran la morfología de las partículas de las muestras.

25 La FIG. 5 es un gráfico que proporciona una comparación de distribuciones de redondez de partículas (R) de diversos polvos, de acuerdo con algunas realizaciones; (211-218, 519, 520, como se define más adelante) antes del procesamiento (501) y después del procesamiento (502) de acuerdo con los Ejemplos 1-8, de acuerdo con algunas realizaciones. Se utilizó el análisis de imágenes para determinar los valores de R a partir de microfotografías de los mismos polvos que se muestran en la Figura 6 y la Figura 7 siguiendo el método de Takashimizu & Liyoshi (Takashimizu, Y., Liyoshi, M. (2016). New parameter of roundness R: circularity corrected by aspect ratio. Progress in Earth and Planetary Sciences 3, 2. <https://doi.org/10.1186/s40645-015-0078-x>). Véase también la Tabla 17 para obtener datos más precisos. Para mayor comodidad, también se incluyen dos muestras de cenizas volantes Tipo F; 519 (B-FA) una ceniza volante beneficiada vendida comercialmente, y 520 (L FA) una ceniza volante no beneficiada directamente de una central eléctrica de carbón.

30 La FIG. 6 es un panel que muestra una colección de pares de microfotografías electrónicas que comparan partículas no procesadas (501) y partículas procesadas (502) de diversos materiales (211-218 como se define más adelante) como se describe en el Ejemplo 1 al Ejemplo 8. El ancho del campo de visión para paneles individuales es de 140 μm.

35 La FIG. 7 es un panel que muestra imágenes de dos cenizas volantes Tipo F, una directamente de una planta de energía de carbón en Nueva Escocia (L-FA; 520) y otra ceniza volante disponible comercialmente que ha sido beneficiada para eliminar carbón activado y otros contaminantes (B-FA; 519). El ancho del campo de visión para paneles individuales es de 140 μm.

La FIG. 8 es un diagrama de flujo de proceso esquemático de un sistema para producir un reactivo cementoso microesferoidal vítreo, de acuerdo con una realización de la invención.

40 La FIG. 9A y 9B son una fotografía y una ilustración correspondiente, respectivamente, de la llama de un quemador (abajo) entrando en una cámara de fusión/inactivación (arriba) con partículas de materia prima de aluminosilicato arrastradas, de acuerdo con una realización de la invención.

La FIG. 10 es un dibujo esquemático de un aparato de fusión en vuelo mejorado que incluye bucles de recuperación de calor para minimizar la entrada de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>, de acuerdo con una realización de la invención.

45 La FIG. 11 ilustra el conjunto completo de representaciones ternarias de una Composición Novedosa cerrada a Si, Al, Fe, Ca+Mg y Na+K; de acuerdo con algunas realizaciones;

La FIG. 12 ilustra diagramas ternarios para una Composición Novedosa desde la perspectiva del Si; de acuerdo con algunas realizaciones;

50 La FIG. 13 ilustra diagramas ternarios para una Composición Novedosa desde la perspectiva del Al; de acuerdo con algunas realizaciones;

La FIG. 14 ilustra diagramas ternarios para una Composición Novedosa desde la perspectiva del Fe; de acuerdo con algunas realizaciones;

La FIG. 15 ilustra diagramas ternarios para una Composición Novedosa desde la perspectiva de Ca+Mg; de acuerdo con algunas realizaciones;

5 La FIG. 16 es un diagrama de flujo esquemático que describe el proceso de fabricación de un hormigón de cemento alternativo usando un minihorno en vuelo descentralizado relativamente pequeño, de acuerdo con algunas realizaciones;

La FIG. 17 es un diagrama esquemático que muestra la distribución convencional de cemento y agregados en una cadena de suministro de horno de cemento Portland centralizada moderna, de acuerdo con algunas realizaciones;

10 La FIG. 18 es un diagrama esquemático que muestra las ventajas de transporte de colocar minihornos de material de cemento alternativo (ACM) en canteras de agregados en un novedoso método descentralizado, de acuerdo con algunas realizaciones;

La FIG. 19 es un diagrama esquemático que muestra las ventajas de transporte de colocar minihornos de material de cemento alternativo (ACM) en plantas de hormigón en un novedoso método descentralizado, de acuerdo con algunas realizaciones; y

15 La FIG. 20 es un diagrama esquemático que muestra las ventajas de transporte de ubicar minihornos de material de cemento alternativo (ACM) de una novedosa manera descentralizada en sitios independientes en las proximidades de canteras de agregados y plantas de procesamiento por lotes de hormigón, de acuerdo con algunas realizaciones.

Detalles adicionales de la invención y sus ventajas serán evidentes a partir de la descripción detallada incluida a continuación. de acuerdo con algunas realizaciones;

#### Descripción detallada

20 La siguiente descripción detallada proporciona una mejor comprensión de las características y ventajas de las invenciones descritas en la presente divulgación de acuerdo con las realizaciones divulgadas en el presente documento. Aunque la descripción detallada incluye muchas realizaciones específicas, éstas se proporcionan únicamente a modo de ejemplo y no deben interpretarse como limitativas del alcance de las invenciones aquí descritas.

25 En la siguiente descripción de las realizaciones, las referencias a los dibujos adjuntos son a modo de ilustración de un ejemplo mediante el cual se pueden poner en práctica las realizaciones de la invención. Se entenderá que se pueden realizar otras realizaciones sin apartarse del alcance de la invención divulgada.

#### Partículas vítreas microesferoidales

30 En el presente documento se describen la producción y los usos de partículas vítreas microesferoidales sólidas. Como se explica con más detalles a continuación, se relaciona un reactivo cementoso que comprende una mezcla o pluralidad de tales partículas vítreas microesferoidales.

De acuerdo con la invención, las partículas vítreas microesferoidales sólidas pueden ser partículas apreciablemente redondas de alta esfericidad.

35 Tal como se utiliza en este documento, el término "redondez" y la unidad correspondiente "R" se refieren a la redondez tal como la define Takashimizu & Ilyoshi (2016). Los valores necesarios para calcular R se pueden determinar realizando análisis de imágenes en fotomicrografías apropiadas de polvos. R (redondez) proporciona una medida cuantitativa conveniente de redondez que está altamente correlacionada con la "redondez" de Krumbein (Krumbein, W.C. (1941) Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Journal of Sedimentary Petrology 11:64-72. <https://doi.org/10.1306/D42690F3-2B26-11D7-8648000102C1865D>.)

40 En algunas realizaciones, las partículas vítreas microesferoidales tienen una redondez media (R) de al menos 0.9 (desviación estándar <0.15).

En algunas realizaciones, las partículas vítreas microesferoidales tienen una redondez aparente (R) de al menos 0.8 (desviación estándar <0.15).

En algunas realizaciones, las partículas vítreas microesferoidales tienen una redondez aparente (R) de al menos 0.7, o 0.6, o 0.5 (desviación estándar <0.15).

45 En algunas realizaciones, una mezcla de partículas vítreas microesferoidales comprende menos de aproximadamente 50% de partículas, o menos de aproximadamente 40% de partículas, o menos de aproximadamente 30% de partículas, o menos de aproximadamente 25% de partículas, o menos de aproximadamente 20% de partículas, o menos de aproximadamente el 15% de partículas, o menos de aproximadamente el 10% de partículas que tienen morfología angular (por ejemplo,  $R < 0.7$ ).

En algunas realizaciones, se proporciona una mezcla o pluralidad de partículas vítreas microesferoidales en forma de polvo que comprende una distribución de tamaño de partícula con D[3,2] de aproximadamente 20 µm o menos, más preferiblemente aproximadamente 10 µm o menos, o lo más preferiblemente aproximadamente 5 µm o menos.

En algunas realizaciones, las partículas vítreas microesferoidales son un sólido no cristalino.

- 5 En algunas realizaciones, las partículas vítreas microesferoidales comprenden el óxido de Fórmula 1:  $(\text{CaO}, \text{MgO})_a \cdot (\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})_b \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)_c \cdot (\text{SiO}_2)_d$  [Fórmula 1] en donde a es de aproximadamente 0 a aproximadamente 4, b es de aproximadamente 0.1 a aproximadamente 1, c es 1, y d es de aproximadamente 1 a aproximadamente 20.

- 10 En algunas realizaciones, las partículas vítreas microesferoidales comprenden una o más de las siguientes propiedades: (i) un contenido de 45%-100%, y preferiblemente 90-100%, de sólido amorfo a rayos X; y (ii) relaciones de composición molar de  $(\text{Ca}, \text{Mg})_{0-12} \cdot (\text{Na}, \text{K})_{0.05-1} \cdot (\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_1 \cdot \text{Si}_{1-20}$ .

En algunas realizaciones, las partículas vítreas microesferoidales son amorfas a los rayos X en un 40-100%, más preferiblemente entre un 80 y un 100% amorfas a los rayos X, y en algunas realizaciones son 100% no cristalinas.

En algunas realizaciones, las partículas comprenden menos de aproximadamente 10% en peso de CaO.

- 15 En algunas realizaciones, las partículas comprenden más de aproximadamente 30% en peso de CaO.

En algunas realizaciones, las partículas comprenden un alto contenido de calcio con una composición molar de Si/(Fe<sup>3+</sup>,Al) entre 1-20, y un contenido de CaO de aproximadamente 10-50% en peso, preferiblemente aproximadamente 20-45% en peso.

- 20 En algunas realizaciones, las partículas comprenden un contenido de calcio intermedio con una composición molar de Si/(Fe<sup>3+</sup>,Al) entre 1-20, y un contenido de CaO de aproximadamente 10-aproximadamente 20% en peso.

- 25 Como se describe más adelante, las partículas vítreas microesferoidales pueden producirse ventajosamente a partir de materias primas inorgánicas globalmente abundantes, tales como material de aluminosilicato. Como se usa en el presente documento, el término "material de aluminosilicato" se refiere a un material que comprende aluminio o aluminio y hierro, y dióxido de silicio seleccionado de rocas y minerales naturales, materiales dragados, desechos mineros que comprenden rocas y minerales, vidrio de desecho, materiales contaminados que contienen aluminosilicato y subproductos industriales aluminosilíceos. Un material de aluminosilicato según la presente invención está preferiblemente en forma de un sólido cristalino (por ejemplo, al menos 50% en peso, o al menos 60% en peso, o al menos 70% en peso, o al menos 80% en peso, o al menos 90% en peso, o 100% en peso de sólido cristalino).
- 30 En algunas realizaciones, el material de aluminosilicato comprende al menos el 2% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), o al menos 3% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), o al menos 4% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), o al menos 5% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), al menos 6% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), o al menos 7% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), o al menos 8% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), o al menos 10% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), o al menos 12% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), o al menos 15% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), o al menos 20% en peso (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O). En algunos casos, las materias primas inorgánicas son heterogéneas y las partículas vítreas producidas son más homogéneas que la materia prima, como se muestra durante la homogeneización parcial durante la fusión.
- 35 Es decir, más del 10% de las partículas producidas entran dentro de un nuevo rango de formulación intermedia.

En algunas realizaciones, el material de aluminosilicato se selecciona de sedimentos dragados, hormigón demolido, desechos de minas, arcilla glacial, depósitos glaciales, depósitos fluviales, rocas y mezclas de minerales, por ejemplo rocas y mezclas de minerales compuestas por algunos o todos los elementos Ca, Mg, Na, K, Fe, Al y Si. Estos materiales de aluminosilicato son muy abundantes en muchas regiones geográficas diferentes.

- 40 Como se describe más adelante, la composición elemental de la materia prima se puede analizar y optimizar para los usos deseados. La materia prima se puede analizar mediante métodos cuantitativos o semicuantitativos como XRF, XRD, LIBS, EDS, análisis químico húmedo, y varios otros métodos existentes para determinar la composición elemental de la materia prima.

- 45 Como se describe más adelante en el presente documento, las partículas vítreas microesferoidales se pueden producir usando un proceso o método para procesamiento termoquímico en vuelo tal como fusión/inactivación en vuelo y/o fusión en suspensión, para fundir en un líquido los materiales inorgánicos de partida y posteriormente enfriar el líquido. en partículas sólidas. Como se usa en el presente documento, el término "fusión/inactivación en vuelo" o "fusión en suspensión" se refiere a un proceso en donde las partículas sólidas se hacen volar en suspensión, se funden en suspensión, y luego se inactivan en suspensión para obtener un polvo.

- 50 En algunas realizaciones, el término "partículas vítreas microesferoidales" abarca partículas como se definen anteriormente en el presente documento que se encuentran en el polvo resultante directamente de un proceso de fusión/inactivación en vuelo. En realizaciones, el término "partículas vítreas microesferoidales" se refiere a partículas obtenidas después de triturar o moler (por ejemplo, trituradora de mandíbulas, molino de impacto, etc.) del polvo obtenido después del proceso de fusión/inactivación en vuelo.

Como se describe a continuación, las partículas vítreas microesferoidales encuentran muchos usos que incluyen, pero no se limitan a, como o en la preparación de reactivos cementosos, como o en la preparación de aglutinantes o cementos geopolímeros, como o en la preparación de cementos hidráulicos, como o en la preparación de materiales cementosos suplementarios (SCM), y en la elaboración de hormigón sólido.

- 5 Un uso adicional puede ser como fertilizante o enmienda del suelo, por ejemplo como sustituto del "polvo de roca".

Material cementoso

En el presente documento se describen, pero no se reivindican explícitamente, polvos reactivos cementosos que comprenden partículas vítreas microesferoidales como se definen en el presente documento.

- 10 En el presente documento, pero no se reivindican explícitamente, también se encuentran aglutinantes o cementos geopolímeros, cementos hidráulicos, materiales cementosos suplementarios (SCMs), mezclas de hormigón hidráulico y polvos de hormigón sólidos que comprenden partículas vítreas microesferoidales como se definen en el presente documento.

- 15 La morfología de las partículas tiene un impacto considerable en las propiedades físicas y el manejo de las lechadas de cemento. En consecuencia, la morfología de alta redondez de las partículas descritas en el presente documento proporciona ventajosamente una mayor trabajabilidad, fluidez, y/o una menor demanda de agua para las mezclas de cemento geopolímero. En particular, tener altos grados de redondez reduce el límite elástico y la viscosidad de las mezclas de cemento al reducir la fricción entre partículas. Además, la morfología esferoidal disminuye la demanda de agua al mejorar el empaquetamiento para una distribución de tamaño de partícula determinada.

- 20 Como se ilustra en las Figuras 2 y 3, la composición de los reactivos cementosos descritos en este documento es diferente de los materiales cementosos existentes. De hecho, considerando combinaciones de composiciones ternarias de grupos de elementos (CaO, MgO), (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), (Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O), y (SiO<sub>2</sub>), las realizaciones de un reactivo cementoso 201 ocupa una posición en estas figuras que es diferente y distinta de las cenizas volantes (C y F) 202, la escoria granulada de alto horno molida (GGBS o GGBFS) 203, el metacaolín 204, y el cemento Portland 205. En la Figura 2 se muestran ejemplos de composiciones de materia prima específicas: piedra pómez volcánica 211 (Ejemplo 1), basalto 212 (Ejemplo 2), un segundo basalto 213 (Ejemplo 3), muestras de relaves de carbón 214 (Ejemplo 4), sedimento dragado 215 (Ejemplo 5), relaves de flotación de pórfido de cobre 216 (Ejemplo 6), hormigón demolido 217 (Ejemplo 7), polvo triturador de agregado diorítico 218 (Ejemplo 8).

- 30 Ventajosamente, el reactivo cementoso se formula a partir de rocas, minerales y compuestos globalmente abundantes de composición adecuada. De esta manera, es posible que no sea necesario enviar la abundante materia prima a una instalación de procesamiento o a una planta de cemento muy lejos. En algunos casos, se construye una planta de cemento en el lugar de la materia prima.

- 35 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un reactivo cementoso que comprende una mezcla de partículas vítreas microesferoidales como se define en el presente documento y comprende además una o más de las siguientes propiedades: (i) está en forma de un sólido no cristalino; (ii) está en forma de polvo; (iii) comprende una distribución del tamaño de partículas con D[3,2] de aproximadamente 20 μm o menos, más preferiblemente 10 μm o menos, o más preferiblemente 5 μm o menos; (iv) comprende el óxido de Fórmula 1, como se define anteriormente en el presente documento; (v) un contenido de 45%-100%, y preferiblemente 90-100%, de sólido amorfo a rayos X; (vi) relaciones de composición molar de (Ca,Mg)<sub>0-12</sub>\*(Na,K)<sub>0,05-1</sub>\*(Al, Fe<sup>3+</sup>)<sub>1</sub>•Si<sub>1-20</sub>; (vii) comprende menos de aproximadamente 10% en peso de CaO; (viii) comprende más de aproximadamente 30% en peso de CaO; (ix) comprende una composición molar de Si/(Fe<sup>3+</sup>,Al) entre 1-20, y un contenido de CaO de aproximadamente 10-50% en peso, preferiblemente aproximadamente 20-45% en peso; (x) comprende una composición molar de Si/(Fe<sup>3+</sup>,Al) entre 1-20, y contenido de CaO de aproximadamente 10-aproximadamente 20% en peso; (xi) es 40-100% amorfo a los rayos X, más preferiblemente por encima del 80%, por encima del 90%, y en algunos casos, hasta aproximadamente 100% amorfo a los rayos X, y en algunos casos, es 100% no cristalino; (xii) comprende una distribución del tamaño de partículas con D[3,2] de aproximadamente 20 μm o menos, más preferiblemente aproximadamente 10 μm o menos, o lo más preferiblemente aproximadamente 5 μm o menos.

En algunos casos, el contenido de CaO es inferior a aproximadamente el 30% en peso para reducir el impacto del CO<sub>2</sub> del cemento al evitar la necesidad de descomposición del calcio procedente de carbonatos.

- 50 En algunas realizaciones, el reactivo cementoso comprende menos de aproximadamente 10% en peso de CaO. En algunas realizaciones, el reactivo cementoso comprende más de aproximadamente 30% en peso de CaO. En algunos casos, la composición del reactivo cementoso con respecto a la relación molar de (Na, K), y Ca puede variarse para obtener ciertas ventajas dependiendo de los requisitos del aglutinante. Por ejemplo, un reactivo cementoso con menos de aproximadamente 10% en peso de CaO es adecuado para su uso en geopolímeros curados térmicamente y como sustituto de las cenizas volantes. Como alternativa, un reactivo cementoso con más de aproximadamente 30% en peso de CaO tiene propiedades hidráulicas y se puede agregar a la resina de geopolímero para permitir el curado a temperatura ambiente del cemento de geopolímero, y reemplaza directamente la escoria de alto horno en el cemento Portland mezclado.

5 En algunas realizaciones, el reactivo cementoso es un reactivo cementoso bajo en calcio con una composición molar de  $\text{Si}/(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})$  entre 1-20, y con un contenido de  $\text{CaO}$  de aproximadamente 10% en peso o menos. Preferiblemente, dicho reactivo cementoso es 40-100% amorfo a los rayos X, más preferiblemente aproximadamente 80% a aproximadamente 100% amorfo a los rayos X, y en algunas realizaciones 100% no cristalino. Este reactivo cementoso con bajo contenido de calcio puede encontrar numerosas aplicaciones comerciales, por ejemplo, como mezcla puzolánica en cemento hidráulico, y/o como reactivo en cementos y aglutinantes geopolímeros.

10 En algunas realizaciones, el reactivo cementoso es un reactivo cementoso rico en calcio con una composición molar de  $\text{Si}/(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})$  entre 1-20, y un contenido de  $\text{CaO}$  de aproximadamente 10-50% en peso, preferiblemente aproximadamente 20-45% en peso. Preferiblemente, tal reactivo cementoso es 40-100% amorfo a los rayos X, más preferiblemente aproximadamente 80-100% amorfo a los rayos X, incluso más preferiblemente 100% no cristalino. Un reactivo cementoso de este tipo con alto contenido de calcio puede encontrar numerosas aplicaciones comerciales, por ejemplo como aditivo hidráulico en cemento hidráulico mezclado y/o como reactivo en cementos y aglutinantes geopolímeros.

15 En algunas realizaciones, el reactivo cementoso es un reactivo cementoso que contiene calcio intermedio con una composición molar de  $\text{Si}/(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})$  entre 1-20, y un contenido de  $\text{CaO}$  de aproximadamente 10-20% en peso. Preferiblemente, dicho reactivo cementoso es aproximadamente 40-100% y preferiblemente aproximadamente 80% a aproximadamente 100% amorfo a los rayos X, e incluso más preferiblemente 100% no cristalino. Un reactivo cementoso que contiene calcio intermedio de este tipo puede encontrar numerosas aplicaciones comerciales, por ejemplo, como reactivo cementoso con propiedades hidráulicas y puzolánicas intermedias deseables, particularmente en aplicaciones de geopolímeros de curado ambiental.

20 En algunas realizaciones, se optimiza el contenido de Na,K en el reactivo cementoso. Esto puede ser ventajoso para aplicaciones SCM donde la cal libre en el cemento hidráulico se intercambiará con álcalis solubles y se coordinará con moléculas de silato derivadas del reactivo cementoso para crear cierta polimerización de aluminosilicato alcalino relativamente estable que mejora en gran medida las propiedades químicas de los cementos hidráulicos tradicionales.

25 En realizaciones, el contenido de Na,K se optimiza debido al hecho de que los reactivos de geopolímero con contenidos significativos de Na,K requieren menos endurecedor de silicato soluble de lo que sería necesario de otro modo, disminuyendo así el requisito (y el coste) de silicato soluble de un diseño de mezcla de geopolímero.

#### Métodos de preparación

30 Las partículas vítreas microesferoidales como se definen en el presente documento, así como las composiciones que las comprenden, tales como reactivos cementosos, aglutinantes o cementos geopolímeros, cementos hidráulicos, materiales cementosos suplementarios (SCMs), y hormigón, se pueden preparar usando cualquier método o proceso adecuado.

35 La FIG. 1 muestra etapas ejemplares necesarias para producir reactivo cementoso a partir de materiales de aluminosilicato de acuerdo con algunas realizaciones. En resumen, se selecciona un polvo de material de aluminosilicato finamente dividido 101 y se analiza 102 y se evalúa su composición química. La materia prima se puede analizar mediante cualquier método cuantitativo o semicuantitativo adecuado, tal como XRF, XRD, LIBS, EDS, análisis químico húmedo, y varios otros métodos existentes para determinar la composición elemental de la materia prima.

40 Si la composición seleccionada no es aceptable, el material se modifica, mezcla opcionalmente (por ejemplo, en un recipiente antes del procesamiento termoquímico), por ejemplo, mediante la adición de un material de ajuste de composición 104 (ver más adelante) o se clasifica 103 y cualquier material de desecho indeseable puede ser descartado.

45 A continuación se calienta 106 el material de aluminosilicato sólido resultante que comprende un polvo de composición deseable y se funden partículas individuales o aglomerados de partículas en un líquido en suspensión. A continuación, las partículas líquidas en suspensión se inactivan 107 para obtener un polvo que comprende partículas vítreas microesferoidales sólidas. A continuación, el polvo se tritura y/o pulveriza opcionalmente (parcial o totalmente) 108 si se desea reducir el tamaño de las partículas y/o optimizar la reactividad y obtener el reactivo cementoso 109.

