

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 808 117**

51 Int. Cl.:

C04B 28/08 (2006.01)

C04B 7/147 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.03.2015 PCT/CA2015/000176**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.09.2015 WO15139121**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.03.2015 E 15765421 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.04.2020 EP 3119730**

54 Título: **Método para fabricar productos de construcción unidos por carbonato procedentes de residuos de la fabricación de acero**

30 Prioridad:

21.03.2014 US 201461968991 P

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

25.02.2021

73 Titular/es:

**CARBICRETE INC. (100.0%)
467 Mount Stephen
Westmount, QC H3Y 2X8, CA**

72 Inventor/es:

**SHAO, YIXIN;
MAHOUTIAN, MEHRDAD y
GHOULEH, ZAID**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

Observaciones:

Véase nota informativa (Remarks, Remarques o Bemerkungen) en el folleto original publicado por la Oficina Europea de Patentes

ES 2 808 117 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 para fabricar productos de construcción unidos por carbonato procedentes de residuos de la fabricación de acero

Campo

- 5 La presente descripción se refiere a métodos para fabricar productos y materiales de construcción, y más en particular a productos y materiales de construcción que incluyen escoria de acero.

Antecedentes

- 10 En la industria de la construcción se usan diversos productos, que incluyen los bloques de hormigón. Tales bloques de hormigón están preformados, y están compuestos, entre otros, de un material granular grueso (el agregado o relleno) incrustado en una matriz dura de material (el cemento o aglutinante), que rellena los espacios entre las partículas de agregado y las pega entre sí. El aglutinante que se usa habitualmente es cemento Portland.

- 15 La industria del cemento es un gran productor de dióxido de carbono (CO₂), que se reconoce como un gas de efecto invernadero importante. Por tanto, de manera desventajosa, se producen grandes cantidades de CO₂ en las reacciones químicas que se dan en la fabricación de cemento. El documento WO 2013/060870 A1 describe un método para materiales granulares carbonatados moldeados a presión.

Sumario

Por tanto, sería muy deseable disponer de un sistema o método que aborde al menos parcialmente las desventajas de las tecnologías existentes.

- 20 En la presente memoria se describe, pero no se reivindica, un producto de construcción que comprende un material granular y un aglutinante que incluye escoria de acero.

En la presente memoria se describe, pero no se reivindica, un método para fabricar un producto de construcción. El método comprende proporcionar un material granular y un aglutinante que incluye escoria de acero; combinar el material granular y el aglutinante; y endurecer el material granular y el aglutinante combinados con dióxido de carbono.

- 25 En la presente memoria se describe, pero no se reivindica, un material de construcción que comprende una mezcla de una escoria de acero y un material rico en sílice, y la mezcla se trata mediante calentamiento.

En la presente memoria se describe, pero no se reivindica, un proceso para fabricar un material de construcción, y el proceso comprende: mezclar una escoria de acero y un material rico en sílice; y calentar la mezcla de escoria de acero y material rico en sílice.

- 30 Las realizaciones descritas en la presente memoria según la presente invención proporcionan un método para fabricar un bloque de construcción, y el método comprende

proporcionar un material granular y un aglutinante que incluye escoria de acero;

combinar el material granular y el aglutinante con agua a una primera proporción agua/escoria; compactar el material granular, el aglutinante y el agua combinados a una presión de compactación menor de 20 MPa;

- 35 reducir la cantidad de agua en el material granular, el aglutinante y el agua combinados hasta una segunda proporción agua/escoria que es inferior a la primera proporción agua/escoria;

endurecer dicho material granular, el aglutinante y el agua combinados que tienen dicha segunda proporción agua/escoria con dióxido de carbono.

Según los productos de construcción ejemplares descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el endurecimiento se lleva a cabo con dióxido de carbono.

- 40 Según los productos de construcción y métodos ejemplares para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el producto de construcción está preformado.

Según los productos de construcción y métodos ejemplares para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el producto de construcción es un panel.

- 45 Según la presente invención, en los métodos para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria, el producto de construcción es un bloque de construcción.

Según la presente invención, en el método para fabricar un bloque de construcción descrito en la presente memoria, la escoria de acero comprende al menos una de una escoria de horno de arco eléctrico, una escoria de horno de oxígeno básico y una escoria de cuchara.

Según la presente invención, en el método para fabricar un bloque de construcción descrito en la presente memoria, la escoria de acero tiene un contenido acumulativo de silicato de calcio de al menos alrededor del 20 %p.

Según la presente invención, en el método para fabricar un bloque de construcción descrito en la presente memoria, la escoria de acero tiene una concentración de cal libre menor de alrededor del 7 %p.

- 5 Según la presente invención, en el método para fabricar un bloque de construcción descrito en la presente memoria, la escoria de acero tiene un contenido de dióxido de silicio de al menos alrededor del 6 %p.

Según los productos de construcción y métodos ejemplares para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el material granular comprende un agregado ligero y el aglutinante comprende una escoria de acero.

- 10 Según la presente invención, en el método para fabricar un bloque de construcción descrito en la presente memoria, el agregado ligero se elige de un agregado ligero natural, un agregado de arcilla expandida, un agregado de esquisto expandido, un agregado de escoria expandida, un agregado de escoria de acero expandida y un agregado de escoria de hierro expandida.

- 15 Según los productos de construcción y métodos ejemplares para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el material granular consiste básicamente en un agregado ligero, y el aglutinante consiste básicamente en una escoria de acero.

- 20 Según los métodos ejemplares para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el método además incluye, después de combinar el material granular y el aglutinante, mezclar el material granular y el aglutinante combinados con agua a una primera proporción agua/escoria, y después de mezclarlos con agua, compactar el material granular y el aglutinante combinados y, después de la compactación, reducir la cantidad de agua en el material granular y el aglutinante combinados a una segunda proporción agua/escoria que es inferior a la primera proporción agua/escoria, y en el que el material granular y el aglutinante combinados se endurecen con dióxido de carbono después de reducir la cantidad de agua a la segunda proporción agua/escoria.

- 25 Según la presente invención, en el método para fabricar un bloque de construcción descrito en la presente memoria, reducir la cantidad de agua en el material granular y el aglutinante combinados a la segunda proporción agua/escoria comprende aplicar un flujo de aire al material granular, el aglutinante y el agua combinados.

Según los métodos ejemplares para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la aplicación del flujo de aire incrementa la porosidad del material granular y el aglutinante combinados.

- 30 Según los métodos ejemplares para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la primera proporción agua/escoria es eficaz para formar una superficie lisa del bloque de construcción.

Según los métodos ejemplares para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la segunda proporción agua/escoria es eficaz para incrementar la absorción de dióxido de carbono durante el endurecimiento.

- 35 Según la presente invención, en el método para fabricar un bloque de construcción descrito en la presente memoria, la primera proporción agua/escoria es de al menos alrededor de 0,15 y la segunda proporción agua/escoria es menor de alrededor de 0,12, y preferiblemente al menos alrededor de 0,08.

Según la presente invención, en el método para fabricar un bloque de construcción descrito en la presente memoria, la primera proporción agua/escoria es al menos alrededor de 0,2 y la segunda proporción agua/escoria es menor de alrededor de 0,10.

- 40 Según los métodos ejemplares para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el material granular y el aglutinante combinados se compactan a una presión de al menos alrededor de 10 MPa.

- 45 Según los materiales de construcción ejemplares y los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la escoria de acero comprende una escoria de cuchara generada como subproducto de la fabricación de acero.

Según los materiales de construcción ejemplares y los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el material rico en sílice comprende al menos uno de vidrio y ceniza volante.

- 50 Según los materiales de construcción ejemplares y los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y material rico en sílice consiste básicamente en materiales de desecho y/o reciclados.

Según los materiales de construcción ejemplares y los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el vidrio de desecho comprende un vidrio recogido del reciclaje de lámparas fluorescentes.

5 Según los materiales de construcción ejemplares y los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y vidrio comprende entre alrededor de un 10% de vidrio y alrededor de un 30% de vidrio.

Según los materiales de construcción ejemplares y los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y vidrio comprende alrededor de un 20% de vidrio.