50 Con respecto a la adición de un material de ajuste de composición 104, como se usa en el presente documento el término "material de ajuste de composición" se refiere a cualquier material sólido o líquido con una composición adecuada para alterar preferentemente la composición en masa o superficial del material de aluminosilicato con respecto a uno o varios de los elementos Ca, Na, K, Al, Fe, y Si.

55 Los materiales de ajuste de composición que introducen calcio (Ca) pueden estar compuestos de sales de calcio, incluido  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ , minerales y compuestos de silicato de calcio, minerales y compuestos de silicato de calcio y aluminio, productos de desecho de cemento Portland, productos de desecho de cemento hidráulico, wollastonita, gehlenita y otras composiciones minerales del grupo de la melilita.

Los materiales de ajuste de composición que introducen aluminio (Al) pueden estar compuestos de rocas, minerales, suelos, sedimentos, subproductos, y compuestos aluminosos que incluyen uno o más de caolinita, haloisita y otros

minerales arcillosos ricos en aluminio/pobres en álcali,  $Al_2SiO_5$  polimorfos, cloritoide, estauroilita, granate, corindón, mullita, gehlenita, diáspora, boehmita, gibbsita, y nefelina y otros feldespatoides. Otros materiales que pueden usarse incluyen aluminio metálico, bauxita, alúmina, lodo rojo (residuos de refinería de alúmina).

5 Los materiales de ajuste de composición que introducen hierro (Fe) pueden estar compuestos por rocas, minerales, suelos, sedimentos, subproductos y compuestos ricos en hierro como olivino, minerales de clorita (camosita, clinocloro, etc.), piroxenos, anfíboles, goethita, hematita, magnetita, ferrihidrita, lepidocrocita y otras composiciones de oxihidróxido de hierro, minerales arcillosos y filosilicatos ricos en hierro, relaves de mineral de hierro, y hierro elemental.

10 Con respecto al calentamiento 106, el calentamiento se lleva a cabo para alcanzar una temperatura de calentamiento por encima de la temperatura de la fase líquida para obtener un líquido, por ejemplo a aproximadamente 1000-1600°C, o aproximadamente 1300-1550°C. Se puede utilizar cualquier método o aparato adecuado para calentar y obtener el líquido, incluyendo, pero no limitado a, la fusión en vuelo (es decir, fusión en suspensión). Esto se puede lograr utilizando un aparato de fusión en vuelo equipado con, por ejemplo, uno o más sopletes de plasma, quemadores de oxi-combustible, quemadores de aire-combustible, quemadores de biomasa y un horno de concentración solar. Típicamente, se necesita una temperatura del horno de 1000-1600°C, y más típicamente de 1300-1550°C, para obtener rápidamente las partículas en suspensión deseadas en fase líquida. En realizaciones, el dispositivo se selecciona de manera que la fusión sea lo más rápida posible. A continuación se describe un ejemplo de un aparato y método de fusión en vuelo adecuados.

15 Con respecto a la inactivación 107, en algunas realizaciones la etapa de inactivación comprende reducir la temperatura del líquido por debajo de la transición vítrea, por ejemplo a aproximadamente 500°C o menos, o preferiblemente por debajo de aproximadamente 200°C o menos. En realizaciones, la inactivación se realiza rápidamente, es decir, la temperatura se reduce a una tasa de aproximadamente  $10^2 \text{ Ks}^{-1}$  -  $10^6 \text{ Ks}^{-1}$  (preferiblemente a una tasa de  $>10^{3.5} \text{ Ks}^{-1}$ ). Se puede usar cualquier método adecuado para la inactivación, incluido, pero no limitado a, poner en contacto el material fundido con una corriente suficiente de aire adecuadamente frío, con vapor, o con agua para producir un sólido no cristalino.

20 Si se desea, se puede añadir un material fundente al material de aluminosilicato sólido para reducir su punto de fusión y/o inducir la despolimerización del líquido. El material fundente se puede mezclar con el material de aluminosilicato sólido antes del calentamiento/fusión o durante el calentamiento/fusión. Los materiales fundentes comunes que pueden inducir la despolimerización en masa fundida y/o una temperatura de fusión más baja incluyen  $CaF_2$ ,  $CaCO_3$ , vidrio de desecho, vidrio desecho, frita de vidrio, minerales que contienen álcalis (por ejemplo, feldespatos, zeolitas, arcillas y minerales feldespatoides), sales de borato, compuestos halógenos (sales que contienen fluoruros y cloruros) y sales de calcio.

25 Con respecto a la etapa opcional de trituración y/o pulverización 108, ésta se puede llevar a cabo usando cualquier método o aparato adecuado que incluye, pero no se limita a, un molino de bolas, un molino de rodillos y un molino de rodillos vertical. Preferiblemente, el tamaño de partícula se reduce para obtener un polvo fino útil en aplicaciones cementosas. Obtener un polvo más fino puede ser útil para aumentar el área superficial y proporcionar velocidades de reacción más rápidas, como se describe, por ejemplo, en el Ejemplo 9. Los expertos en la técnica podrán determinar el tamaño de las partículas deseadas para una necesidad particular, teniendo en cuenta una compensación económica entre la pérdida de morfología/trabajabilidad esférica, el coste de la molienda y los requisitos de rendimiento final. En realizaciones, el polvo comprende una distribución de tamaño de partícula con  $D[3,2]$  de aproximadamente  $10 \mu\text{m}$  o menos, o preferiblemente  $5 \mu\text{m}$  o menos. Un tamaño de partícula de este tipo es generalmente deseable para garantizar una reactividad suficiente y propiedades del material consistentes.

Usos de materiales de aluminosilicato.

30 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, el uso de materiales de aluminosilicato para producir partículas vítreas microesferoidales sólidas y reactivos cementosos no cristalinos como se definen en el presente documento.

35 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, el uso de procesamiento termoquímico en vuelo de materiales de aluminosilicato para producir partículas vítreas microesferoidales sólidas y/o reactivos cementosos sólidos. Las partículas vítreas y los reactivos cementosos sólidos descritos en el presente documento se pueden usar ventajosamente como un material cementoso suplementario (SCM) alternativo en cemento hidráulico mezclado y/o como un reactivo sólido de geopolímero en aglutinantes de geopolímero (eliminando así la necesidad de parte o la totalidad del MK-750, cenizas volantes, GGBFS, y otros reactivos sólidos comunes).

40 Se describe en el presente documento, pero no se reivindica explícitamente, el uso de un material de aluminosilicato para producir al menos uno de un material cementoso suplementario (SCM) y un reactivo de geopolímero que comprende partículas vítreas microesferoidales sólidas y/o un reactivo cementoso no cristalino como se define en el presente documento.

45 Usos de las partículas vítreas microesferoidales y del reactivo cementoso.

Un aspecto de las realizaciones descritas se refiere a la amplia relevancia de las partículas vítreas microesferoidales sólidas y el reactivo cementoso descritos en el presente documento. Se pueden usar indistintamente composiciones apropiadas de reactivo cementoso diseñado en proporción significativa tanto en cementos geopolímeros como en cementos hidráulicos (es decir, cementos que reaccionan con el agua).

5 Por consiguiente, algunas realizaciones descritas en el presente documento pero no reivindicadas explícitamente abarcan cementos geopolímeros y cementos hidráulicos que comprenden al menos un 5% en peso, o al menos un 10% en peso, o al menos un 15% en peso, o al menos un 20% en peso, o al menos un al menos 25% en peso, o al menos 30% en peso, o al menos 40% en peso, o al menos 50% en peso, o al menos 60% en peso, o al menos 70% en peso, o al menos 80% en peso, o al menos 90% en peso, o más, de partículas vítreas microesferoidales sólidas y/o reactivo cementoso como se define en el presente documento.

10 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un material cementoso suplementario (SCM) que comprende un reactivo cementoso como se define en el presente documento. En algunas realizaciones, el SCM comprende aproximadamente el 5 % en peso a aproximadamente 50% en peso (preferiblemente al menos 20% en peso) de partículas vítreas microesferoidales sólidas y/o del reactivo cementoso como se define en el presente documento.

15 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un material cementoso suplementario (SCM) que comprende una o más de las siguientes propiedades: comprende menos de aproximadamente 35 % en peso de CaO, con un contenido apreciable de Na+K (por ejemplo, al menos un 2% en peso, preferiblemente al menos un 5% en peso) y un contenido de Al (por ejemplo, al menos un 5% en peso) y está en forma de un sólido no cristalino.

20 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un hormigón sólido, que comprende partículas vítreas microesferoidales sólidas y/o un reactivo cementoso como se define en el presente documento, es decir, que comprende aproximadamente el 5% en peso a aproximadamente 50% en peso (preferiblemente al menos 10% en peso, o al menos 20% en peso, al menos 30% en peso, o al menos 40% en peso) de partículas vítreas microesferoidales sólidas y/o del reactivo cementoso como definido aquí.

25 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un hormigón geopolímero sólido que comprende aproximadamente un 5% en peso a aproximadamente 50% en peso (preferiblemente al menos 10% en peso, o al menos 20% en peso, al menos 30% en peso, o al menos 40% en peso) de partículas vítreas microesferoidales sólidas y/o del reactivo cementoso como de define aquí.

30 Los expertos en la técnica podrán apreciar que las realizaciones de la presente invención proporcionan ventajosamente medios para producir reactivos cementosos versátiles con bajo contenido de CO<sub>2</sub> a partir de materiales naturales, abundantes y baratos. Otra ventaja importante es la creación de un reactivo único que cumple con los estándares de especificación actuales para SCMs alternativos y, al mismo tiempo, satisface las necesidades del creciente mercado de geopolímeros. Además, los reactivos cementosos se forman a partir de materias primas diversas y heterogéneas, y mediante los procesos descritos, dan como resultado un material reactivo que es más homogéneo y adecuado como reactivo cementoso.

35 Como se puede apreciar, una ventaja de los sistemas y métodos descritos en el presente documento es proporcionar control sobre la composición final del reactivo cementoso, produciendo así un reactivo con una composición predecible, lo cual es muy importante para la industria. Esta composición adaptada no está disponible en otros reactivos cementosos existentes, porque normalmente se obtienen a partir de subproductos industriales. De acuerdo con las realizaciones descritas en el presente documento, es posible modificar las materias primas locales cuando sea necesario para estandarizar el rendimiento para aplicaciones determinadas. Por ejemplo, en SCM para cemento Portland puede ser deseable limitar el contenido de álcali, pero en sistemas de geopolímeros puede ser deseable tener un alto contenido de álcali y disminuir la necesidad de endurecedor de silicato alcalino. En ambos escenarios, pueden ser deseables modificaciones de la composición para limitar la variabilidad de la composición de la materia prima.

40 Otra preocupación notable para la química de los reactivos de geopolímeros es el contenido de calcio lábil. El ajuste del contenido de calcio y la fase que contiene calcio son variables importantes para ajustar la tasa de ganancia de resistencia en diferentes condiciones de temperatura y propiedades finales del material del cemento geopolímero. Los métodos descritos en el presente documento hacen posible diseñar ciertas composiciones ventajosas de reactivos cementosos microesferoidales que actualmente no es posible para reactivos cementosos basados en subproductos.

45 Aparato, método y sistema de fusión en vuelo.

La presente invención proporciona un método según la reivindicación 1. En el presente documento se describen, pero no se reivindican explícitamente, un aparato y un sistema para la producción termoquímica de reactivos cementosos vítreos con morfología esférica.

55 De acuerdo con algunas realizaciones, un aparato está configurado para fusión/inactivación en vuelo. De acuerdo con algunas realizaciones, tales como las ilustradas en las Figuras 9A y 9B, el aparato 900 comprende: un quemador 809; y una cámara de fusión combinada con una cámara de inactivación 902. En algunas realizaciones, la cámara de fusión

y la cámara de inactivación pueden ser primeras y secciones de la misma cámara 902, respectivamente. En algunas realizaciones, la cámara de fusión y la cámara de inactivación son cámaras consecutivas separadas.

Como se ilustra, el aparato 900 está configurado para fusión/inactivación en vuelo. Las partículas de materia prima de aluminosilicato 903 ingresan a la cámara de fusión/inactivación (superior; 902) suspendidas en una llama 901 que quema un gas oxidante 807 con un fuel combustible 808. Las partículas de materia prima de aluminosilicato 903 son arrastradas por un eductor venturi hacia el gas oxidante y fluyen en suspensión durante la combustión hacia la cámara de fusión/inactivación 902 a medida que se calientan y finalmente se funden, por encima de la transición de fase líquida. El gas puede incluir un gas oxidante, que incluye, pero no se limita a oxígeno, aire mezclado con un fuel combustible, que incluye pero no se limita a propano, metano, combustibles de hidrocarburos líquidos, carbón, gas de síntesis, biomasa, lodos de carbón y agua y mezclas de los mismos. Preferiblemente, la llama 901 se estabiliza mediante un flujo anular de aire de inactivación 904 que protege la cámara de fusión/inactivación 902 y evita que las partículas se adhieran a la pared interior 905 de la cámara de fusión/inactivación 902.

En el aparato 900, las partículas fundidas se inactivan a continuación enfriándolas en aire a medida que la suspensión se vuelve turbulenta en un extremo de la cámara de fusión/inactivación 902. El enfriamiento/inactivación de las partículas fundidas puede proporcionarse mediante aire de inactivación frío introducido directamente en la cámara de fusión/inactivación 902, y/o mediante un sistema de enfriamiento opcional, por ejemplo, un circuito de enfriamiento líquido alrededor de una sección de inactivación de la cámara de fusión/inactivación 902 (no mostrada). Las partículas fundidas pueden inactivarse o enfriarse hasta obtener un polvo sólido no cristalino, y pueden dar como resultado un polvo que comprende partículas vítreas microesferoidales. El aparato puede comprender además un separador ciclónico opcional operado bajo succión desde un soplador centrífugo para recoger el polvo que comprende partículas vítreas microesferoidales (no mostradas).

El aparato 900 o similar se puede utilizar en diversos sistemas para producir un reactivo cementoso microesferoidal vítreo. La Figura 8 ilustra una realización de un diagrama de flujo de proceso esquemático de un sistema ejemplar 800 para producir un reactivo cementoso microesferoidal vítreo, que en algunos casos produce un polvo 109 de reactivo vítreo microesferoidal.

En la realización de la Figura 8, el sistema 800 comprende un circuito de molienda 801 para obtener un polvo 101 de materia prima de aluminosilicato. El material de materia prima de aluminosilicato grueso 802 se alimenta a una trituradora de mandíbulas o molino de impacto 803 para producir una alimentación de tamaño adecuado 804 que permite una molienda fina en un molino de bolas 805. El producto resultante es un polvo 101 de materia prima de aluminosilicato finamente dividido.

A continuación, el polvo de materia prima de aluminosilicato 101 finamente dividido se arrastra en un gas oxidante (por ejemplo, oxígeno) 807, y se mezcla con un fuel combustible (por ejemplo, propano) 808 en un quemador 809 que está equipado con un circuito de enfriamiento líquido 810 para una larga vida útil del soplete. Se introduce aire de inactivación a temperatura ambiente 811, preferiblemente cerca del quemador 809, y fluye hacia abajo por el exterior de las paredes de la cámara de fusión/inactivación 812 para evitar que las partículas fundidas se adhieran a las paredes del quemador 809. El enfriamiento de la pared puede ser proporcionado por el aire de inactivación, y/o por un circuito de enfriamiento líquido 813 opcional. Las partículas fundidas se inactivan mediante aire de inactivación a medida que la suspensión se vuelve turbulenta al final de la cámara de fusión/inactivación. Se puede usar un separador ciclónico 814, operado bajo succión desde un soplador centrífugo 815 para recolectar el polvo reactivo vítreo microesferoidal 109.

El aparato de la Figura 9 y el sistema de la Figura 8 se utilizaron con éxito para producir partículas vítreas microesferoidales sólidas, y el reactivo cementoso que las comprende, como se define en el presente documento y se describe en los siguientes ejemplos. Los parámetros operativos implicaban una combustión aproximadamente estequiométrica de gases propano y oxígeno (no se ha medido la relación de masa exacta). La materia prima en polvo 101 entró al quemador desde un dispersor neumático alimentado por un alimentador vibratorio. La suspensión de materia prima y aire de combustión consistía en aproximadamente una masa igual de oxígeno y materia prima en polvo; por ejemplo, 1 g de materia prima de aluminosilicato suspendido en 1 g de oxígeno.

Los expertos en la técnica apreciarán que el aparato, sistema y parámetros ilustrados son algunos de muchos aparatos y sistemas potencialmente útiles. Por ejemplo, en realizaciones alternativas, las partículas sólidas vuelan en suspensión en un gas portador y se calientan mediante una o más fuentes de energía. La energía para la fusión puede ser proporcionada por una o una combinación de fuentes de calor de alta temperatura adecuadas, tales como plasma (descarga por arco o acoplado inductivamente), calentamiento por inducción eléctrica, calentamiento por resistencia eléctrica, calentamiento por microondas, irradiación solar, o calor de reacciones químicas (por ejemplo, combustión). Varias de estas fuentes de energía pueden reducir la huella de CO<sub>2</sub> del proceso, pero los costes de emisiones de CO<sub>2</sub> deben sopesarse frente a los costes únicos de cada fuente de energía. Hoy en día, en muchas jurisdicciones, las fuentes de energía más baratas se basan en combustibles de hidrocarburos. Por lo tanto, la elección de la fuente de energía está dictada principalmente por el precio y el coste de las emisiones de CO<sub>2</sub> en una jurisdicción determinada. Los factores económicos y políticos actuales dictan que, preferiblemente, las partículas sólidas vuelan en suspensión en un gas de manera que la combustión calienta las partículas sólidas a una temperatura superior a la transición de la fase líquida.

Aunque en los ejemplos proporcionados se utilizó un quemador de combustible de oxígeno, los expertos en la técnica apreciarán que la elección de los combustibles para el quemador tiene sólo una importancia secundaria siempre que se produzca un calentamiento adecuado. Cualquier fuente de calor procedente de combustión, plasma, energía solar concentrada, nuclear, y otras, es posible.

- 5 En algunas realizaciones, es preferible un quemador de aire-combustible para evitar el coste del enriquecimiento de oxígeno. Cuando el aire, que consiste en solo aproximadamente un 23% en peso de oxígeno, se quema con combustibles (propano o metano, por ejemplo), la relación aire-combustible es mucho mayor (~4-5x) para mantener una combustión aproximadamente estequiométrica. Una relación aire-combustible más alta da como resultado temperaturas de llama más bajas. Por lo tanto, es preferible ajustar en consecuencia el flujo másico de polvo de materia prima para garantizar que las partículas se calienten más allá de su temperatura sólida, y preferiblemente cerca o más allá de su temperatura líquida (1000-1600°C, y comúnmente mayor que 1200°C).

10 La Figura 10 ilustra otra realización de un aparato y sistema para fusión/inactivación en vuelo de acuerdo con las realizaciones descritas en el presente documento. La materia prima 101 pasa a través de la válvula 1002 y entra en el ciclón 1003 donde se precalienta intercambiando calor con gases calientes. La válvula 1004 dosifica el polvo de materia prima en el gas caliente (por ejemplo, aire de combustión) que fluye a través de la tubería 1025. El aire de combustión y la suspensión de materia prima se transportan a través de un quemador 1005 en donde se introduce gas combustible a través de la tubería 1006. Una cámara de fusión cilíndrica 1007 está configurada para recibir una corriente caliente de gas (por ejemplo, gases de combustión) arrastrada con partículas de aluminosilicato en varias etapas de fusión 1008. La cámara de fusión 1007 comprende una carcasa cilíndrica 1009 de material adecuado tal como acero, y un revestimiento interior de material refractario adecuado 1010. La cámara de fusión 1007 también está protegida internamente por una corriente de aire frío (aire de enfriamiento primario) 1011 inyectada desde un anillo de distribución superior 1012. El aire de enfriamiento fluye dentro de la cámara de fusión 1007 alrededor de las paredes internas de la cámara en un flujo laminar o giratorio 1013 sin mezclarse significativamente con la corriente central de partículas suspendidas fundidas 1008. Este flujo de aire también protege el revestimiento refractario interior 1010 y limita la pérdida de calor.

15 Las partículas fundidas 1008 ingresan a continuación a una cámara de inactivación o zona de inactivación 1014 donde las partículas interactúan con el aire de inactivación primaria 1013 y opcionalmente con el aire de inactivación secundaria 1015 que pasa a través de un distribuidor 1016 y se inyecta 1017 en la cámara de inactivación 1014.

20 Las partículas sólidas calientes, inactivadas 1018 fluyen suspendidas a través de la tubería 1019 y se separan de los gases calientes en un separador ciclónico 1020. Las partículas vítreas sólidas calientes pasan a través de la válvula 1021, intercambian calor con el aire de combustión frío 1024 y se separan en el ciclón de precalentamiento del aire de combustión 1022. La válvula 1023 regula la presión y permite la recolección del producto vítreo microesferoidal 109. Los separadores ciclónicos 1003, 1020, 1022 también funcionan como intercambiadores de calor sólido/gas para importantes circuitos de recuperación de calor que aumentan la eficiencia energética del proceso. En el ciclón 1020, los gases calientes de la cámara de fusión 1007 se separan de los sólidos y estos gases precalientan el polvo de materia prima más frío 101 antes de la separación en el ciclón 1003. El gas de escape 1027 intercambiado con calor pasa a un sistema de escape adecuado (por ejemplo, una cámara de filtros y un soplador) o pasa a etapas posteriores de ciclones de intercambio de calor. En el ciclón 1022, las partículas inactivadas calientes 1018 intercambian calor con el aire de combustión frío 1024 y el aire de combustión precalentado se usa para transportar polvo de materia prima precalentado a la cámara de fusión 1007, reduciendo así considerablemente la cantidad de energía que se debe agregar para lograr la fusión de las partículas suspendidas.

## Ejemplos

### Ejemplo 1: Reducción del límite elástico con partículas esferoidales sintéticas

45 Para demostrar la mejora en la viscosidad de la mezcla de cemento geopolímero, se empleó el siguiente procedimiento. Se adquirió un polvo de vidrio volcánico pulverizado disponible comercialmente con una composición de óxido SiO<sub>2</sub>-73.77%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-11.82%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1.42%; MgO-0.1%; CaO-0.28%; Na<sub>2</sub>O-4.22%; K<sub>2</sub>O-4.09% que tenía un diámetro medio de partícula D[3,2] de 10 micrómetros y una morfología angular típica de polvos finamente molidos. La muestra de polvo de vidrio volcánico 402 (FIG. 4) se procesó mediante el método actualmente divulgado de fusión en vuelo para crear un polvo 403 fundido/enfriado óptimamente, que tiene un tamaño medio de partícula D[3,2] de 11 micrómetros, y una morfología sustancialmente esferoidal caracterizada por redondez R > 8 (ver FIG. 4). Más específicamente, el polvo de vidrio volcánico natural (morfología angular) se procesó mediante el aparato mostrado en la FIG. 8 y FIG. 9. El quemador era un quemador comercial de oxígeno-propano modelo QHT-7/hA de Shanghai Welding & Cutting Tool Works con alimentación de polvo modificada, el quemador se encendía en una cámara de fusión de acero con paredes enfriadas por agua, y las temperaturas de las partículas excedían la temperatura media del líquido de el material, alrededor de 1300°C según lo estimado a partir de datos de composición. Se interpreta que se superó la temperatura del líquido basándose en i) la morfología microesferoidal que resulta de la tensión superficial en la fase líquida, ii) la composición homogénea (bajo imágenes de electrones retrodispersados) y iii) la ausencia de partículas no fundidas o parcialmente fundidas en el reactivo final. En este experimento, el quemador no se selló herméticamente a la cámara de fusión y, por lo tanto, se permitió que aire inactivo de enfriamiento entrara a lo largo de las paredes de la cámara de fusión, inactivando solo el polvo fundido arrastrado después de un tiempo de residencia

suficiente para permitir la fusión. El polvo caliente inactivado se separó de los gases de combustión calientes con un ciclón como se muestra en la Figura 8 y se recogió polvo de vidrio para realizar pruebas. El producto resultante en este ejemplo es un vidrio sintético altamente esférico ( $D[3,2] = 11$  micrómetros) de composición equivalente y distribución de tamaño de partículas casi equivalente (Figura 4) como materia prima.

- 5 El polvo de vidrio mineral microesferoidal tiene una relación molar de  $Si/(Al, Fe^{3+})$  de 19.68, y fórmula molar del reactivo cementoso de  $(Ca,Mg)_{0.12} \cdot (Na,K)_{0.89} \cdot (Al, Fe^{3+})_1 \cdot Si_{19.68}$  y CaO de 0.28% en peso (CaO, MgO de 0.38%).

El experimento compara dos reactivos de geopolímero con partículas de composición equivalente y distribución de tamaño de partícula casi equivalente (confirmado mediante análisis de tamaño de partícula por difracción láser, FIG. 4). La única variable que ha cambiado drásticamente es la morfología de las partículas.

- 10 Los polvos se mezclaron por separado como pastas aglutinantes de geopolímero utilizando el siguiente diseño de mezcla optimizado para un uso mínimo de agua para vidrio volcánico angular ("Mezcla A"):

Se prepara una mezcla de 99.5 g que contiene 1.77 moles de agua, 0.12 moles de  $Na_2O + K_2O$ , 0.82 moles de  $SiO_2$  y 0.08 moles de  $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ . La fuente de  $Al_2O_3 + Fe_2O_3$  es el vidrio reactivo cementoso o vidrio volcánico. La fuente de  $SiO_2$  también es el reactivo cementoso o vidrio volcánico y silicato de potasio. La fuente de óxido de potasio es el silicato de potasio y el hidróxido de potasio. Las relaciones molares de óxido de cada mezcla se proporcionan en la Tabla 1, que se muestra a continuación.

- 15 La Mezcla Esferoidal A era demasiado fluida cuando se mezclaba en las mismas proporciones de masa que la Mezcla Angular A, que tenía una trabajabilidad muy pobre incluso con contenidos de agua muy altos del 40% en peso de  $H_2O$ . Sorprendentemente, la Mezcla Esferoidal B, que contiene sólo 15% en peso de  $H_2O$ , tenía una excelente trabajabilidad como lo indica el bajo límite elástico de ~6 Pa.

El polvo esferoidal vítreo se volvió a mezclar con una cantidad idéntica de reactivo sólido, pero proporciones más bajas de endurecedor de silicato y agua ("Mezcla B"):

- 25 Se preparó una mezcla de 79 g que contenía 0.73 moles de agua, 0.11 moles de  $Na_2O + K_2O$ , 0.8 moles de  $SiO_2$  y 0.08 moles de  $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ . La fuente de  $Al_2O_3 + Fe_2O_3$  es el reactivo cementoso esferoidal. La fuente de  $SiO_2$  también es el reactivo cementoso esferoidal y el silicato de potasio. La fuente de óxido de potasio es el silicato de potasio y el hidróxido de potasio. Las relaciones molares de óxido de cada mezcla se proporcionan en la Tabla 1, que se muestra a continuación.

- 30 Una prueba de asentamiento de minicono (como lo describen Tan et al. 2017) se empleó para determinar el límite elástico aproximado para la Mezcla A de polvo angular (radio de extensión de 24 mm), y la Mezcla B de polvo esferoidal (radio de extensión de 60 mm). El polvo angular produjo una masa que no fluía con cizallamiento con un límite elástico aproximado de 425 Pa o mayor (según lo calculado mediante la ecuación de flujo de asentamiento 10 elaborada en Pierre et al. 2013 (Pierre, A., Lanos, C., & Estellé, P. (2013). Extension of spread-slump formulae for yield stress evaluation. Applied Rheology, 23(6), 36-44). Sorprendentemente, la mezcla esferoidal tenía sólo el 41% del contenido de agua molecular de la mezcla angular (incluida el agua en el endurecedor de silicato soluble) pero produjo un fluido resinoso fácilmente vertible con un límite elástico de sólo aproximadamente 6.5 Pa (calculado mediante la ecuación de flujo de dispersión 2). en Tan et al. 2017 (Tan, Z., Bernal, S. A., & Provis, J. L. (2017). Reproducible mini-slump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes. Materials and Structures, 50(6), 235).

Tabla 1 : Relaciones molares de óxido de mezclas

Relación molar	"Mezcla A" angular	"Mezcla A" esferoidal	"Mezcla B" esferoidal
$(Na_2O, K_2O)/SiO_2$	0.14	0.14	0.14
$SiO_2/(Al_2O_3, Fe_2O_3)$	11.72	11.72	10
$H_2O/(Al_2O_3, Fe_2O_3)$	22.125	22.125	9.125
$(Na_2O, K_2O)/(Al_2O_3, Fe_2O_3)$	1.63	1.63	1.375
$H_2O/(Na_2O, K_2O)$	15.65	15.65	7.05
$H_2O$ en pasta (% en peso)	40%	40%	15%
Límite elástico (Pa)	425	<1	6

5 La Mezcla A Angular y la Mezcla B Esferoidal se calentaron y curaron en un recipiente sellado a 80 grados Celsius durante 6 horas. La pasta angular se endureció pobremente, probablemente debido al alto contenido de agua, mientras que la pasta esferoidal se endureció hasta convertirse en un sólido parecido a la cerámica con una superficie fina y brillante.

Ejemplo 2: Basalto "FC"

10 Se tomaron muestras de roca basáltica del oligoceno en Vancouver, BC. La mineralogía de la roca está dominada por plagioclasa, diópsido y una fase arcillosa que probablemente sea un producto de la meteorización (Tabla 2, determinada por XRD con refinamiento de Rietveld). La composición del óxido del elemento principal se proporciona en la Tabla 3.

Tabla 2. Mineralogía de la muestra de basalto.

Fase	% en peso
albita baja (calciana)	56.2
diópsido	13.5
arcilla (modelo montmorillonita)	12.5
forsterita (ferriana)	5.0
Illita/moscovita 2M1	2.6
lizardita 1T	1.7
ilmenita	1.7
cuarzo	1.6
calcita	1.5
ulvospinel (ferriano)	1.4

Tabla 3. Composición de óxido de basalto "FC" (XRF)

Óxido	% en peso
SiO <sub>2</sub>	48.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.97
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.99
MnO	0.16
MgO	7.83
CaO	9.51
Na <sub>2</sub> O	2.77
K <sub>2</sub> O	0.5

15 El basalto se trituró en una trituradora de mandíbulas, luego se pulverizó en un molino de discos y se redujo aún más en un molino de anillos hasta obtener un polvo con un tamaño medio de partículas de aproximadamente 10 µm. El polvo se alimentó a través de un aparato de vitrificación que calentó el material durante la transición líquida hasta aproximadamente 1450°C, seguido de una etapa de inactivación rápida. El vidrio resultante era 96.7% amorfo a los rayos X (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis XRD-Rietveld de vidrio de basalto (punta de corindón)

Fase	% en peso
amorfo	96.7
hierro-alfa (de medios de molienda)	1.9
cuarzo	1.4

El polvo de vidrio de basalto microesferoidal tiene una relación molar de Si/(Al, Fe<sup>3+</sup>) de 6.93, y fórmula molar del reactivo cementoso de (Ca,Mg)<sub>3.15</sub>•(Na,K)<sub>0.2</sub>•(Al, Fe<sup>3+</sup>)<sub>1</sub>•Si<sub>6.93</sub> y CaO of 9.51 de 9.51% en peso (CaO,MgO de 17.3%).

- 5 Se observó que las partículas individuales eran muy esféricas y la redondez media R es >0.8 (como se definió anteriormente), y D[3,2] es 10.5 µm.

Se prepara una mezcla de 131 g que contiene 1.31 moles de agua, 0.1 moles de Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O, 0.88 moles de SiO<sub>2</sub> y 0.24 moles de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La fuente de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es el polvo de basalto microesferoidal preparado anteriormente. La fuente de SiO<sub>2</sub> también es el polvo de basalto y el silicato de potasio. La fuente de óxido de potasio es el silicato de potasio y el hidróxido de potasio. Las relaciones molares de óxido se proporcionan en la Tabla 5, que se muestra a continuación.

- 10

Tabla 5: Relaciones molares de óxido

(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/SiO <sub>2</sub>	0.11
SiO <sub>2</sub> /(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.67
H <sub>2</sub> O/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.45
(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.42
H <sub>2</sub> O/(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)	13.76
Límite elástico (Pa)	21.7

- 15 Se realizó una prueba de mini cono de asentamiento en la pasta de cemento geopolímero y dio como resultado un diámetro de flujo de 98.4 mm y un límite elástico calculado de 21.7 Pa. Se agregaron 110 g de arena a la pasta, seguido de 6 horas de curado sellado a 80 grados Celsius. Se determinó que la resistencia a la compresión de un cubo de muestra de mortero era de 19 MPa.

Ejemplo 3: Basalto "BD"

- 20 Un basalto en polvo "BD" disponible comercialmente tiene la composición de óxido proporcionada en la Tabla 6, que se muestra a continuación.

Tabla 6. Composición de óxido de basalto "BD" (XRF)

Óxido	% en peso
SiO <sub>2</sub>	49.77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.42
Fe <sub>2</sub> O	11.18
MgO	4.38

Óxido	% en peso
CaO	9.66
Na <sub>2</sub> O	2.62
K <sub>2</sub> O	0.63

El polvo se alimentó a través de un aparato de vitrificación que calentó el material mediante un cambio de fase líquida a aproximadamente 1450°C, seguido de una etapa de inactivación rápida. La fusión exitosa a través de la fase líquida se demostró para la mayoría de las partículas mediante una morfología de partículas en masa altamente esférica.

- 5 El reactivo en polvo de basalto microesferoidal "BD" tiene una relación molar Si/(Al, Fe<sup>3+</sup>) de 7.84, y fórmula molar del reactivo cementoso de (Ca,Mg)<sub>2.66</sub>\*(Na,K)<sub>0.23</sub>\*(Al, Fe<sup>3+</sup>)<sub>1</sub>-Si<sub>7.84</sub> y CaO de 9.66% en peso (CaO,MgO de 14.04%). Se observó que las partículas individuales eran muy esféricas y suaves, la redondez R es mayor que 0.8 y D[3,2] es 8.0 µm medida por difracción láser.

- 10 Se preparó una mezcla de 116 g que contenía 1.53 moles de agua, 0.09 moles de Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O, 0.75 moles de SiO<sub>2</sub> y 0.17 moles de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La fuente de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es el polvo de basalto microesferoidal preparado anteriormente. La fuente de SiO<sub>2</sub> también es el polvo de basalto y el silicato de potasio. La fuente de óxido de potasio es el silicato de potasio y el hidróxido de potasio. Las relaciones molares de óxido se proporcionan en la Tabla 7.

Tabla 7: relaciones molares de óxido

(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/SiO <sub>2</sub>	0.11
SiO <sub>2</sub> /(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.41
H <sub>2</sub> O/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	9.00
(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.53
H <sub>2</sub> O/(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)	18.06

- 15 Se añadieron 110 g de arena a la mezcla, y la muestra se vertió en moldes cúbicos, seguido de 6 horas de curado sellado a 80 grados Celsius. A partir de tres muestras, se determinó que la resistencia a la compresión media del mortero era 27.4 MPa con una desviación estándar de 2.22 MPa.

Ejemplo 4: Relaves de carbón

- 20 Una muestra de relaves de carbón adquirida en Cape Breton, NS, consta de aproximadamente un 60% de carbón residual y un 40% de material mineral. La fracción inorgánica tiene la composición de óxido proporcionada en la Tabla 8, que se muestra a continuación.

Tabla 8. Composición de óxidos de relaves de carbón (XRF)

Óxido	% en peso (promedio de 2 muestras)
SiO <sub>2</sub>	52.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.74
MgO	1.29

Óxido	% en peso (promedio de 2 muestras)
CaO	1.57
Na <sub>2</sub> O	0.28
K <sub>2</sub> O	3.08

5 Los relaves de carbón secos con un D[3,2] medido de 9.9 μm se alimentaron a través de un aparato de vitrificación que quemó el exceso de carbón y calentó el material inorgánico mediante un cambio de fase líquida a aproximadamente 1450°C, seguido de una etapa de inactivación rápida. La fracción de carbón en la materia prima añadió una energía considerable al proceso: la potencia de la llama aumentó al menos un 46% en el procesamiento de relaves de carbón en comparación con un basalto "inerte" procesado con el mismo caudal másico.

La fusión exitosa a través de la fase líquida se demostró para partículas inorgánicas mediante una morfología de partículas en masa altamente esférica, con redondez media (R) >0.8, y D[3,2] es de 11.2 μm.

10 El polvo reactivo de relaves de carbón microesferoidal tiene una relación molar de Si/(Al, Fe<sup>3+</sup>) de 5.66, y fórmula molar del reactivo cementoso de (Ca,Mg)<sub>0.38</sub>•(Na,K)<sub>0.38</sub>•(Al, Fe<sup>3+</sup>)<sub>1</sub>•Si<sub>5.666</sub> y CaO de 1.7% en peso (CaO,MgO de 2.56%).

15 Se prepara una mezcla de 45 g que contiene 0.57 moles de agua, 0.04 moles de Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O, 0.42 moles de SiO<sub>2</sub> y 0.12 moles de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La fuente de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es el polvo microesferoidal de relaves de carbón preparado anteriormente. La fuente de SiO<sub>2</sub> también es el polvo de relaves de carbón y el silicato de sodio. La fuente de óxido de sodio es el silicato de sodio y el hidróxido de sodio. Las relaciones molares de óxido se proporcionan en la Tabla 9, que se muestra a continuación.

Tabla 9: Relaciones molares de óxido

(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/SiO <sub>2</sub>	0.11
SiO <sub>2</sub> /(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.45
H <sub>2</sub> O/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.85
(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.49
H <sub>2</sub> O/(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)	14.25

20 La mezcla se vertió en un molde cúbico, seguido de 6 horas de curado sellado a 80 grados Celsius. La muestra fue desmoldeada y se encontró que tenía una resistencia a la compresión de 21 MPa y una superficie brillante similar a la cerámica.

Ejemplo 5: Sedimento dragado

Se adquirió una muestra de sedimento del centro del puerto de Vancouver, BC, para representar un ejemplo de sedimento dragado. La muestra tiene la composición de óxido proporcionada en la Tabla 10, que se muestra a continuación.

25 Tabla 10. Composición de óxido del sedimento (XRF)

Óxido	% en peso
SiO <sub>2</sub>	67.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.62

## ES 2 964 315 T3

Óxido	% en peso
MgO	2.4
CaO	2.98
Na <sub>2</sub> O	2.69
K <sub>2</sub> O	1.64

La muestra se secó y se encontró que tenía un diámetro medio de masa, D50, de 47 µm. A continuación, la muestra se tamizó para eliminar las partículas que no pasaban los 75 µm.

- 5 Este polvo se alimentó a través de un aparato de vitrificación que calentó el material mediante un cambio de fase líquida a aproximadamente 1450°C, seguido de una etapa de inactivación rápida.

La fusión exitosa a través de la fase líquida se demostró para la mayoría de las partículas mediante una morfología de partículas en masa altamente esférica. El polvo reactivo de sedimento microsferoidal tiene una relación molar de Si/(Al, Fe<sup>3+</sup>) de 11.49, y fórmula molar del reactivo cementoso de (Ca,Mg)<sub>1.55</sub>-(Na,K)<sub>0.51</sub>•(Al, Fe<sup>3+</sup>)<sub>1</sub>•Si<sub>11.49</sub> y CaO de 4.42% en peso (CaO,MgO de 7.14%).

- 10 Las partículas individuales son muy esféricas y suaves, con una redondez media (R) >0.8 y D[3,2] de 11.8 µm.

Se prepara una mezcla de 98 g que contiene 0.89 moles de agua, 0.09 moles de Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O, 0.8 moles de SiO<sub>2</sub> y 0.13 moles de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La fuente de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es el polvo de sedimento microsferoidal preparado anteriormente. La fuente de SiO<sub>2</sub> también es el sedimento en polvo y silicato de potasio. La fuente de óxido de potasio es el silicato de potasio y el hidróxido de potasio. Las relaciones molares de óxido se proporcionan en la Tabla 11.

- 15 Tabla 11: Relaciones molares de óxido

(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/SiO <sub>2</sub>	0.12
SiO <sub>2</sub> /(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.15
H <sub>2</sub> O/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.85
(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.69
H <sub>2</sub> O/(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)	9.19

Se añadieron 110 g de arena a la mezcla, y la muestra se fundió en un molde de cubo, seguido de 6 horas de curado sellado a 80 grados Celsius. Se determinó que la resistencia a la compresión del cubo de mortero era de 25 MPa.

Ejemplo 6: Relaves de mina de cobre

- 20 Se adquirió de Argentina una muestra de relaves de flotación de pórfido de cobre para representar un ejemplo de un material de desecho de aluminosilicato abundante a nivel mundial. La muestra tiene la composición de óxido proporcionada en la Tabla 12, que se muestra a continuación.

Tabla 12. Composición de óxido del sedimento (XRF)

Óxido	% en peso
SiO <sub>2</sub>	70.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.26

Óxido	% en peso
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.64
MgO	1.18
CaO	1.09
Na <sub>2</sub> O	2.75
K <sub>2</sub> O	3.44

5 La muestra se tamizó para eliminar las partículas que no pasaban los 75 µm. Este polvo se alimentó a través de un aparato de vitrificación que calentó el material mediante un cambio de fase líquida a aproximadamente 1450°C, seguido de una etapa de inactivación rápida. La fusión exitosa a través de la fase líquida se demostró para la mayoría de las partículas mediante una morfología de partículas en masa altamente esférica.

El polvo reactivo de relaves de minas microesferoidales tiene una concentración molar de Si/(Al, Fe<sup>3+</sup>) de 14.2, y fórmula molar del reactivo cementoso de (Ca,Mg)<sub>0.6</sub>\*(Na,K)<sub>0.5</sub>\*(Al, Fe<sup>3+</sup>)<sub>1</sub>.Si<sub>14.2</sub> y CaO de 1.94% en peso (CaO,MgO de 4.87%).

10 Las partículas individuales son muy esféricas y suaves, la redondez media (R) es mayor que 0.8m y D[3,2] es 11.4 µm.

15 Se prepara una mezcla de 103.6 g que contiene 0.76 moles de agua, 0.11 moles de Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O, 1.04 moles de SiO<sub>2</sub> y 0.13 moles de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La fuente de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es el polvo de relaves microesferoidales preparado anteriormente. La fuente de SiO<sub>2</sub> también es el polvo de relaves y el silicato de potasio. La fuente de óxido de potasio es el silicato de potasio y el hidróxido de potasio. Las relaciones molares de óxido se proporcionan en la Tabla 13, que se muestra a continuación.

Tabla 13: Relaciones molares de óxido

(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/SiO <sub>2</sub>	0.10
SiO <sub>2</sub> /(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8.64
H <sub>2</sub> O/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.78
(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.89
H <sub>2</sub> O/(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)	9.67

Se añadieron 110 g de arena a la mezcla y la muestra se fundió en un molde de cubo, seguido de 6 horas de curado sellado a 80 grados Celsius. Se determinó que la resistencia a la compresión del cubo de mortero era de 18 MPa.

20 Ejemplo 7: Hormigón de residuos

Se tomaron muestras de núcleos de hormigón estructural de un sitio de construcción de condominios de media altura en Vancouver, BC. El material tiene la composición de óxido proporcionada en la Tabla 14, que se muestra a continuación.

Tabla 14. Composición de óxidos de un hormigón estructural (XRF)

Óxido	% en peso
SiO <sub>2</sub>	56.61

Óxido	% en peso
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.15
MgO	1.42
CaO	12.55
Na <sub>2</sub> O	3.55
K <sub>2</sub> O	1.48

La muestra se tamizó para eliminar las partículas que no pasaban los 75 µm. Este polvo se alimentó a través de un aparato de vitrificación que calentó el material mediante un cambio de fase líquida a aproximadamente 1450°C, seguido de una etapa de inactivación rápida.

- 5 La fusión exitosa a través de la fase líquida se demostró para la mayoría de las partículas mediante una morfología de partículas en masa altamente esférica.

El polvo reactivo de hormigón microesferoidal tiene una relación molar de Si/(Al, Fe<sup>3+</sup>) de 12.3, y fórmula molar del reactivo cementoso de (Ca,Mg)<sub>3.06</sub>•(Na,K)<sub>0.7</sub>•(Al, Fe<sup>3+</sup>)<sub>1</sub>•Si<sub>12.3</sub> y CaO de 12.55% en peso (CaO,MgO de 13.97%).

Las partículas individuales son muy esféricas y suaves, la redondez media (R) es mayor que 0.8 y D[3,2] es 10.0 µm.

- 10 Se prepara una mezcla de 100 g que contiene 1.27 moles de agua, 0.08 moles de Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O, 0.73 moles de SiO<sub>2</sub> y 0.13 moles de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La fuente de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es el polvo de hormigón microesferoidal preparado anteriormente. La fuente de SiO<sub>2</sub> también es el hormigón en polvo y el silicato de potasio. La fuente de óxido de potasio es el silicato de potasio y el hidróxido de potasio. Las relaciones molares de óxido se proporcionan en la Tabla 15, que se muestra a continuación.

- 15 Tabla 15: Relaciones molares de óxido

(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/SiO <sub>2</sub>	0.11
SiO <sub>2</sub> /(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.59
H <sub>2</sub> O/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	10.79
(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.86
H <sub>2</sub> O/(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)	15.46

Se añadieron 100 g de arena a la mezcla, y la muestra se fundió en un molde de cubo, seguido de 6 horas de curado sellado a 80 grados Celsius. Se determinó que la resistencia a la compresión del cubo de mortero era de 27 MPa.

Ejemplo 8: Agregado de cantera

- 20 Para el siguiente experimento se tomaron muestras de polvo triturador granodiorítico de una cantera de agregados cerca de Vancouver, Canadá. La muestra tiene una composición de óxido (SEM-EDX) de aproximadamente SiO<sub>2</sub>-73%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-15%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-3%; MgO-0%; CaO-2%; Na<sub>2</sub>O-3%; K<sub>2</sub>O-4%. La roca se trituró y molió aún más hasta obtener un polvo fino que superó completamente los 75 µm.

- 25 El polvo resultante se procesó mediante un aparato de vitrificación en vuelo que calentó el material mediante un cambio de fase líquida a aproximadamente 1450°C, seguido de una etapa de inactivación rápida.

La fusión exitosa a través de la fase líquida se demostró para la mayoría de las partículas mediante una morfología de partículas en masa muy suave y esférica.