10 Según los materiales de construcción ejemplares y los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y ceniza volante comprende entre alrededor de un 20% de ceniza volante y alrededor de un 40% de ceniza volante.

15 Según los materiales de construcción ejemplares y los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y ceniza volante comprende alrededor de un 30% de ceniza volante.

Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y vidrio se calienta a una temperatura de al menos alrededor de 700 °C.

Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y vidrio se calienta a una temperatura de alrededor de 1100 °C.

20 Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y ceniza volante se calienta a una temperatura de al menos 800 °C.

Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y ceniza volante se calienta a una temperatura de alrededor de 1250 °C.

25 Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y ceniza volante se calienta a la temperatura a una velocidad de alrededor de 5 °C/minuto, seguido de calentamiento de la mezcla de escoria y ceniza volante a la temperatura durante un intervalo de tiempo de al menos alrededor de 30 minutos.

30 Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y material rico en sílice se calienta a una temperatura de entre alrededor de 700 °C y alrededor de 1400 °C.

Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla de escoria y vidrio se calienta a la temperatura a una velocidad de alrededor de 5 °C/minuto, seguido de calentamiento de la mezcla de escoria y vidrio a la temperatura durante un intervalo de tiempo de al menos alrededor de 30 minutos.

35 Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, la mezcla se compacta en un molde a una presión de entre alrededor de 40 MPa y alrededor de 60 MPa.

40 Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el método incluye además compactar la mezcla de escoria y material rico en sílice antes de calentar la mezcla.

Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el método incluye además enfriar la mezcla de escoria y material rico en sílice después del calentamiento.

45 Según los procesos ejemplares para fabricar los materiales de construcción descritos en la presente memoria, pero no reivindicados, el método incluye además moler la mezcla de escoria y material rico en sílice después de enfriarla, y de ese modo se forma un material cementoso.

Dibujos

50 Para una mejor comprensión de las realizaciones descritas en la presente memoria y para mostrar más claramente cómo se pueden poner en práctica, a continuación se hará referencia, a modo de ejemplo solamente, a los dibujos adjuntos que muestran al menos una realización ejemplar, y en los que:

- la Figura 1 es un diagrama de flujo de las etapas de un método para fabricar un producto de construcción a partir de escoria de acero;
- la Figura 2 es una representación esquemática de una etapa de carbonatación;
- 5 la Figura 3 es un diagrama de flujo de las etapas de un método para fabricar un bloque de construcción según una realización ejemplar;
- la Figura 4 es un diagrama de flujo de las etapas de un método para fabricar un material de construcción a partir de escoria de acero;
- La Figura 5 es un gráfico esquemático que muestra la resistencia a la compresión en seco y en húmedo de bloques unidos por escoria de acuerdo con una realización ejemplar;
- 10 la Figura 6 son fotografías de bloques unidos por escoria, de acuerdo con una realización ejemplar, y de bloques de cemento comerciales, tras 20 ciclos de congelación y descongelación;
- la Figura 7 es un gráfico esquemático que muestra la pérdida de masa en el ensayo de congelación y descongelación para bloques unidos por escoria y bloques comerciales, de acuerdo con una realización ejemplar;
- 15 la Figura 8 es un gráfico esquemático que muestra el efecto de la proporción serrín/escoria sobre la absorción de carbono y la resistencia de la escoria carbonatada;
- la Figura 9 es una fotografía de un panel de serrín unido por escoria de acero;
- la Figura 10 es un gráfico esquemático que muestra la absorción de agua de paneles de serrín unidos por escoria debido a la capilaridad; y
- 20 la Figura 11 es un gráfico esquemático que muestra las propiedades mecánicas de placas de escoria de KOBM en seco y en húmedo;
- la Figura 12 es un gráfico de curvas de masa de polvos compactos de escoria de cuchara sometidos a una carbonatación de 24 horas según una realización ejemplar;
- la Figura 13 es una fotografía que muestra el patrón de agrietamiento de un polvo compacto de escoria;
- 25 la Figura 14 es un gráfico que muestra los patrones de XRD de escorias de cuchara tal como se reciben según una realización ejemplar;
- la Figura 15 es un gráfico que muestra el análisis termogravimétrico y el análisis termogravimétrico diferencial para escorias de cuchara tal como se reciben según una realización ejemplar;
- 30 la Figura 16 es un gráfico que muestra los patrones de XRD de polvos compactos de escoria de cuchara carbonatados;
- la Figura 17 es un gráfico que muestra el análisis termogravimétrico y el análisis termogravimétrico diferencial para polvos compactos de escoria de cuchara hidratados y carbonatados;
- la Figura 18 es un diagrama esquemático del diagrama ejemplar de fases cristalinas primarias del $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$;
- 35 la Figura 19 es un gráfico que muestra los patrones de XRD de polvos compactos de escoria de cuchara tratados;
- la Figura 20 es un gráfico que muestra el análisis termogravimétrico y el análisis termogravimétrico diferencial para una escoria de cuchara tratada según una realización ejemplar;
- 40 la Figura 21 es un gráfico que muestra los patrones de XRD de una escoria tal como se recibe y del cemento sintetizado;
- la Figura 22 es un gráfico que muestra el análisis termogravimétrico y el análisis termogravimétrico diferencial de una escoria tal como se recibe (L3) y del cemento sintetizado (T1100);
- la Figura 23 es un gráfico que muestra la resistencia a la compresión de pastas de cemento sintetizados sometido a hidratación;
- 45 la Figura 24 es un gráfico que muestra el análisis termogravimétrico y el análisis termogravimétrico diferencial de pastas de cemento sintetizado sometido a carbonatación e hidratación;