Las partículas individuales son muy esféricas y suaves, la redondez media (R) es superior a 0.8 y D[3,2] es de 9.3 μm. El polvo reactivo de vidrio de granodiorita microesferoidal tiene una relación molar de Si/(Al, Fe<sup>3+</sup>) de 16.0, y fórmula molar del reactivo cementoso de (Ca,Mg)<sub>2.5</sub>•(Na,K)<sub>4.4</sub>•(Al, Fe<sup>3+</sup>)<sub>1</sub>•Si<sub>16.0</sub> y CaO del 2% en peso (CaO,MgO del 2%).

- 5 Se prepara una mezcla de 105 g que contiene 1.53 moles de agua, 0.1 moles de Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O, 0.93 moles de SiO<sub>2</sub> y 0.12 moles de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La fuente de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es el polvo de agregado microesferoidal preparado anteriormente. La fuente de SiO<sub>2</sub> también es el polvo de agregado y el silicato de potasio. La fuente de óxido de potasio es el silicato de potasio y el hidróxido de potasio. Las relaciones molares de óxido se proporcionan en la Tabla 16.

Tabla 16: Relaciones molares de óxido

(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/SiO <sub>2</sub>	0.1
SiO <sub>2</sub> /(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8.0
H <sub>2</sub> O/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	10.8
(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)/(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.9
H <sub>2</sub> O/(Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O)	12.9

- 10 La mezcla anterior se fundió como una pasta en un molde ed cubo, seguido de 24 horas de curado sellado a 80 grados Celsius. Se determinó que la resistencia a la compresión del cubo de pasta era de 11 MPa, lo que demuestra que el material gana resistencia con el curado térmico, como se esperaba. La menor resistencia relativa puede explicarse por la omisión de arena (como en el mortero), y un mayor contenido de mineral de cuarzo no fundido en comparación con otros ejemplos (el cuarzo se funde a > 1600°C), que actúa como un relleno relativamente inerte.

- 15 Resumen de los ejemplos 1 a 8

La Tabla 17 a continuación resume los principales hallazgos de los ejemplos 1 a 8 y también proporciona una comparación con el rendimiento de dos cenizas volantes; una ceniza volante Tipo F disponible comercialmente que ha sido beneficiada (B-FA), y ceniza volante de composición Tipo F extraída directamente de una central eléctrica de carbón en Nueva Escocia, Canadá. En la Figura 5 se proporciona una representación visual de las distribuciones de redondez R.

20

Tabla 17: Resumen de los ejemplos 1 a 8

Ejemplo	Muestra	Material	Tipo	Tamaño de partícula D[3,2] (μm)	R (redondez)			Resistencia a la compresión del mortero (MPa)
					Media	Desc. Est.	ne	
1	PUM-1	Piedra pómez	Materia prima procesada	11.0	0.79	0.21	201	<1
					0.86	0.11	128	11
2	B-FC	Basalto	Materia prima procesada	10.5	0.80	0.15	151	
					0.89	0.10	160	19
3	BD-1	Basalto	Materia prima procesada	8.0	0.75	0.16	1326	
					0.91	0.08	230	27
4	VJ	Relaves de carbón	Materia prima procesada	11.2	0.73	0.17	561	
					0.89	0.06	652	21

5	FRS	Mina de cobre de sedimentos	Materia prima		0.79	0.66	2383	
6	LA-01	Relaves	Materia prima procesada		0.68	0.21	1414	
				11.4	0.90	0.08	294	18
7	SC-01	Hormigón	Materia prima procesada		0.78	0.14	627	
				10.0	0.88	0.10	238	27
8	SV-AGG	Agregado félsico	Materia prima procesada		0.78	0.16	2564	
				9.3	0.88	0.07	951	11
	L-FA	Cenizas volantes (tipo F)	Directo desde la central eléctrica	3.9	0.83	0.13	1505	2.2
	B-FA	Cenizas volantes (tipo F)	Beneficiado	5.1	0.87	0.07	797	23
R - redondez (sin unidades), según lo definido por Takashimizu & Iiyoshi (2016), n - número de partículas analizadas.								

Ejemplo 9: Uso de reactivo cementoso sintético como SCM alternativo

- La muestra de basalto microesferoidal "BD" del Ejemplo 3 anterior se procesó adicionalmente pulverizando el polvo en un molino de anillos durante 5 minutos, provocando que las partículas más gruesas se rompieran y, por lo tanto, aumentarían el área de superficie reactiva. Se determinó que el tamaño de partícula de  $D[3,2]$  era de  $3.6 \mu\text{m}$  mediante análisis de difracción láser. Curiosamente, las esferas pequeñas  $<10 \mu\text{m}$  tienden a actuar como cojinetes de bolas en el molino y resisten la rotura. El índice de actividad de fuerza del reactivo se comparó con una ceniza volante Tipo F de alta calidad disponible comercialmente con una composición de óxido  $\text{SiO}_2$ -52.09%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -18.58%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -4.25%;  $\text{MgO}$ -2.98%;  $\text{CaO}$ -10.25%;  $\text{Na}_2\text{O}$ -6.03%;  $\text{K}_2\text{O}$ -1.72%.
- 5 Siguiendo la norma ASTM C618, se fundieron cubos de 50 mm de una mezcla de control de cemento Portland, cemento Portland con cenizas volantes (20% y 40% de reemplazo), y cemento Portland con reactivo cementoso en polvo BD (también 20% y 40% de reemplazo). La Tabla 18 proporciona los resultados de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. El rendimiento de la mezcla BD con un reemplazo del 20% fue comparable con las cenizas volantes comerciales Tipo F y el índice de actividad de resistencia fue aceptable. La mezcla de BD fue fácilmente trabajable y se mezcló sin problemas. En particular, tanto el reactivo BD como las cenizas volantes producen resistencias de mortero muy utilizables superiores a 40 MPa después de 28 días con un reemplazo del 40% del cemento Portland. Por lo tanto, el reactivo cementoso BD puede considerarse un sustituto adecuado de las cenizas volantes en términos de resistencia a la compresión.

Tabla 18: Resistencia del cemento Portland con reactivo cementoso BD en polvo

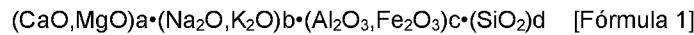
	Fuerza compresiva		Índice de actividad de fuerza	
	7 días	28 días	Relación con el control (7 días)	Relación con control (28 días)
Control	45.4	60.8		
FA-20	38.6	48.4	85%	79%

	Fuerza compresiva		Índice de actividad de fuerza	
	7 días	28 días	Relación con el control (7 días)	Relación con control (28 días)
FA-40	29.2	42		
BD-20	38.4	50.8	84%	83%
BD-40	26.4	44		
Requisito mínimo de ASTM C618			75%	75%

Material cementoso

5 De acuerdo con algunas realizaciones, un novedoso método de producción y usos de reactivos cementosos, reactivos de geopolímeros y materiales cementosos suplementarios (SCM) proporciona ventajas significativas sobre los métodos y fórmulas conocidos.

De acuerdo con algunas realizaciones, un reactivo cementoso comprende el óxido de Fórmula 1:



en donde a es aproximadamente 0 a aproximadamente 4,

b es aproximadamente 0.1 a aproximadamente 1,

10 c es 1, y

d es aproximadamente 1 a aproximadamente 15.

Ventajosamente, el reactivo cementoso según la presente invención se formula a partir de abundantes rocas, minerales y compuestos de composición adecuada. Preferiblemente, el contenido de CaO es inferior a aproximadamente el 30% en peso para reducir el impacto de CO2 del cemento.

15 En algunas realizaciones, el reactivo cementoso está en forma de un sólido no cristalino. En realizaciones, el reactivo cementoso está en forma de polvo que comprende una distribución de tamaño de partícula con un D50 (diámetro medio) de aproximadamente 20 μm o menos, o preferiblemente 10 μm o menos.

20 En realizaciones, el reactivo cementoso comprende al menos una de las siguientes propiedades: un contenido de 45%-100%, y preferiblemente 90-100%, de sólido amorfo a rayos X; y relaciones de composición molar de  $(Ca,Mg)_0.12 \cdot (Na,K)_{0.05-1} \cdot (Al, Fe3+)_1 \cdot Si_{1-20}$ .

25 En algunas realizaciones, el reactivo cementoso comprende menos de aproximadamente 10% en peso de CaO. En otra realización, el reactivo cementoso comprende más de aproximadamente 30% en peso de CaO. La composición del reactivo cementoso con respecto a la relación molar de (Na, K), y Ca puede variarse para obtener ciertas ventajas dependiendo de los requisitos del aglutinante. Por ejemplo, un reactivo cementoso con menos de aproximadamente 10% en peso de CaO es adecuado para su uso en geopolímeros curados térmicamente y como sustituto de las cenizas volantes. Como alternativa, un reactivo cementoso con más de aproximadamente 30% en peso de CaO tiene propiedades hidráulicas y se puede agregar a la resina de geopolímero para permitir el curado a temperatura ambiente del cemento de geopolímero, y reemplaza directamente la escoria de alto horno en el cemento Portland mezclado.

30 En algunas realizaciones, el reactivo cementoso es un reactivo cementoso bajo en calcio con una composición molar de  $Si/(Fe^{3+},Al)$  entre 1-20, y con un contenido de CaO de aproximadamente 10% en peso o menos. Preferiblemente, tal reactivo cementoso es 40-100% amorfo a los rayos X, más preferiblemente aproximadamente 80-aproximadamente 100% amorfo a los rayos X, incluso más preferiblemente 100% no cristalino. Este reactivo cementoso con bajo contenido de calcio puede encontrar numerosas aplicaciones comerciales, por ejemplo, como mezcla puzolánica en cemento hidráulico y/o como reactivo en cementos y aglutinantes geopolímeros.

35 En otra realización, el reactivo cementoso es un reactivo cementoso rico en calcio con una composición molar de  $Si/(Fe^{3+},Al)$  entre 1-20, y un contenido de CaO de aproximadamente 10-aproximadamente 50% en peso, preferiblemente aproximadamente 20-aproximadamente 45% en peso. Preferiblemente, tal reactivo cementoso es 40-100% amorfo a los rayos X, más preferiblemente aproximadamente 80-aproximadamente 100% amorfo a los rayos X, incluso más preferiblemente 100% no cristalino. Un reactivo cementoso de este tipo con alto contenido de calcio puede

encontrar numerosas aplicaciones comerciales, por ejemplo como aditivo hidráulico en cemento hidráulico mezclado y/o como reactivo en cementos y aglutinantes geopolímeros.

5 En otra realización, el reactivo cementoso es un reactivo cementoso que contiene calcio intermedio con una composición molar de Si/(Fe<sup>3+</sup>,Al) entre 1-20, y un contenido de CaO de aproximadamente 10-aproximadamente 20% en peso. Preferiblemente, tal reactivo cementoso es aproximadamente 40-100% amorfo a los rayos X, y preferiblemente aproximadamente 80-100% amorfo a los rayos X, e incluso más preferiblemente 100% no cristalino. Un reactivo cementoso que contiene calcio intermedio de este tipo puede encontrar numerosas aplicaciones comerciales, por ejemplo como reactivo cementoso con propiedades hidráulicas y puzolánicas intermedias deseables.

10 Una ventaja importante de optimizar Na/K en el reactivo cementoso de acuerdo con la presente es: 1) Aplicaciones SCM donde la cal libre en el cemento hidráulico se intercambiará con álcalis solubles y se coordinará con las moléculas de silato del reactivo cementoso para crear cierta polimerización de aluminosilicato alcalino relativamente estable que mejora en gran medida las propiedades químicas de los cementos hidráulicos tradicionales; y 2) el hecho de que los reactivos de geopolímero con contenidos significativos de Na/K requieren menos endurecedor de silicato soluble de lo que sería necesario de otro modo, disminuyendo así el requisito (y el coste) de silicato soluble de un diseño de  
15 mezcla de geopolímero.

#### Método de preparación

En algunas realizaciones, se seleccionan materiales de aluminosilicato como materia prima para producir reactivo cementoso. La Figura 1 muestra etapas ejemplares necesarias para producir reactivo cementoso a partir de materiales de aluminosilicato, de acuerdo con una realización de la presente invención.

20 En resumen, se selecciona un material de aluminosilicato 101, y se analiza 102 y se evalúa su composición química. La materia prima se puede analizar mediante cualquier método cuantitativo o semicuantitativo adecuado, como XRF, XRD con refinamiento Rietveld, LIBS, EDS, análisis químico húmedo y varios otros métodos existentes para determinar la composición elemental de la materia prima.

25 Si la composición seleccionada no es aceptable, el material se modifica, se mezcla (por ejemplo, en un recipiente antes del procesamiento termoquímico) o se clasifica 103, por ejemplo, mediante la adición de un material de ajuste de composición 104. Como se usa en el presente documento, el término "material de ajuste de composición" se refiere a cualquier material sólido o líquido con una composición adecuada para alterar preferentemente la composición en masa del material de aluminosilicato con respecto a uno o varios de los elementos Ca, Na, K, Al, Fe, y Si.

30 Como se describió anteriormente, los materiales de ajuste de composición que introducen calcio (Ca) pueden estar compuestos de CaCO<sub>3</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>, CaO, CaCl, minerales y compuestos de silicato de calcio, minerales y compuestos de silicato de calcio y aluminio, productos de desecho de cemento Portland, wollastonita, gehlenita y otras composiciones minerales del grupo de la melilita.

35 Como se describió anteriormente, los materiales de ajuste de composición que introducen aluminio (Al) pueden estar compuestos de rocas aluminosas, minerales, suelos, sedimentos, subproductos y compuestos que incluyen uno o más de caolinita, haloisita y otras arcillas ricas en aluminio/pobres en álcali. minerales, Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> polimorfos, cloritoide, estauroлита, granate, corindón, mullita, gehlenita, diáspora, boehmita, gibbsita y nefelina y otros feldespatoides. Otros materiales que pueden usarse incluyen aluminio metálico, bauxita, alúmina y lodo rojo (residuos de refinera de alúmina).

40 Como se describió anteriormente, los materiales de ajuste de composición que introducen hierro (Fe) pueden estar compuestos por rocas, minerales, suelos, sedimentos, subproductos y compuestos ricos en hierro como olivino, minerales de clorita (camosita, clinocloro, etc.), piroxenos, anfíboles, goetita, hematita, magnetita, ferrihidrita, lepidrocita y otras composiciones de oxihidróxido de hierro, minerales arcillosos y filosilicatos ricos en hierro, y hierro elemental.

45 La clasificación 105 también se puede utilizar como método de ajuste de la composición 103 y se puede desechar cualquier material de desecho indeseable.

50 A continuación se calienta 106 el material de aluminosilicato sólido resultante que comprende una composición deseable. El calentamiento se lleva a cabo para alcanzar una temperatura de calentamiento por encima de la temperatura de la fase líquida para obtener un líquido, por ejemplo a aproximadamente 1000-1600°C, o aproximadamente 1300-1550°C. Se puede usar cualquier método o aparato adecuado para calentar y obtener el líquido, incluyendo, pero no limitado a, fusión en vuelo y/o fusión por lotes. Esto se puede lograr usando, por ejemplo, un horno de plasma, un horno de oxcombustible, un horno de arco, un horno de reverbero, un horno rotatorio y/o un horno solar. Normalmente, se necesita una temperatura del horno de 1000-1600°C, y más normalmente de 1300-1550°C, para obtener la fase líquida deseada.

55 Si se desea, se puede añadir un material fundente al material de aluminosilicato sólido para reducir su punto de fusión y/o inducir la despolimerización del líquido. El material fundente se puede mezclar con el material de aluminosilicato sólido antes del calentamiento (por ejemplo, recipiente) o durante el calentamiento. Los materiales fundentes comunes

que pueden inducir la despolimerización en las masas fundidas y/o una temperatura de fusión más baja incluyen CaF<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, vidrio de desecho, vidrio desecho, frita de vidrio, minerales que contienen álcalis (por ejemplo, feldespatos, zeolitas, arcillas y minerales feldespatoideos), sales de borato, compuestos halógenos (sales que contienen fluoruros y cloruros) y sales de calcio.

- 5 A continuación, el líquido de aluminosilicato se inactiva 107 para obtener un sólido. En realizaciones, la etapa de inactivación comprende reducir la temperatura del líquido significativamente por debajo de la transición vítrea, por ejemplo a 500°C o menos, o preferiblemente por debajo de 200°C o menos. En realizaciones, la inactivación se realiza rápidamente, es decir, la temperatura se reduce a una tasa de aproximadamente  $10^2 \text{ K}^{\text{s}^{-1}}$  -  $10^6 \text{ K}^{\text{s}^{-1}}$  (preferiblemente a una tasa de  $> 10^{3.5} \text{ K}^{\text{s}^{-1}}$ ). Se puede usar cualquier método adecuado para la inactivación, incluido, pero no limitado a, poner en contacto el material fundido con una corriente suficiente de aire adecuadamente frío, con vapor, o con agua para producir un sólido no cristalino.

- 10 A continuación, el sólido se tritura y/o pulveriza para reducir el tamaño de partícula 108 y obtener el reactivo cementoso 109. Esto se puede llevar a cabo usando cualquier método o aparato adecuado que incluye, pero no se limita a, un molino de bolas, un molino de rodillos y un molino vertical de rodillos. Preferiblemente, el tamaño de partícula se reduce para obtener un polvo fino útil en aplicaciones cementosas. En realizaciones, el polvo comprende una distribución de tamaño de partícula con D<sub>50</sub> (diámetro medio) de aproximadamente 20 µm o menos, o preferiblemente 10 µm o menos. Un tamaño de partícula de este tipo es generalmente deseable para garantizar una reactividad suficiente y propiedades del material consistentes.

#### Usos del reactivo cementoso

- 20 Un aspecto relacionado se refiere a la amplia relevancia del reactivo cementoso descrito en el presente documento. Se pueden usar indistintamente composiciones apropiadas de reactivo cementoso diseñado en proporción significativa tanto en cementos geopolímeros como en cementos hidráulicos (es decir, cementos que reaccionan con el agua).

- 25 Por consiguiente, las realizaciones descritas en el presente documento pero no reivindicadas explícitamente abarcan cementos geopolímeros y cementos hidráulicos que comprenden al menos un 5% en peso, o al menos un 10% en peso, o al menos un 15% en peso, o al menos un 20% en peso, o al menos 25% en peso, o al menos 30% en peso, o al menos 40% en peso, o al menos 50% en peso, o al menos 60% en peso, o al menos 70% en peso, o al menos 80% en peso, o al menos 90% en peso, o más, de un reactivo cementoso como se describe en el presente documento.

- 30 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un material cementoso suplementario (SCM) que comprende un reactivo cementoso como se define en el presente documento. En realizaciones, el SCM comprende aproximadamente el 5 % en peso a aproximadamente 50% en peso (preferiblemente al menos 20% en peso) del reactivo cementoso como se define en el presente documento.

- 35 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un material cementoso suplementario (SCM) que comprende una o más de las siguientes propiedades: comprende menos de aproximadamente 35 % en peso CaO, con un contenido apreciable de Na/K (p. ej., al menos 2% en peso, preferiblemente al menos 5% en peso) y contenido de Al (p. ej., al menos 5% en peso) y está en forma de un sólido no cristalino .

En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un hormigón sólido, que comprende un reactivo cementoso como se describe en el presente documento, es decir, que comprende aproximadamente el 5 % en peso a aproximadamente 50% en peso (preferiblemente al menos 20% en peso) del reactivo cementoso como se describe en el presente documento.

- 40 En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un cemento hidráulico mezclado que se distingue del cemento Portland. Por ejemplo, la espectroscopía de RMN de <sup>29</sup>Si en estado sólido puede diferenciar el cemento hidráulico mezclado con bajo contenido de hierro (<5% en peso) según la presente invención del cemento Portland (que tiene un constituyente aglutinante CSH dominante) por la cantidad y el tipo de conectividad de los tetraedros de silice en los cementos curados. De hecho, las fases aglutinantes del cemento Portland curado se caracterizan por una baja coordinación y sitios hidratados (Q1, Q1(OH), Q2, y Q2(OH)), una sustitución tetraédrica insignificante de Al, y ninguna coordinación superior (es decir, sin sitios Q3 y Q4). El cemento hidráulico mezclado con reactivo cementoso según la presente invención mostrará los sitios típicos relacionados con CSH anteriores además de características únicas tales como: sustitución de aluminio (por ejemplo, Q2(1 Al)) y un nivel de coordinación "más alto" que cemento Portland (es decir, ramificación). Por ejemplo, un cemento hidráulico mezclado según la presente invención puede comprender al menos un nivel de coordinación Q3 (por ejemplo, (Q3(2 Al), Q3(1 Al), Q3(0 Al)). En realizaciones, el cemento hidráulico mezclado según la presente invención contiene una proporción mensurable (>1% en peso) de reticulación tridimensional (sitios Q4) que no se conoce en los cementos hidráulicos convencionales. En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un aglutinante de geopolímero que comprende un reactivo cementoso como se define en el presente documento, es decir, que comprende aproximadamente el 5 % en peso a aproximadamente 90% en peso (preferiblemente al menos 20% en peso, al menos 30% en peso, al menos 50% en peso, al menos 75% en peso) del reactivo cementoso como se define en el presente documento.

En el presente documento se describe, pero no se reivindica explícitamente, un hormigón geopolímero sólido que comprende aproximadamente un 5% en peso a aproximadamente 50% en peso (preferiblemente al menos 20% en peso) del reactivo cementoso como se define en el presente documento.

5 Los expertos en la técnica podrán apreciar que la presente invención proporciona ventajosamente medios para producir reactivos cementosos versátiles con bajo contenido de CO<sub>2</sub> a partir de materiales naturales abundantes y baratos. Otra ventaja importante es la creación de un reactivo único que cumple con los estándares de especificación actuales para SCM alternativos y, al mismo tiempo, satisface las necesidades del creciente mercado de geopolímeros.

Materiales de aluminosilicato

10 Como se describe en el presente documento, algunas realizaciones proporcionan un método para el procesamiento termoquímico de materiales de aluminosilicato para producir un reactivo cementoso sólido que puede usarse ventajosamente como un material cementoso suplementario (SCM) alternativo en cemento hidráulico mezclado y/o como un reactivo sólido de geopolímero en aglutinantes de geopolímero (eliminando así la necesidad de algunos o todos los MK-750, cenizas volantes, GGBFS, y otros reactivos sólidos comunes).

15 En algunos casos, se usa un material de aluminosilicato para producir un reactivo cementoso no cristalino como se define en el presente documento. En algunas realizaciones, se usa un material de aluminosilicato para producir al menos uno de un material cementoso suplementario (SCM) y un reactivo de geopolímero.

20 Como se usa en el presente documento, el término "material de aluminosilicato" se refiere a un material que comprende aluminio y/o Fe<sup>3+</sup>, y dióxido de silicio seleccionado de rocas y minerales naturales, materiales dragados, desechos mineros que comprenden rocas y minerales, vidrio de desecho, materiales contaminados que contienen aluminosilicato y subproductos industriales aluminosilíceos. Un material de aluminosilicato según la presente invención está preferiblemente en forma de un sólido cristalino (por ejemplo, al menos 50 % en peso, o al menos 60 % en peso, o al menos 70 % en peso, o al menos 80 % en peso, o al menos 90 % en peso, or 100 % en peso crystalline solid). In  
 25 embodiments, the aluminosilicate material comprises al menos 2 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O), o al menos 3 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O), o al menos 4 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O), o al menos 5 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O), al menos 6 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O), o al menos 7 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O), o al menos 8 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O), o al menos 10 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O), o al menos 12 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O), o al menos 15 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O), o al menos 20 % en peso (Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O).

30 En algunas realizaciones, el material de aluminosilicato se selecciona de sedimentos dragados, hormigón demolido, desechos de minas, arcilla glacial, depósitos glaciales, depósitos fluviales, rocas y mezclas de minerales, por ejemplo rocas y mezclas de minerales compuestas por algunos o todos los elementos Ca, Na, K, Fe, Al y Si.

En algunas realizaciones, se seleccionan materiales de aluminosilicato como materia prima para producir reactivo cementoso. La materia prima se puede analizar mediante métodos cuantitativos o semicuantitativos como XRF, XRD con refinamiento Rietveld, LIBS, EDS, análisis químico húmedo y varios otros métodos existentes para determinar la composición elemental de la materia prima.

35 Ejemplo 10: Utilización de sedimentos dragados

Se tomó una muestra de sedimentos de los tramos inferiores de marea del río Fraser, Vancouver, BC. La muestra está compuesta por fracciones de tamaño de arena fina, limo y arcilla. La mineralogía de la muestra se proporciona en la Tabla 19 (determinada por XRD con refinamiento de Rietveld) y la composición de óxidos de los elementos principales se estimó a partir de la mineralogía (Tabla 20).

40 Tabla 19. Mineralogía de la muestra de sedimentos del río Fraser

Fase	% en peso
cuarzo-bajo	42
andesina	16
albita baja	13
illita/musc 2m 1	11
clinocloro	5
augita	4

Fase	% en peso
ortoclasa	4
actinolita	4
dolomita	2
caolinita	2

Tabla 20. Composición del óxido (estimada a partir de mineralogía)

Óxido	% en peso
SiO <sub>2</sub>	73.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2
FeO	1.5
MnO	0.0
MgO	3.1
CaO	3.3
Na <sub>2</sub> O	2.6
K <sub>2</sub> O	1.4
CO <sub>2</sub>	0.9
H <sub>2</sub> O	2.2

5 El sedimento del río Fraser (FRS) se secó, se clasificó y la fracción que superó los 120 µm se alimentó a un aparato de vitrificación que calentó el material hasta el punto de fusión hasta aproximadamente 1450°C, seguido de una etapa de inactivación rápida para enfriar el polvo. El polvo de vidrio FRS resultante se trituró en un molino de bolas hasta D50 <20 µm. El componente amorfo a los rayos X del polvo obtenido fue del 52%. Los resultados de mineralogía arrojan una relación molar estimada de Si/(Al, Fe<sup>3+</sup>) de 11.46, y composición molar del reactivo cementoso de (Ca,Mg)<sub>1.25</sub>•(Na,K)<sub>0.34</sub>•(Al, Fe<sup>3+</sup>)<sub>1</sub>•Si<sub>11.46</sub> y CaO de 3.3% en peso. Esto puede calificarse como un "reactivo cementoso bajo en Ca".

10 Aglutinante de geopolímero termocurado: Se mezclaron 5 partes del reactivo cementoso bajo en Ca con 1 parte de solución de silicato de potasio (relación molar SiO<sub>2</sub>:K<sub>2</sub>O=1.45). La pasta se mezcló completamente, se colocó en un molde sellado y se curó a 80°C durante 4 horas. La pasta endurecida resultante alcanza una resistencia a la compresión de al menos 20 MPa en una prueba de compresión de cilindros.

15 Aglutinante de geopolímero curado al ambiente: Se mezclaron 5 partes del reactivo cementoso bajo en Ca con 1 parte de solución de silicato de potasio (relación molar SiO<sub>2</sub>:K<sub>2</sub>O=1.45), 1 parte de agua y 1.5 partes de CaSiO<sub>3</sub> finamente molido. La solución de silicato se mezcló con CaSiO<sub>3</sub> en polvo y se deja reaccionar durante 15 minutos. La pasta resultante se mezcló completamente con polvo de vidrio FRS y agua, luego se colocó en un molde sellado y se curó a 20°C durante 7 días. La pasta endurecida resultante alcanza una resistencia a la compresión de al menos 20 MPa

20 en una prueba de compresión de cilindros.

- 5 Aplicación de SCM curado al ambiente en cemento Portland: se moldearon una serie de cubos de mortero de cemento Portland a partir de una mezcla 50:50 de cemento y arena. El reactivo cementoso bajo en Ca se sustituyó al 0%, 20%, 40%, 60% y 80% en lugar de cemento Portland en la mezcla de mortero. Los cubos se curaron durante 7 días al 100% de humedad y la resistencia a la compresión de los cubos se presenta en la Tabla 21. El reemplazo de hasta el 60% del cemento Portland ordinario ("OPC") produce resistencia a la compresión utilizable para muchas aplicaciones y al mismo tiempo reduce proporcionalmente la huella de CO<sub>2</sub> del mortero.

Tabla 21: Resistencia a la compresión de 7 días, aplicación SCM

Reactivo cementoso FRS (%)	Resistencia a la compresión (MPa ± 10)
0% (100% OPC)	40
20% (80% OPC)	37.5
40% (60% OPC)	30
60% (40% OPC)	15
80% (20% OPC)	3.5

Ejemplo 11: Utilización de hormigón demolido

- 10 Se tomó una muestra de un núcleo de hormigón estructural de un desarrollo de viviendas de mediana altura de 2019 en Vancouver, BC. La composición mineral del hormigón (incluido el agregado fino y grueso) se proporciona en la Tabla 22 (DRX con refinamiento Rietveld), y la composición elemental en masa se calcula a partir de la mineralogía en la Tabla 23.

Tabla 22. Mineralogía de muestra de hormigón.

Fase	% en peso
albita baja (calciana)	31
cuarzo-bajo	21
albita baja	11
ortoclasa	8
calcita	8
*Estimación del gel CSH	6
clinozoisita	3
actinolita	3
clinocloro II	3
biotita 1M	2
etringita	2
C2S beta	2

Fase	% en peso
brownmillerita (Al)	1
yeso	1

Tabla 23. Composición del óxido (estimada a partir de mineralogía)

Óxido	% en peso
SiO <sub>2</sub>	64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
FeO	1
MnO	0
MgO	2
CaO	11
Na <sub>2</sub> O	5
K <sub>2</sub> O	2
CO <sub>2</sub>	4
H <sub>2</sub> O	4

5 El hormigón se trituró y pulverizó hasta obtener un polvo con D50 de aproximadamente 20 µm. El polvo se alimentó a través de un aparato de vitrificación que calentó el material hasta el punto de fusión hasta aproximadamente 1450°C, seguido de una etapa de inactivación. Las partículas vítreas resultantes se molieron finamente hasta obtener un polvo con D50 de aproximadamente 5-15 µm.

10 Los resultados de mineralogía de este polvo arrojan una relación molar estimado de Si/(Al, Fe<sup>3+</sup>) de 9.88, y composición molar del reactivo cementoso de (Ca,Mg)<sub>2.79</sub>•(Na,K)<sub>0.55</sub>•(Al, Fe<sup>3+</sup>)<sub>1</sub>•Si<sub>9.88</sub> y CaO del 11% en peso. Esto puede calificarse como un "reactivo cementoso de Ca intermedio".

15 Cemento geopolímero curado al ambiente: La pasta de cemento se mezcló completamente en peso utilizando vidrio de hormigón en polvo (2.5 partes), una solución de silicato de potasio con una relación molar de SiO<sub>2</sub>:K<sub>2</sub>O=1.45 (0.74 partes) y agua (0.08 partes). Luego la pasta se colocó en moldes cilíndricos y se curó a 20°C. El tiempo de fraguado se estimó mediante la prueba de penetración de la aguja Vicat. El fraguado inicial se produjo a los 51 minutos y el tiempo de fraguado final fue de 195 minutos.

La resistencia a la compresión de una mezcla de mortero que comprende 50:50 de cemento geopolímero curado a temperatura ambiente y arena se midió comprimiendo cilindros hasta su falla. Después de 3 días, la resistencia a la compresión alcanzó aproximadamente 25 MPa y la resistencia a la tracción fue de aproximadamente 2 MPa (mediante el método del cilindro partido).

20 Para probar el alto rendimiento térmico, una muestra del hormigón estructural original y un cilindro fundido de geopolímero de 1 cm de diámetro se sometieron a 750°C en aire durante 2 horas. El hormigón de cemento Portland se decrepitó y se convirtió en polvo tras su manipulación, pero el cilindro de mortero de geopolímero permaneció intacto sin grietas ni defectos visibles.

Los novedosos métodos, sistemas, aparatos, y formulaciones presentados en el presente documento proporcionan numerosos beneficios, como se detalla en todo momento. En algunos casos, la formulación y los procesos novedosos dan como resultado una partícula, polvo o reactivo que es particularmente útil como reemplazo de los aditivos cementosos tradicionales en composiciones de cemento hidráulico o cemento geopolímero. La novedosa formulación puede comprender una composición molar, en la que:

5

$$\frac{Si}{Si+Al+Fe+(Ca+Mg)+(Na+K)} = 0.295 \text{ a aproximadamente } 0.605$$

$$\frac{Al}{Si+Al+Fe+(Ca+Mg)+(Na+K)} = 0.190 \text{ a aproximadamente } 0.340$$

$$\frac{Fe}{Si+Al+Fe+(Ca+Mg)+(Na+K)} = 0 \text{ a aproximadamente } 0.16$$

$$\frac{Ca+Mg}{Si+Al+Fe+(Ca+Mg)+(Na+K)} = 0 \text{ a aproximadamente } 0.215, \text{ y}$$

$$\frac{Na+K}{Si+Al+Fe+(Ca+Mg)+(Na+K)} = 0.04 \text{ a aproximadamente } 0.24$$

Si bien las novedosas fórmulas presentadas en este documento dan como resultado un material único que es especialmente adecuado para los propósitos descritos a lo largo, puede resultar difícil diferenciar el material por sus rangos elementales individuales o una región en un diagrama ternario solo, debido al hecho de que los diagramas ternarios se limitan a la visualización de exactamente tres partes compositivas y todas las partes elementales de la composición total tienen relaciones interdependientes.

10

Como las composiciones geoquímicas se clasifican como "datos compositivos", se aplicó una transformación (transformación de relación logarítmica centrada - CLR) del espacio Simplex al Euclidiano a las composiciones de 7 partes, preservando la información codificada en las composiciones molares de una manera que los métodos estadísticos estándar puede manejar.

15

En la representación CLR de datos químicos, se completó una clasificación de Bosque Aleatorio y, de este modelo predictivo, se extrajo el conjunto de clasificación de 8 reglas (que se presenta a continuación). Utilizando este conjunto de reglas, las cenizas volantes y las composiciones de materia prima descritas se separan, a pesar de que puede parecer que hay una superposición de composición entre estos materiales en los diagramas ternarios. Un modelo de clasificación como este es útil para representar o clasificar con precisión composiciones que exceden los datos tridimensionales.

20

#### Modelado de la novedosa formulación y material

El reactivo vítreo descrito ("Materia prima Novedosa", o material cementoso alternativo "ACM") se diferencia de las cenizas volantes en varias características importantes, tal como el historial de tiempo- temperatura, la capacidad de fabricación en casi cualquier ubicación y valores relativamente más bajos de metales pesados problemáticos contaminantes. La composición química de los elementos principales de las realizaciones descritas en el presente documento también se diferencia fácilmente estadísticamente de las cenizas volantes utilizando reglas de composición. A modo de ejemplo, se construyó un modelo estadístico utilizando datos de composición de cenizas volantes de la literatura y composiciones esperadas de materia prima adecuadas como se describe en este documento. Las reglas de clasificación se generaron a partir de una submuestra como datos de entrenamiento y se probaron en las composiciones restantes (cenizas volantes y las nuevas composiciones descritas en este documento) para evaluar la precisión y el poder predictivo de las reglas de clasificación. En el modelo siguiente, las cenizas volantes se predicen correctamente el 94% de las veces en 331 composiciones globales de cenizas volantes de la literatura, y el otro 6% se clasificó como "fuera del conjunto de reglas". No se clasificaron erróneamente muestras de cenizas volantes como el novedoso material geológico de materia prima descrito en este documento. El modelo se aplicó a más de 70,000 composiciones de materiales geológicos naturales que se ajustan al rango de composición molar divulgado, y el modelo predice la nueva materia prima descrita en este documento con una tasa de éxito del 99%. Menos del 1% de las composiciones entraban en la categoría de "fuera del conjunto de reglas". Claramente existen diferencias significativas y predecibles entre las novedosas materias primas descritas en el presente documento y otros subproductos reactivos, tal como las cenizas volantes. La composición por sí sola, representada en coordenadas de relación logarítmica centrada (CLR), es muy precisa para discernir la química de las partículas vítreas descritas a partir de las cenizas volantes.

25

30

35

40

#### Aplicación del modelo

Para aplicar el modelo a continuación:

45

1. Mida la composición química en masa de una muestra vítrea determinada mediante cualquier método analítico adecuado y proporcione el % molar de Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na y K.

## ES 2 964 315 T3

2. Convierta datos molares a coordenadas CLR para los 7 elementos.

3. Aplique las siguientes condiciones secuencialmente para predecir si la muestra es ceniza volante o un reactivo Terra, respectivamente.

5 Nota: Si no se cumple una condición, se aplica la siguiente condición. Si no se aplican condiciones a una composición determinada, ELSE predice que la muestra está fuera del conjunto de reglas del modelo y no se puede predecir con confianza.

Reglas

1. Para material vítreo con % en peso equivalente de óxido de CaO en volumen <35%, Y

10 2. Relación % molar en volumen Si/Al > 2,

En particular, la Regla 1 anterior se puede usar para descartar escoria como materia prima, y la Regla 2 se puede usar para descartar metacaolín, caolinita y otros 1: 1 materias primas ricas en arcilla. Aplique las siguientes condiciones a composiciones de muestras molares cerradas transformadas con CLR usando la lógica SI (condición = VERDADERO), ENTONCES (predicción), DE LO CONTRARIO (pasar a la siguiente condición) como se muestra en la Tabla 24 a continuación:

15

Tabla 24

Condición	Predicción
Si>0.40109 & Si<=1.18718 & Al<=0.52677 & Al<=0.40675 & Ca<=-0.40656 & Ca<=-0.7324	Materia prima novedosa
Al>0.5364 & Al>0.55929 & Ca>-4.65173 & Na<=-1.2763 & Mg<=-0.7076 & K>-4.1446	Ceniza volante
Si>0.43721 & Fe<=0.31807 & Fe>-2.32162 & Ca<=-0.08759 & Mg>-1.80049 & Mg>-1.47036	Materia prima novedosa
Al<=0.52677 & Ca<=-0.31475 & K>-1.52367	Materia prima novedosa
Si<=0.44413 & K<=-2.12091	Ceniza volante
Fe>-1.19597 & Ca<=-0.36227 & Na>-1.79741 & Na<=-0.18124 & Mg>-2.7976 & K<=-1.87031	Materia prima novedosa
Al>0.5364 & Fe>-2.59819 & Mg<=-0.7076 & Mg>-6.29972 & Mg<=-0.93309 & K>-4.10525	Ceniza volante
DE LO CONTRARIO	Conjunto de reglas externas

20 La FIG. 11 ilustra la región de las novedosas composiciones molares de 7 partes en un conjunto completo de diagramas ternarios. Las áreas rodeadas por un círculo resaltan las diferencias entre la novedosa materia prima y las muestras globales de cenizas volantes de la literatura. Ejemplos Como se ilustra, la fila superior de cuatro diagramas ternarios representa la perspectiva Si, y se muestra con más detalle en la FIG. 12. Con referencia a las FIGS. 11-15, un contorno negro de las muestras indica el material cementoso alternativo ("ACM") descrito en el presente documento, al que también se le puede denominar Materia Prima Novedosa. Las composiciones de ACM de los Ejemplos 1-8 se muestran como puntos negros etiquetados con el número correspondiente a la composición de ejemplo (números y composiciones resumidos en la Tabla 17). El contorno gris que se muestra en las figuras representa un intervalo de confianza del 90% de muestras de cenizas volantes, basado en 331 muestras únicas (las mismas que se clasificaron utilizando el modelo estadístico anterior).

25

La segunda fila de figuras en la FIG. 11 representa diagramas ternarios desde la perspectiva de Al, y se muestra con más detalle en la FIG 13.

La tercera fila de figuras en la FIG. 11 representa diagramas ternarios desde la perspectiva del Fe, y se muestra con más detalle en la FIG. 14.

Finalmente, la última fila de la FIG. 11 representa un diagrama ternario desde la perspectiva de Ca+Mg, y se muestra con mayor detalle en la FIG. 15.

- 5 Las FIGS. 11-15 ilustran la Novedosa materia prima en relación con las composiciones globales de cenizas volantes y muestran claramente que las dos poblaciones de materiales son altamente distinguibles entre sí incluso en diagramas ternarios molares elementales. Las áreas de superposición aparente entre la materia prima Novedosa y las cenizas volantes se muestran diferenciadas en el modelo de clasificación de dimensiones superiores proporcionado en este documento. Las novedosas materias primas o ACM descritas en el presente documento no son particularmente  
10 resistentes a los álcalis y participan en una reacción con hidróxidos alcalinos o cal como reactivo.

- La FIG. 16 ilustra un diagrama de flujo esquemático del proceso 1600 de fabricar un hormigón de cemento alternativo usando un minihorno en vuelo descentralizado relativamente pequeño. El minihorno puede ubicarse en cualquier lugar adecuado y, debido al tamaño y la naturaleza del minihorno, es especialmente adecuado para ser ubicado en una cantera de agregados, en una planta dosificadora de hormigón, entre una cantera y una planta dosificadora de  
15 hormigón, o cualquier otra ubicación adecuada para minimizar, o al menos reducir, el tiempo y la distancia de transporte que normalmente se requieren para las plantas de hormigón que dependen del cemento Portland.

- En 1602, se proporciona un agregado de aluminosilicato, como se describe en el presente documento. El material agregado puede ser cualquier material de aluminosilicato adecuado y puede extraerse específicamente para el fin previsto, o puede ser material de desecho, tal como relaves de mina, hormigón molido o algún otro tipo de agregado.  
20 En el bloque 1604, el material de aluminosilicato se muele hasta obtener un polvo, como se describe en el presente documento.

- En el bloque 1606, se puede almacenar, enviar o proporcionar un material de aluminosilicato molido a una entrada de un minihorno como se describe en el presente documento. En el bloque 1608, se añade energía al agregado de aluminosilicato molido, tal como combustión de una mezcla de aire/combustible, un soplete, calor industrial o alguna  
25 otra forma de energía para aumentar la temperatura del agregado. En algunas realizaciones, las partículas de aluminosilicato se modifican, mezclan opcionalmente (por ejemplo, en un recipiente antes del procesamiento termoquímico), por ejemplo, mediante la adición de un material de ajuste de composición para alcanzar las relaciones deseadas con respecto a uno o varios de los elementos Ca, Mg, Na, K, Al, Fe, y Si.

- En el bloque 1608, la energía hace que el agregado de aluminosilicato se funda, lo que en algunos casos ocurre en vuelo, tal como cuando el agregado es arrastrado dentro de una columna de aire y/o aire/combustible dentro de una  
30 cámara de fusión.

- En el bloque 1612, después de que el agregado se funda y se inactive, la materia prima se convierte en partículas vítreas de aluminosilicato. En algunos casos, las partículas son sustancialmente esféricas con una redondez  $R > 0.8$ .

- 35 En el bloque 1614, las partículas se combinan con otros ingredientes en una planta mezcladora de hormigón, que en algunos casos puede estar ubicada junto al minihorno. En el bloque 1616, se pueden agregar aditivos al hormigón, tales como endurecedor, reactivo de curado ambiental, aditivos, plastificantes, materiales de refuerzo y similares. En el bloque 1618, se puede agregar arena y agregado grueso al cemento como se conoce en la técnica.

En el bloque 1620, la mezcla de hormigón final está formada y lista para ser utilizada.

- 40 De acuerdo con algunas realizaciones, un método de producción de cemento reduce la distancia de transporte del cemento (y por lo tanto el coste) en comparación con los métodos convencionales. Algunas realizaciones permiten la producción descentralizada de un Material de Cemento Alternativo (ACM) en estrecha proximidad a una cantera de agregados de aluminosilicato y una planta dosificadora de hormigón. Este ACM se puede utilizar ventajosamente como reactivo primario en una formulación de cemento alternativa adecuada que se puede utilizar para fabricar hormigón  
45 rentable y con reducción de CO<sub>2</sub>.

Alternativamente, el ACM puede usarse como un material cementoso suplementario alternativo (ASCM) para reemplazar una proporción de cemento Portland en el hormigón convencional y así reducir el coste y el impacto ambiental del hormigón resultante.

- 50 La FIG. 17 ilustra una planta de cemento Portland típica 1702 en donde el cemento normalmente puede enviarse a largas distancias para llegar a las plantas de lotes de hormigón 1704. De manera similar, el agregado de las canteras 1706 también puede enviarse a largas distancias para llegar a su destino en las plantas de procesamiento por lotes de hormigón 1704. El tiempo y la energía necesarios para enviar estos productos densos y voluminosos aumentan drásticamente el coste asociado con la fabricación de hormigón y contribuyen a la reducción general de emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la producción de hormigón.

5 La FIG. 18 ilustra una disposición alternativa 1800 que utiliza el ACM descrito en el presente documento. En algunos casos, un minihorno ACM 1802 se puede cotejar en un sitio de cantera de agregados 1706. De esta manera, el material de aluminosilicato extraído en la cantera de agregado 1706 se puede procesar en el minihorno ACM 1802 en el sitio sin transportar el agregado a una ubicación remota. El ACM y suficiente agregado pueden entonces enviarse a la planta de hormigón 1704, que puede estar mucho más próxima.

10 La FIG. 19 ilustra una disposición alternativa 1900 que utiliza el ACM descrito en el presente documento. En la realización ilustrada, y el minihorno ACM 1802 se puede colocar junto con una planta por lotes de hormigón 1704. En consecuencia, el agregado de una cantera de agregados 1706 se puede suministrar a la planta de procesamiento por lotes de hormigón 1802 y el agregado se puede usar en el minihorno ACM 1802 como se describe en el presente documento, y también se puede usar como agregado grueso en la mezcla de hormigón.

15 La FIG. 20 ilustra una disposición alternativa 2000 que utiliza el ACM descrito en el presente documento. En la realización ilustrada, un minihorno ACM 1802 está ubicado entre una cantera de agregados 1706 y una planta de procesamiento por lotes de hormigón 1704. En esta disposición, el agregado se puede suministrar al minihorno ACM, que utiliza el agregado para formular ACM como se describe en el presente documento, y el ACM y el agregado adicional se pueden enviar a una planta de procesamiento por lotes de hormigón.

20 La arquitectura del minihorno permite un sistema distribuido que aprovecha la naturaleza más pequeña e incluso portátil del minihorno ACM. En lugar de depender de una única planta de cemento Portland centralizada que debe enviar cemento a largas distancias, varios minihornos ACM pueden reemplazar una planta de cemento Portland y reducir drásticamente los tiempos y costes de envío. Las realizaciones ilustradas de las FIGS 17-20 ofrecen una arquitectura que es ágil, eficiente y reduce el desperdicio al ubicar el minihorno ACM muy cerca de la cantera de agregados, la planta dosificadora de hormigón o ambas.

25 Las composiciones de materia prima adecuadas y el proceso de conversión de la materia prima en partículas vítreas microesferoidales se han descrito en las solicitudes en tramitación del solicitante que tienen el número de serie 62/867,480, presentada el 27 de junio de 2019 y Número de serie 63/004,673, presentada el 3 de abril de 2020. Las materias primas adecuadas son generalmente rocas y minerales que contienen una proporción tanto de óxidos de aluminio como de silicio. Los materiales agregados de construcción comunes utilizados en el hormigón son adecuados, económicos y están convenientemente ubicados para su uso como materia prima de cemento ideal. Anteriormente, no era posible fabricar un material cementoso a partir de materiales de aluminosilicato cristalinos ordinarios.

30 Una ventaja particular de utilizar agregados de aluminosilicato como materia prima de ACM es que el material es barato y está disponible en abundancia.

Otra ventaja particular es que existen ampliamente canteras de agregados de aluminosilicato y, en general, no hay necesidad de permitir nuevas canteras para fabricar ACM mediante el método actual en la mayoría de los mercados.

35 Otra ventaja particular de usar agregado de aluminosilicato como materia prima de ACM es que un minihorno (por ejemplo, como se describe en la solicitud en tramitación del solicitante que tiene el número de serie 63/004,673) puede ubicarse en o muy cerca de la cantera de agregados, o la planta de procesamiento por lotes de hormigón, o ambas, de esta manera minimizar los costes de transporte del cemento. Esta gran ventaja se debe a que el cemento procedente de grandes hornos centralizados viaja en promedio entre 5 y 10 veces más que el agregado (cuyo suministro está descentralizado); una consecuencia natural de la disponibilidad generalizada de agregados, el bajo precio de los agregados y el alto precio de los envíos de agregados.

40 Otra ventaja particular de usar agregado de aluminosilicato como materia prima de ACM es que frecuentemente las canteras tienen abundante material subproducto disponible que está "fuera de especificación", lo que significa que no hay un uso común para esa gradación en particular, a pesar de que dichos materiales comparten una composición generalmente idéntica con los principales productos de cantera. Estos subproductos se encuentran disponibles a precios muy económicos tanto en las canteras de agregados triturados como en las canteras de arena y grava.

45 Otra ventaja particular de los minihornos ACM descentralizados es que se espera que el coste de capital por unidad de producción sea similar al de los hornos rotatorios de cemento convencionales, aunque la escala absoluta de capital requerido es del orden de 1/10 de lo que sería para la producción de cemento Portland.

50 Otra ventaja particular de los minihornos ACM descentralizados es que no se espera que los gastos operativos por unidad de producción excedan los gastos correspondientes en la fabricación de cemento Portland. Por lo tanto, la producción de ACM es competitiva en costes con el cemento Portland a una escala de producción más pequeña, pero requiere de 5 a 10 veces menos gastos de envío.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para producir un reactivo cementoso a partir de materiales de aluminosilicato, que comprende las etapas de:  
proporcionar un material de aluminosilicato sólido;
- 5 moler el material de aluminosilicato sólido para que tenga una distribución de tamaño de partículas con D[3,2] de menos de 20  $\mu\text{m}$ ;  
fundir, mediante fusión en vuelo, el material de aluminosilicato en un horno; y  
inactivar, mediante inactivación en vuelo, del material de aluminosilicato para producir partículas vítreas microesferoidales sólidas.
- 10 2. El método de la reivindicación 1, que comprende además la etapa de ubicar el horno en una cantera de agregados.  
3. El método de la reivindicación 1, que comprende además la etapa de ubicar el horno en una planta por lotes de hormigón.

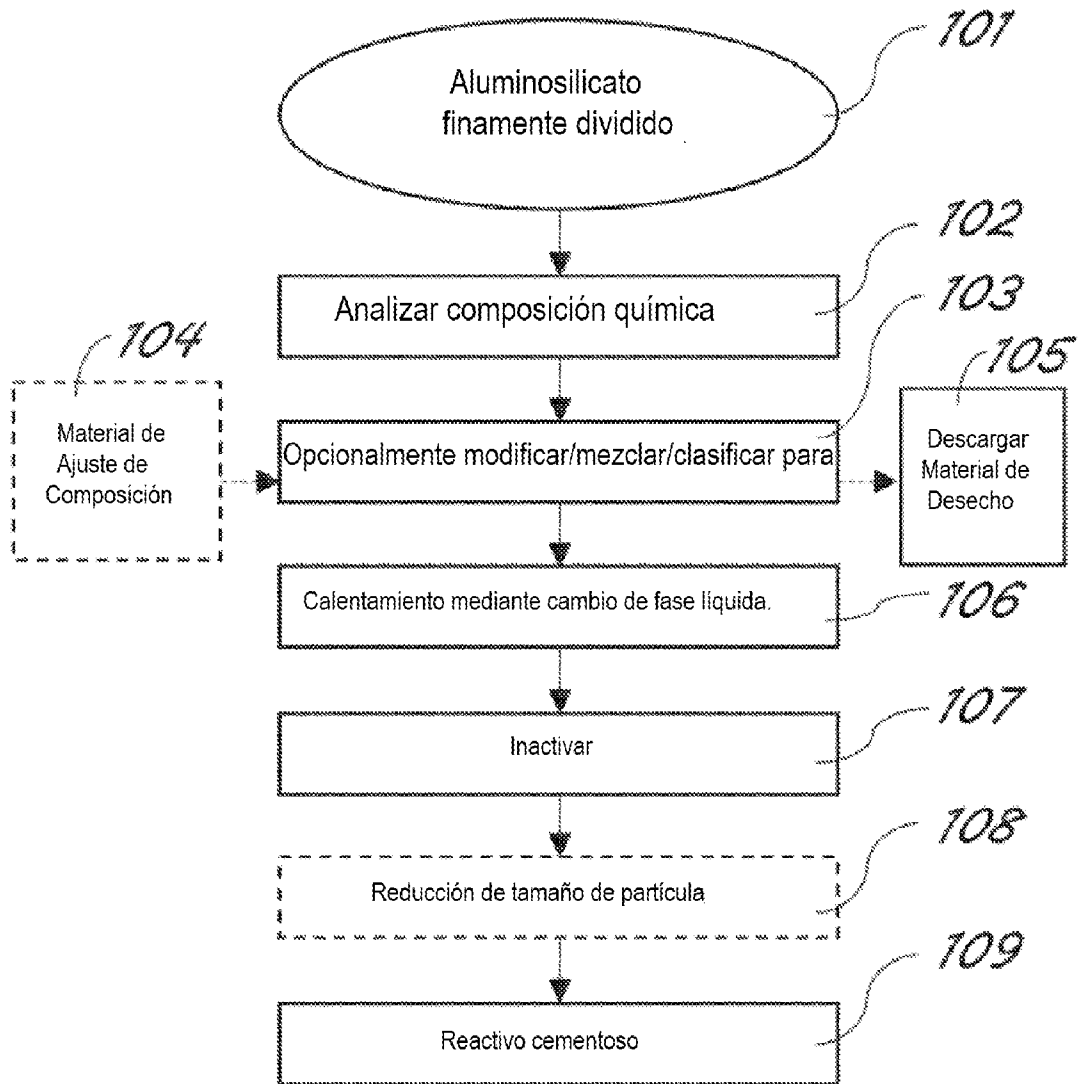


FIG. 1

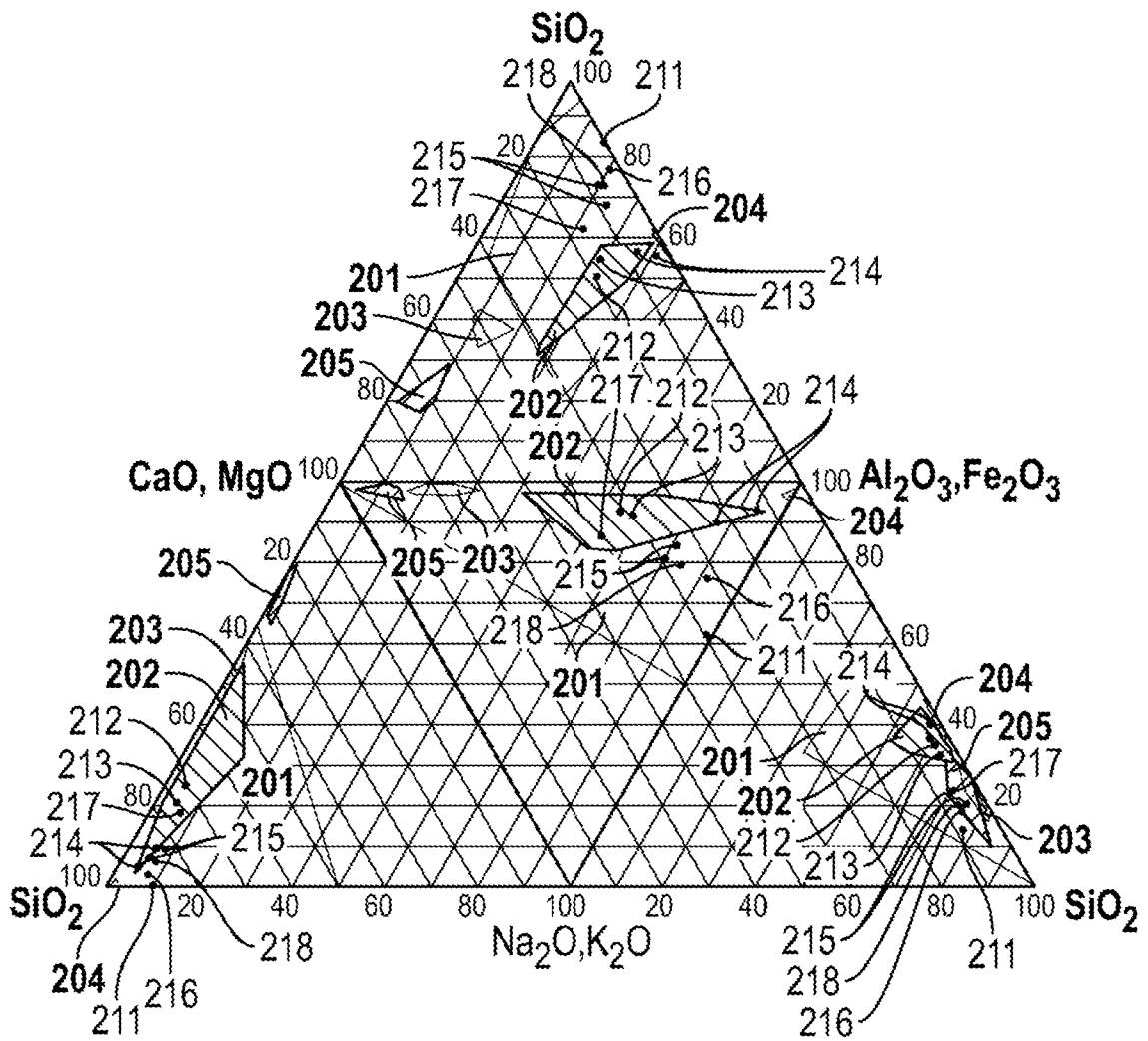


FIG. 2

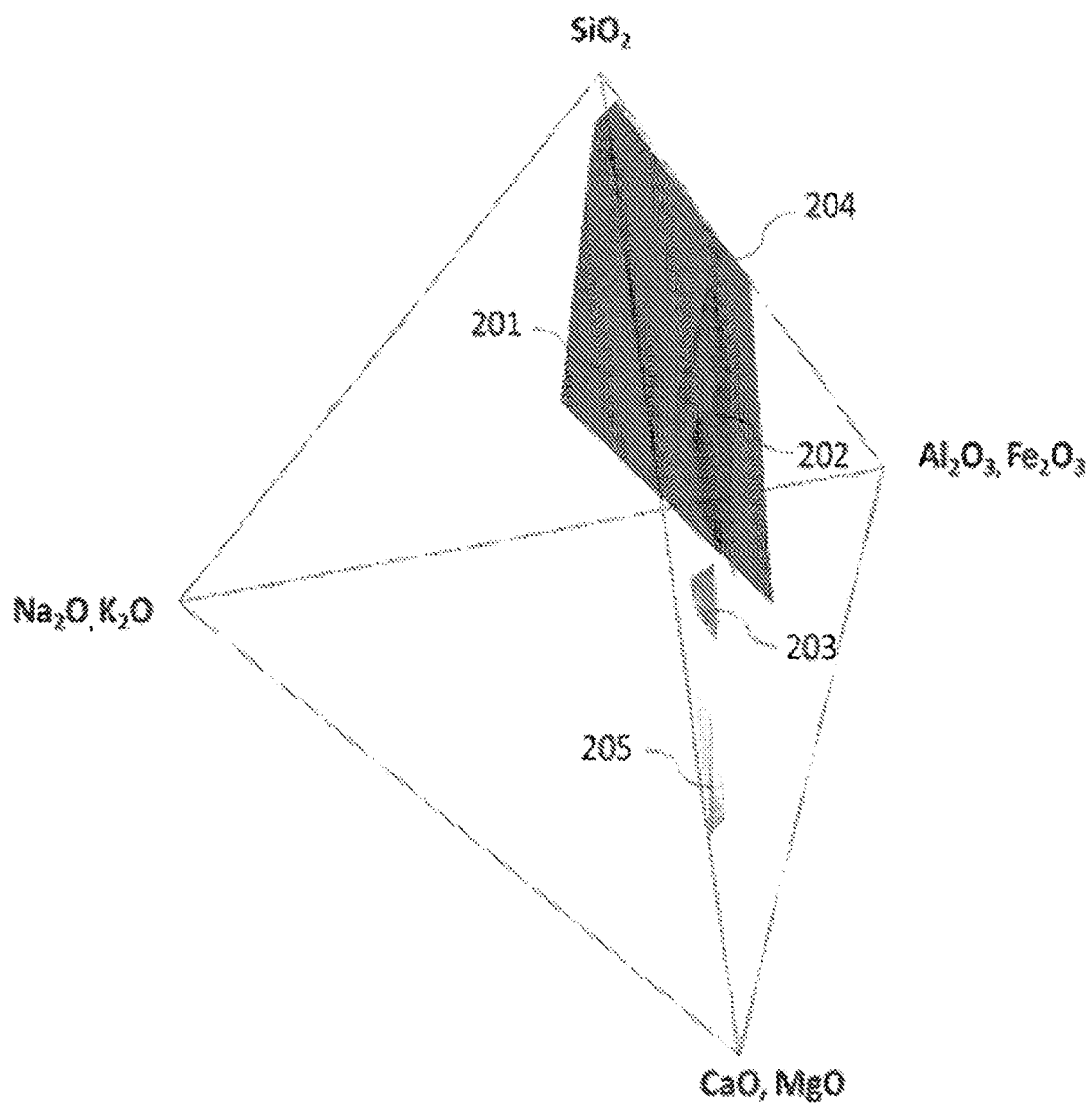


FIG. 3

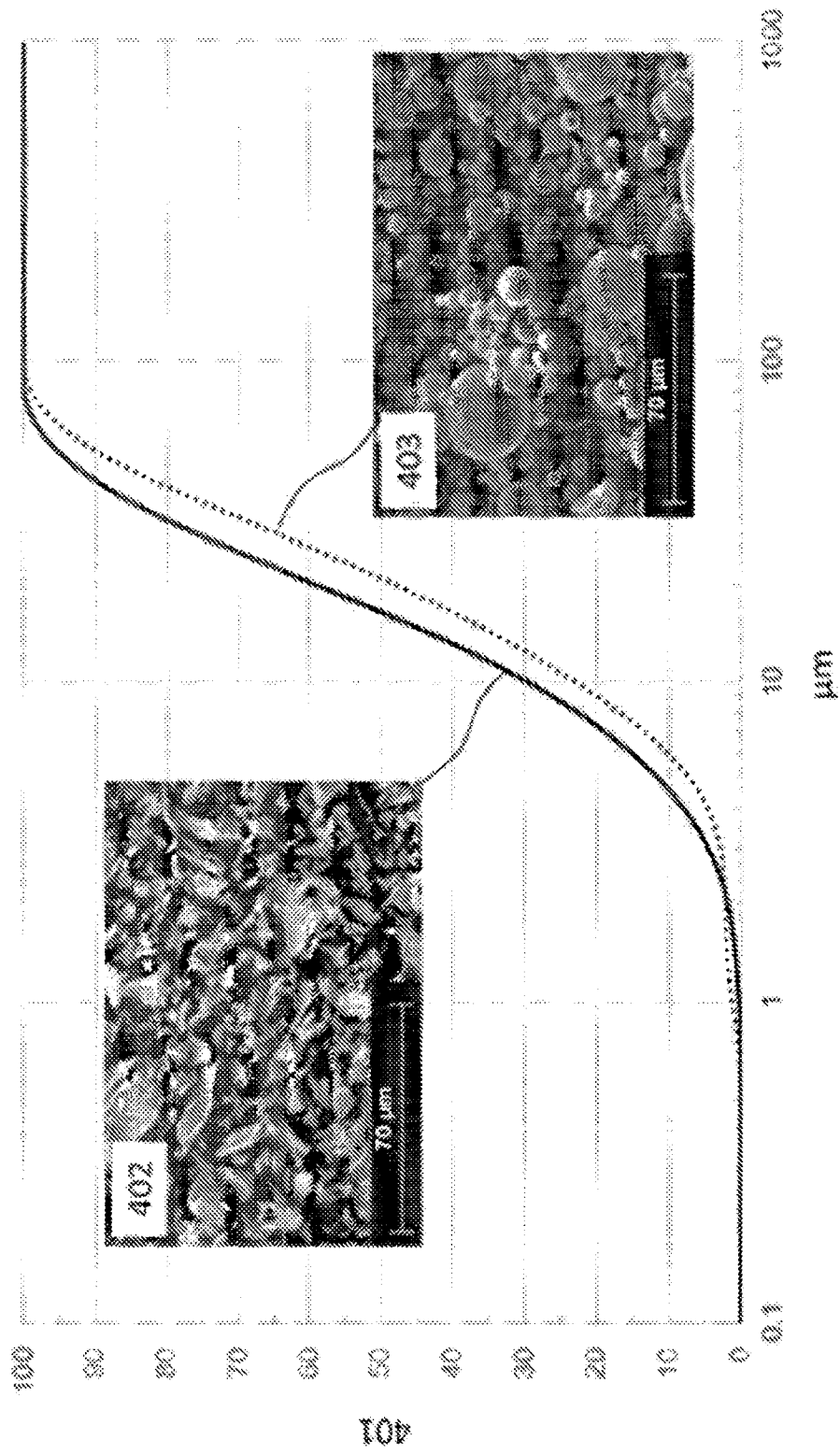


FIG. 4

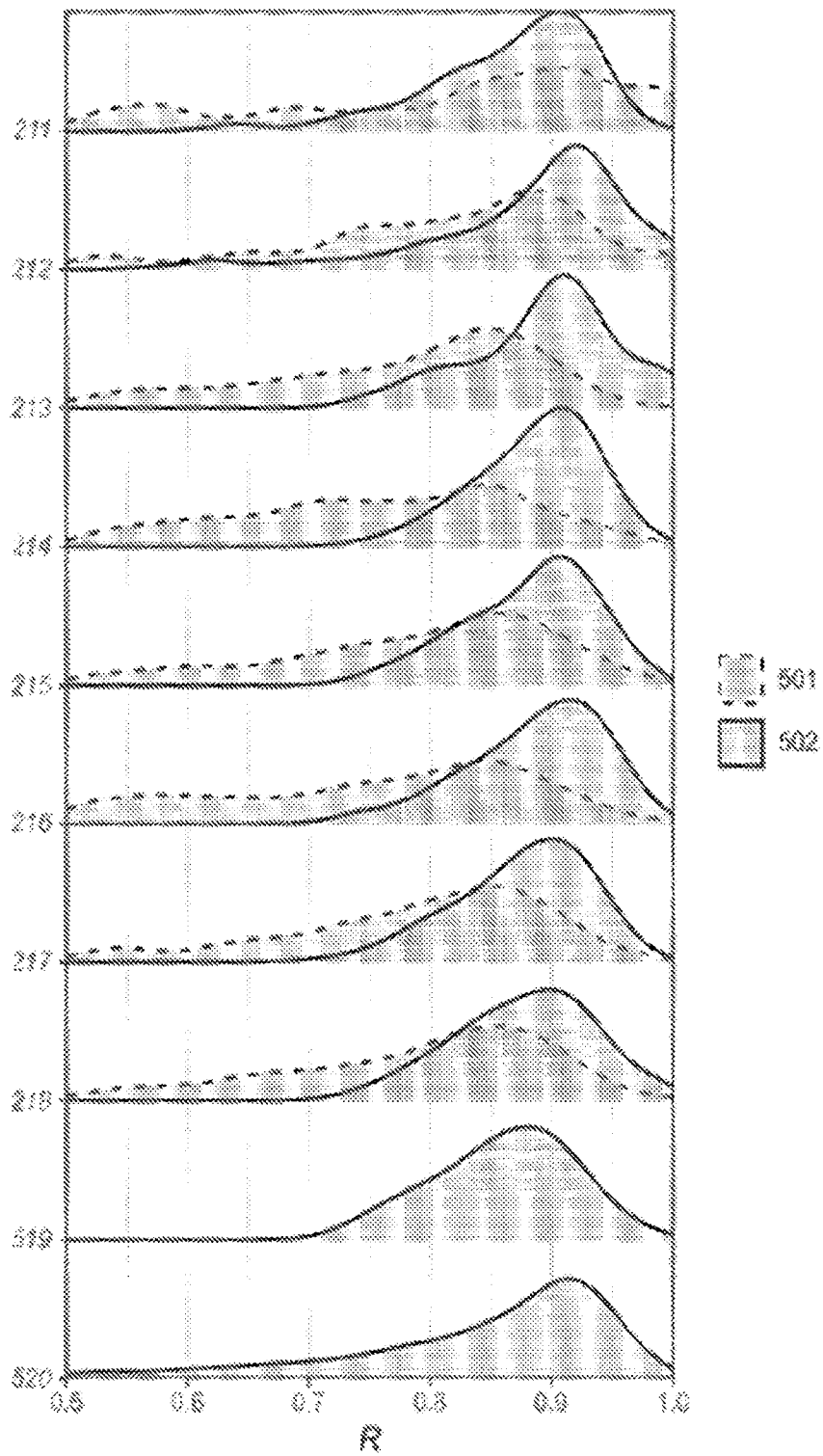


FIG. 5

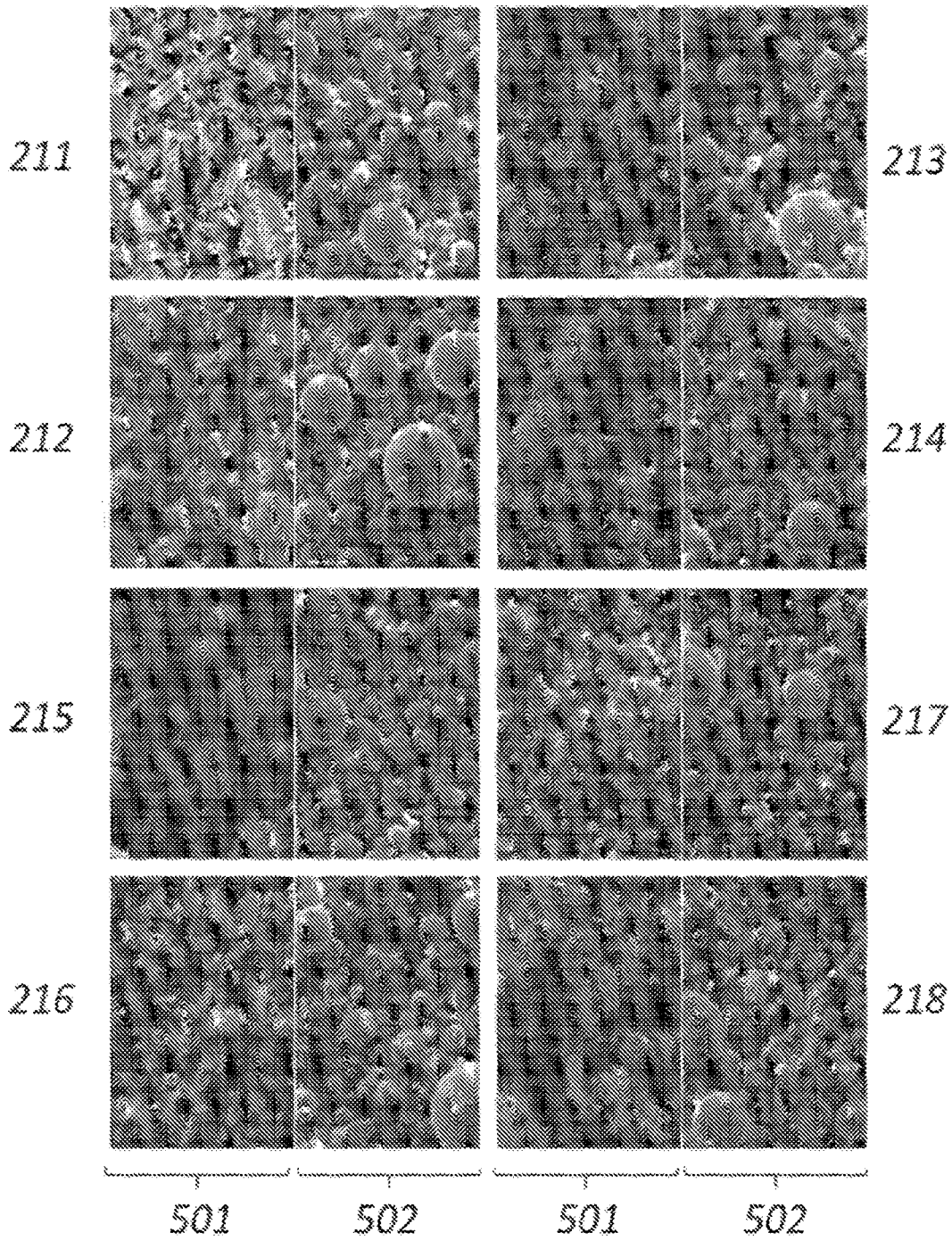
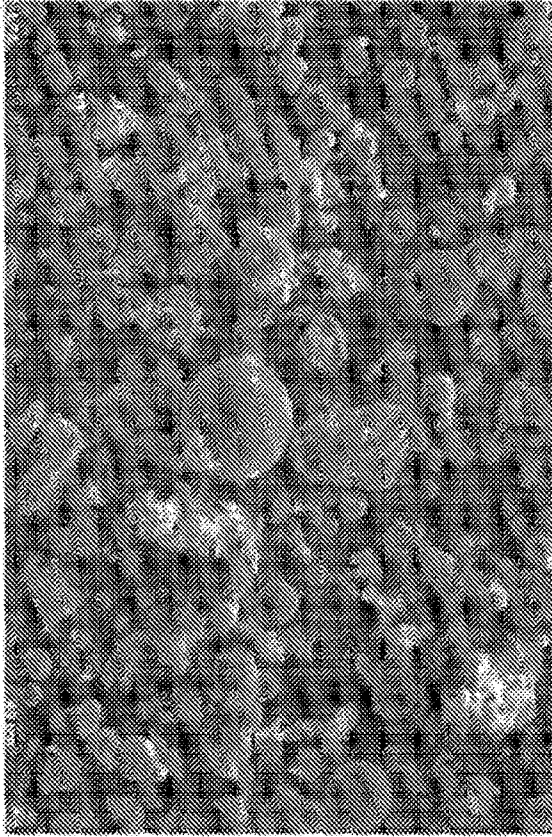
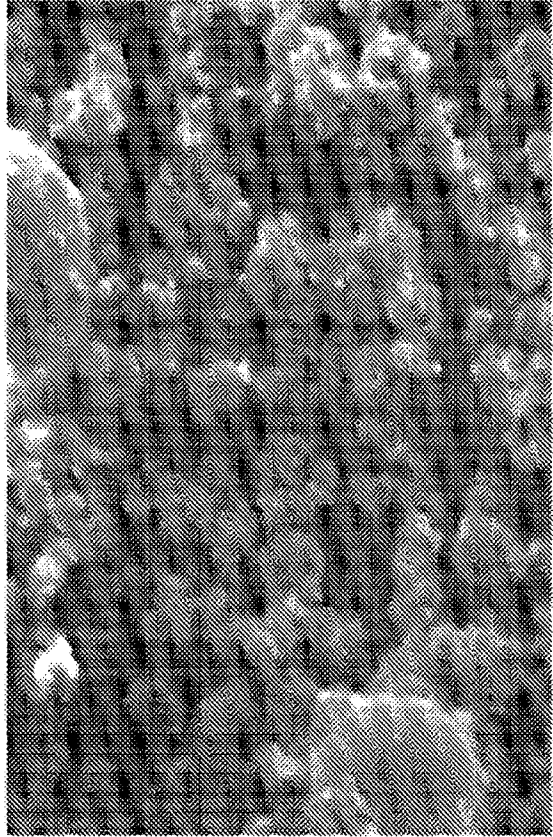


FIG. 6



520



519

FIG. 7

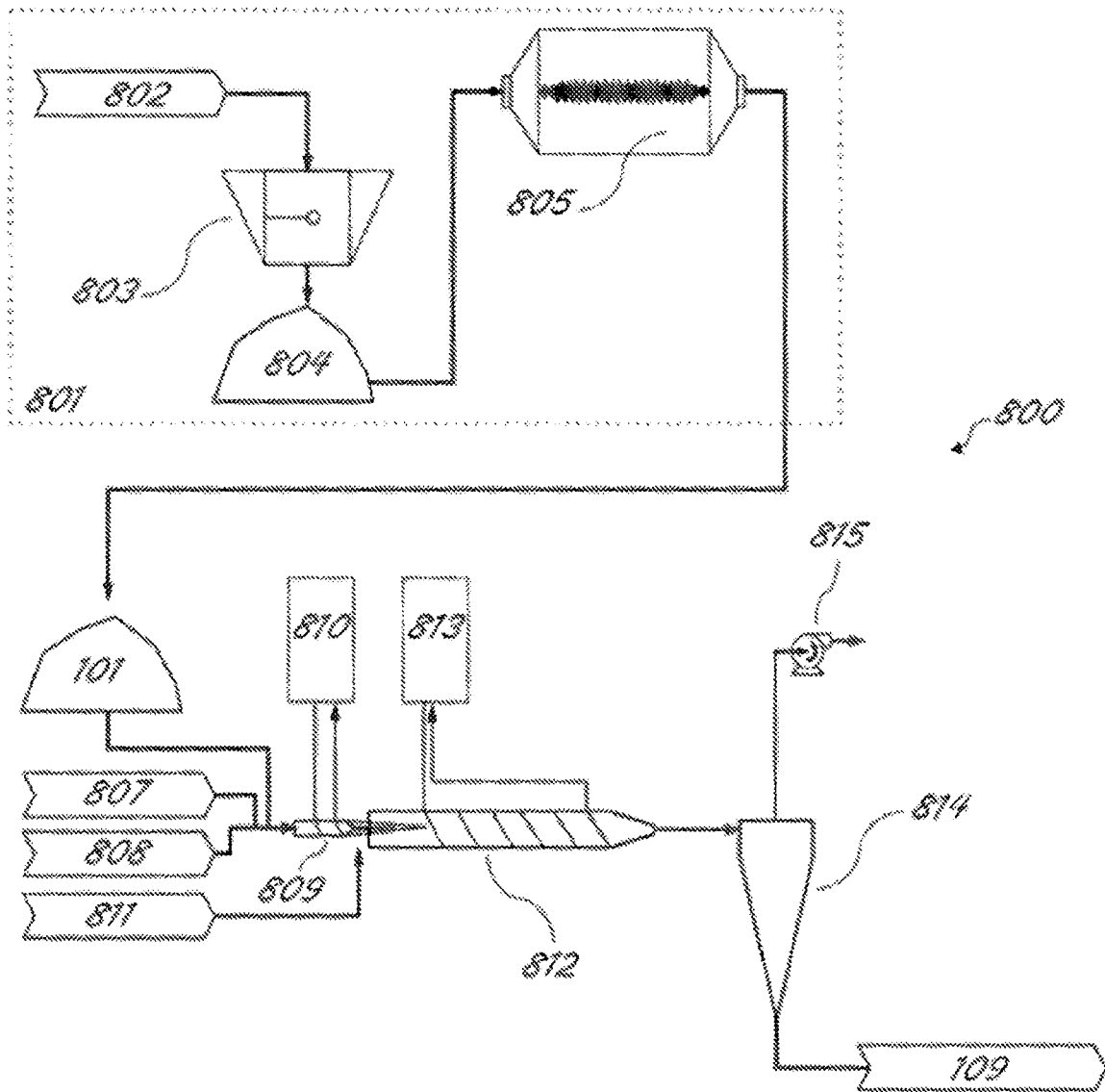


FIG. 8

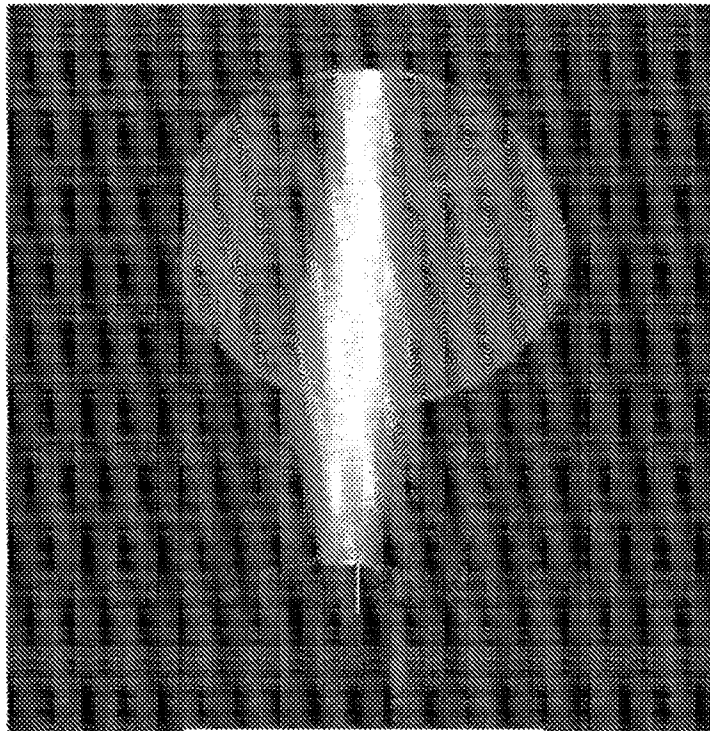


FIG. 9A

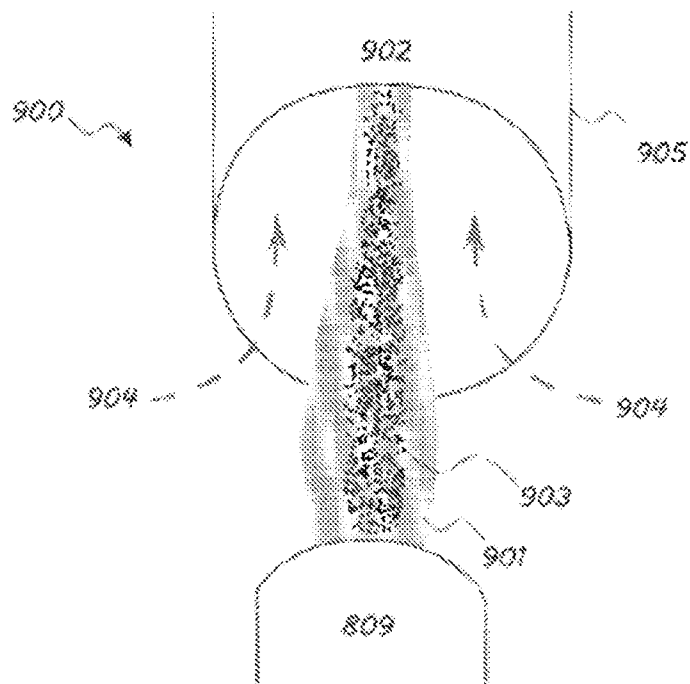


FIG. 9B

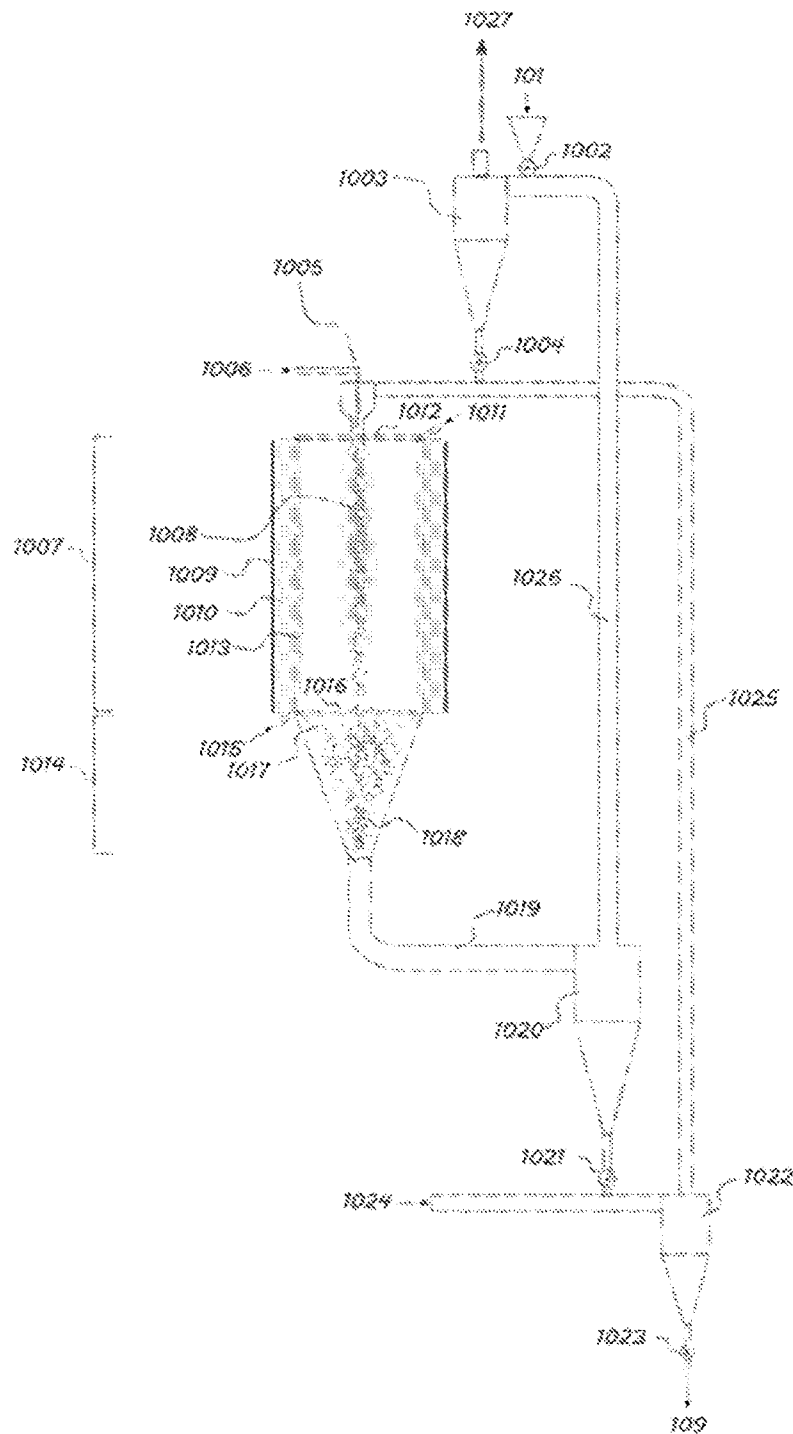


FIG. 10



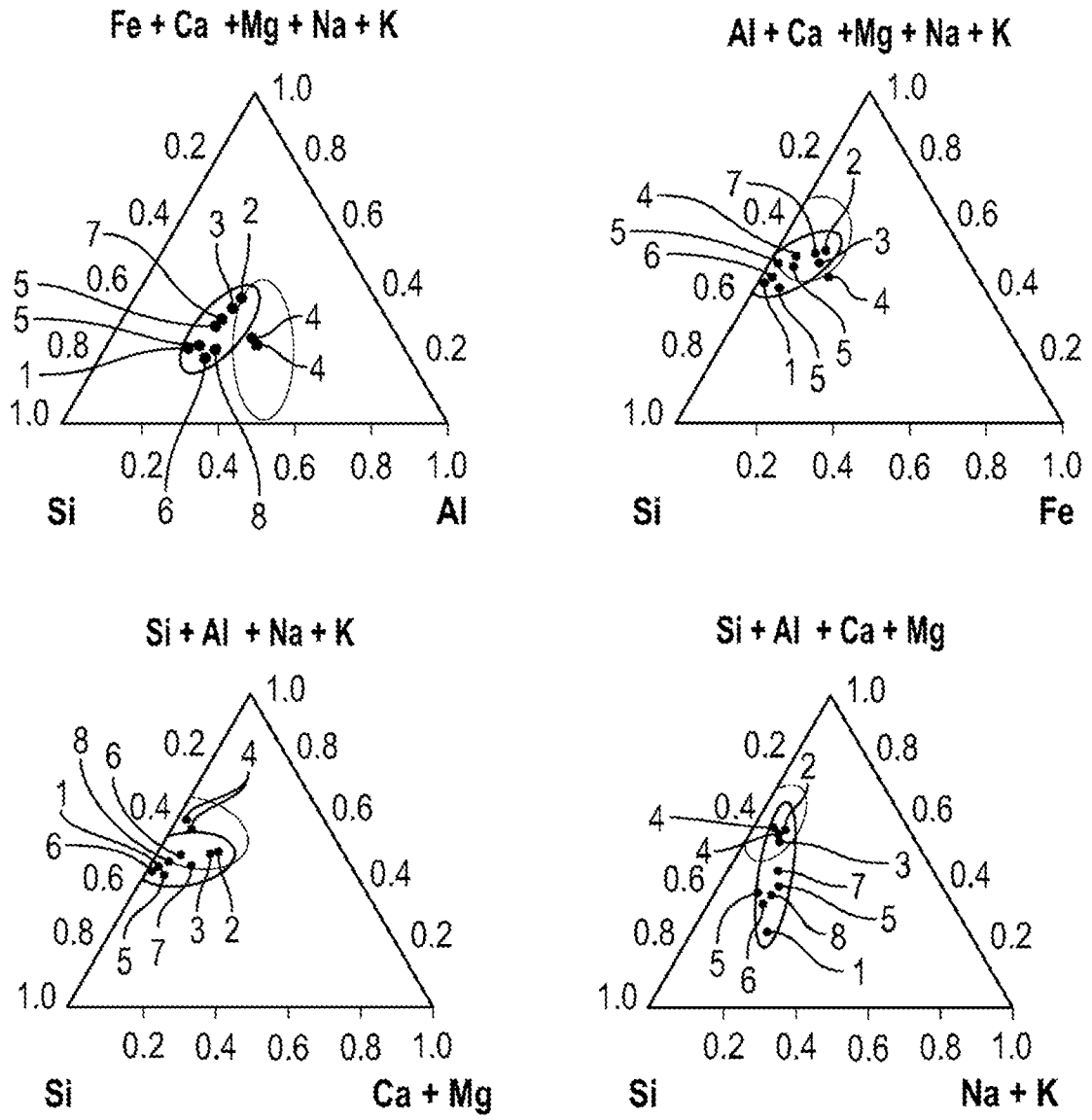


FIG. 12

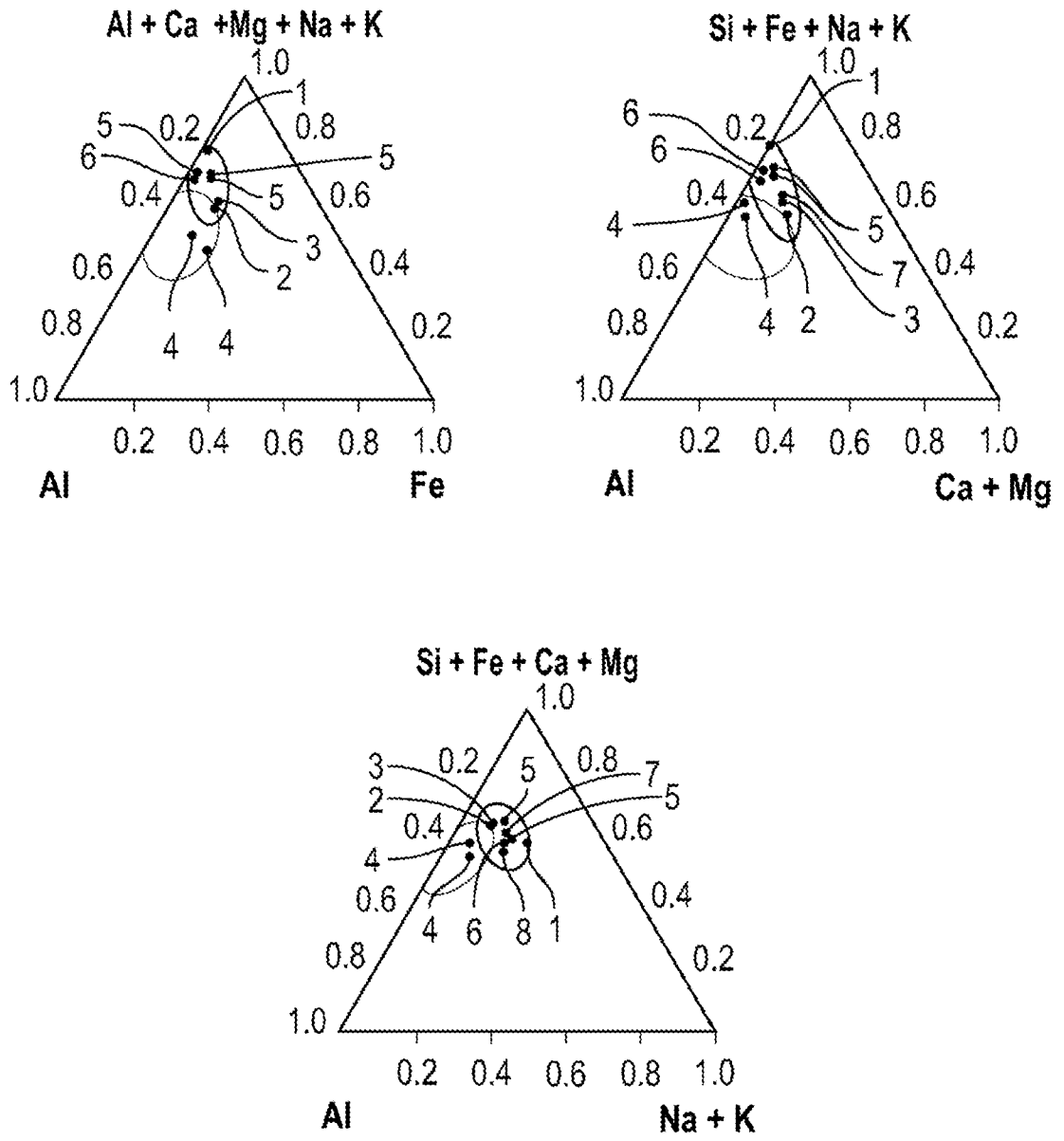


FIG. 13

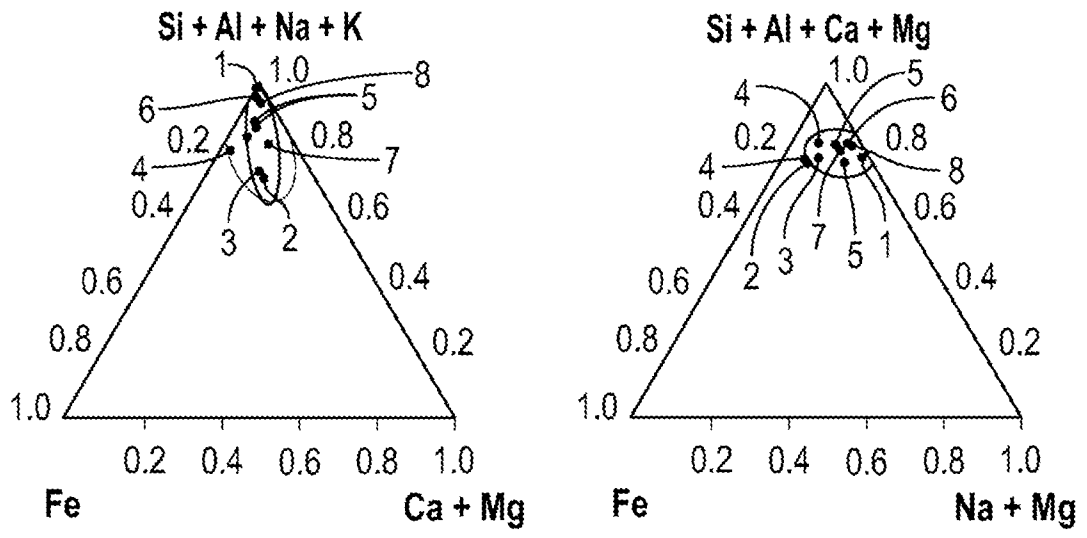


FIG. 14

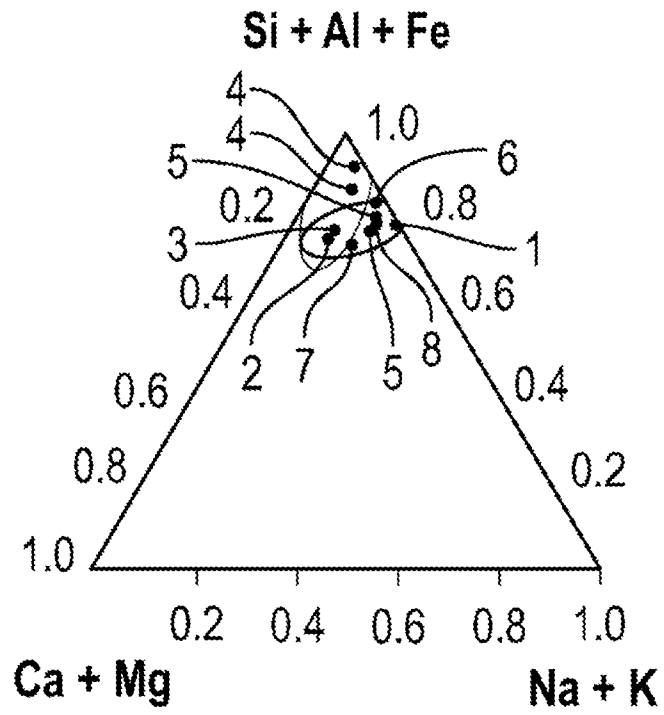
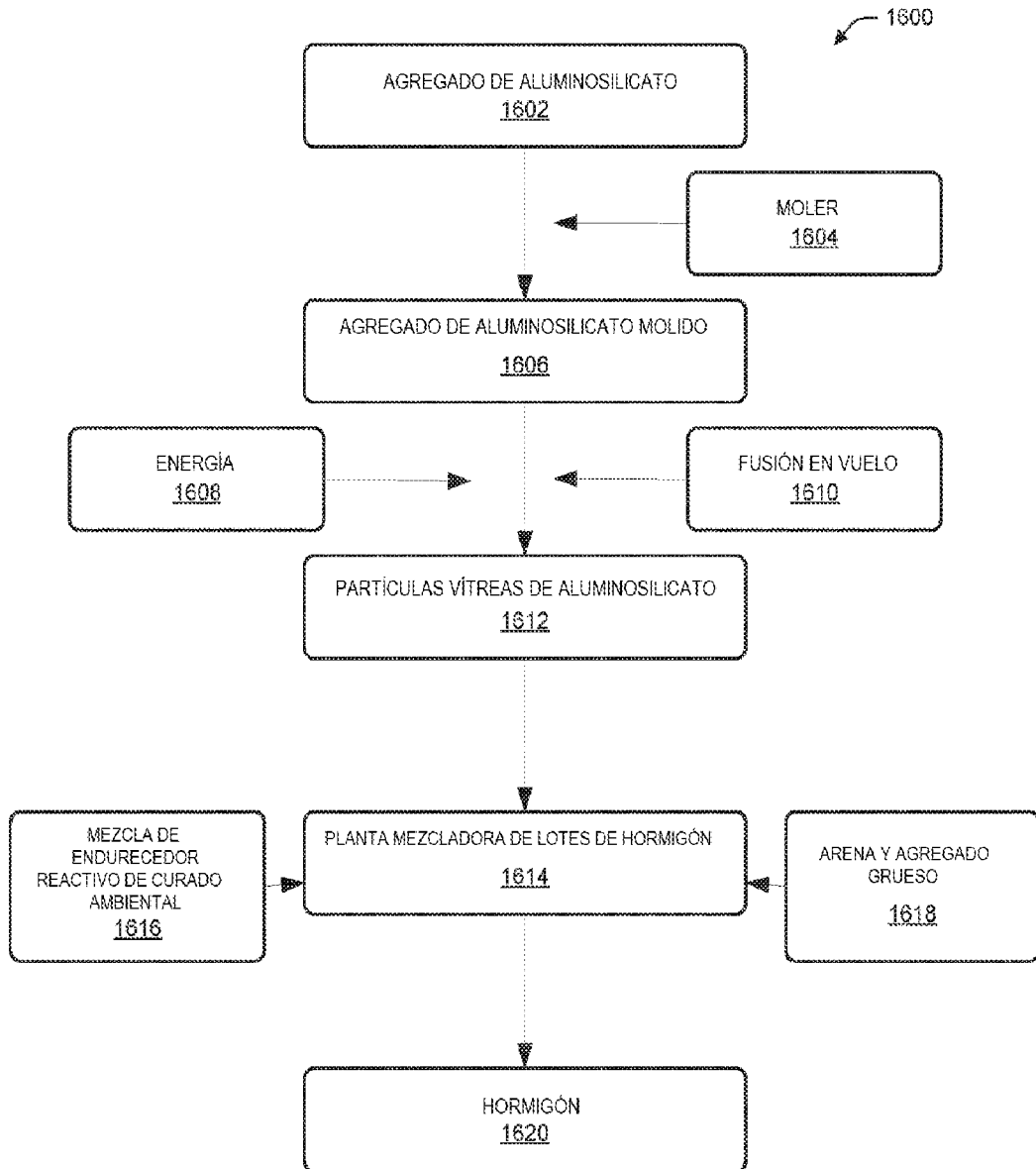


FIG. 15



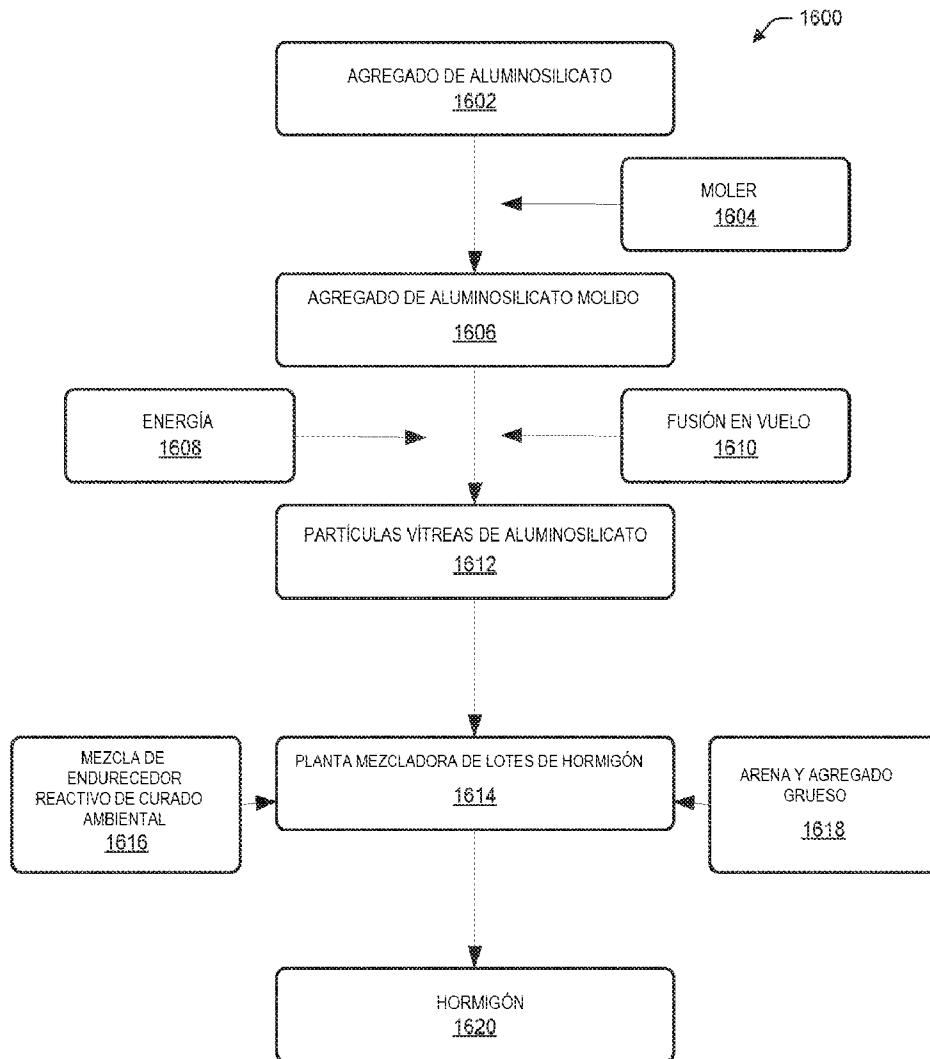


FIG. 16

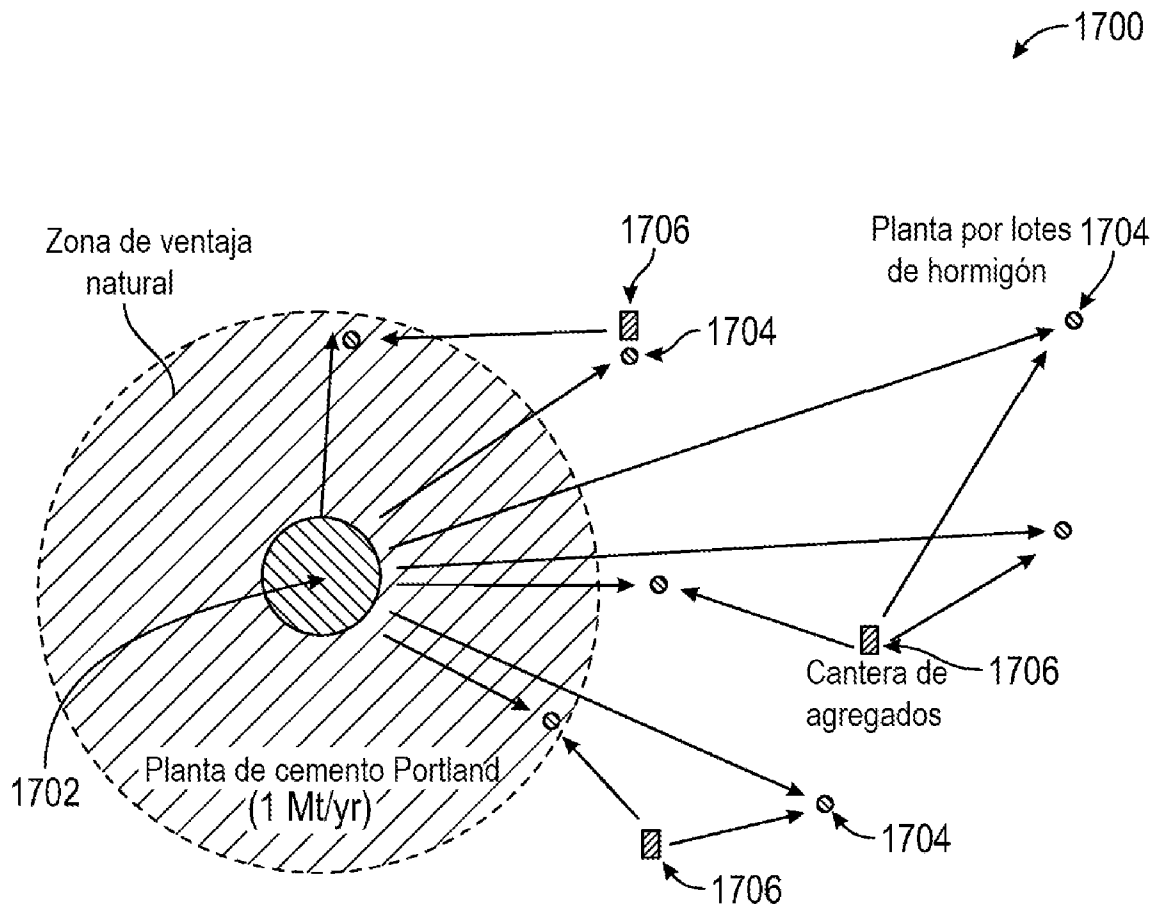


FIG. 17

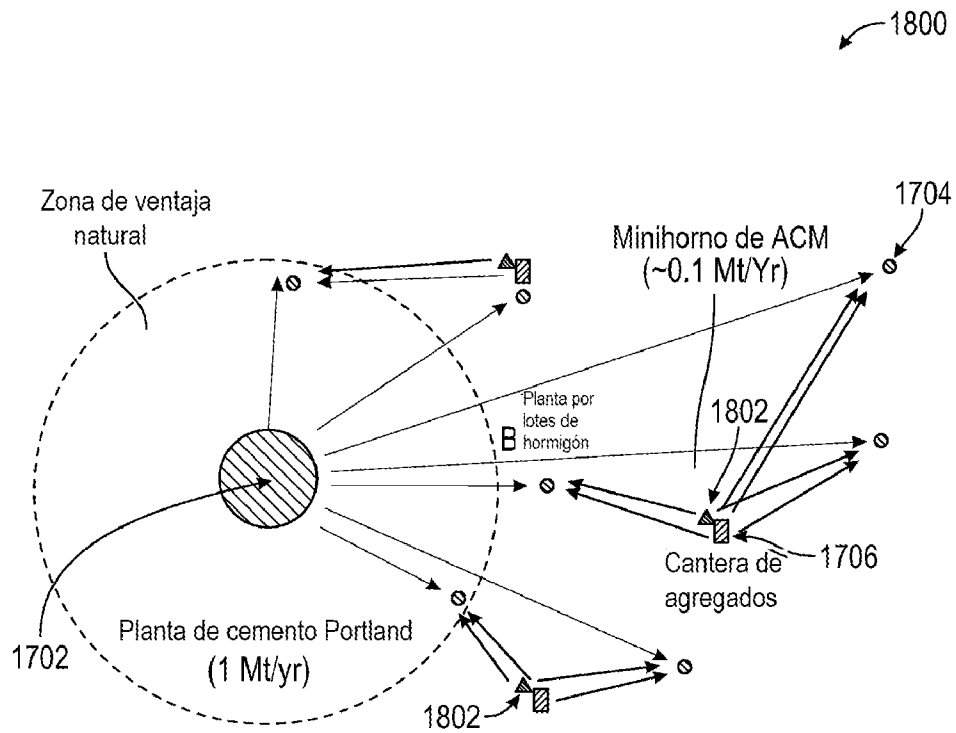


FIG. 18

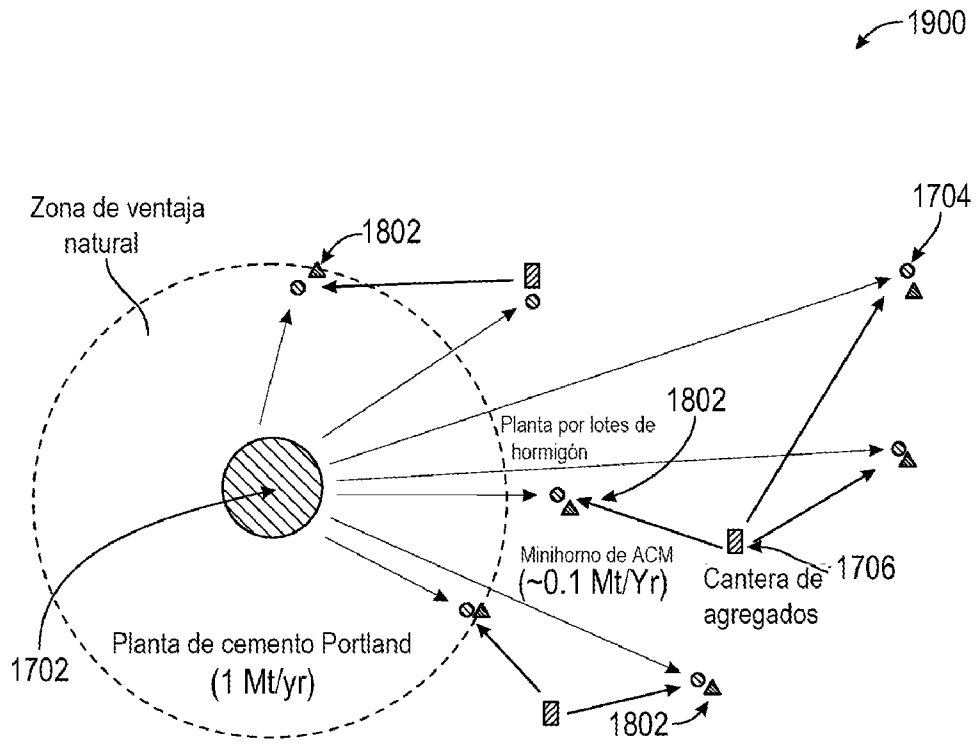


FIG. 19

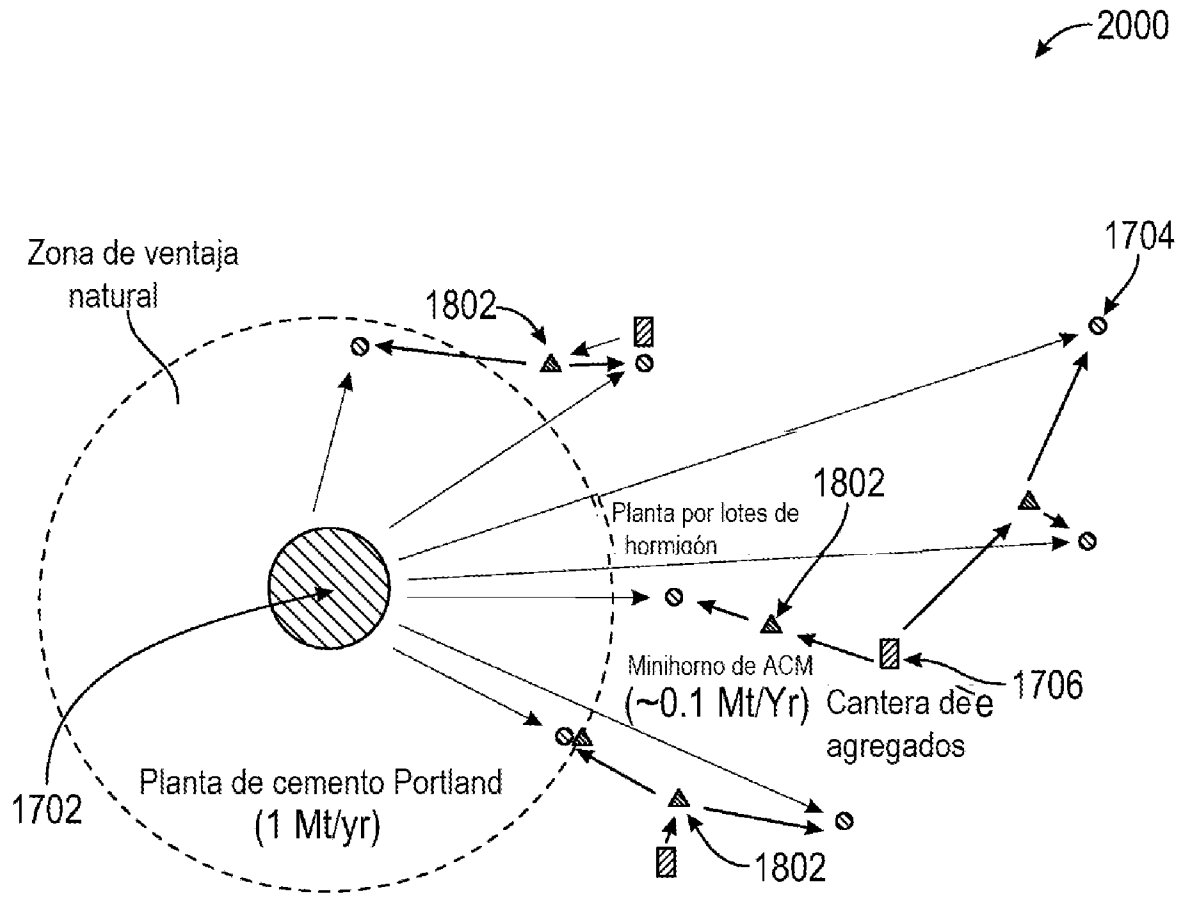


FIG. 20