la Figura 25 es un gráfico que muestra los patrones de XRD de pastas de cemento sintetizado sometido a carbonatación e hidratación;

la Figura 26 es un gráfico que muestra la resistencia a la compresión para diferentes porcentajes de ceniza volante de un cemento producido;

5 la Figura 27 es un gráfico que muestra los patrones de XRD para una escoria de cuchara y el producto de cemento producido;

la Figura 28 es un gráfico que muestra el análisis termogravimétrico y el análisis termogravimétrico diferencial para una escoria de cuchara y el producto de cemento producido;

10 la Figura 29 es un gráfico que muestra la resistencia a la compresión para diferentes duraciones de hidratación;

la Figura 30 es un gráfico que muestra el análisis termogravimétrico y el análisis termogravimétrico diferencial para muestras sometidas a diferentes duraciones de carbonatación e hidratación; y

la Figura 31 es un gráfico que muestra los patrones de XRD para muestras sometidas a diferentes duraciones de carbonatación e hidratación.

15 Descripción de diversas realizaciones

Se apreciará que, por simplicidad y claridad de ilustración, cuando se considere adecuado, los números de referencia se pueden repetir entre las figuras para indicar elementos o etapas correspondientes o análogas. Además, se exponen numerosos detalles específicos para proporcionar una comprensión exhaustiva de las realizaciones ejemplares descritas en la presente memoria. Sin embargo, las personas de experiencia habitual en la técnica entenderán que las realizaciones descritas en la presente memoria se pueden poner en práctica sin estos detalles específicos. En otros casos, no se han descrito con detalle métodos, procedimientos y componentes muy conocidos, para no complicar las realizaciones descritas en la presente memoria. Además, esta descripción no se debe considerar limitante del alcance de las realizaciones descritas en la presente memoria de ninguna manera, sino simplemente descriptiva de la puesta en práctica de las diversas realizaciones descritas en la presente memoria.

25 La palabra "un" o "una", cuando se usa junto con la expresión "que comprende" en las reivindicaciones y/o en la memoria descriptiva puede significar "uno", pero también es coherente con el significado de "uno o más", "al menos uno", y "uno o más de uno", a menos que el contenido lo dicte claramente de otra manera. De forma similar, la palabra "otro" puede significar al menos un segundo o más, a menos que el contenido lo dicte claramente de otra manera.

30 Tal como se usan en esta memoria descriptiva y en la(s) reivindicación(es), las expresiones "que comprende" (y cualquier forma de comprender, tal como "comprenden" y "comprende"), "que tiene" (y cualquier forma de tener, tal como "tienen" y "tiene"), "que incluye" (y cualquier forma de incluir, tal como "incluyen" e "incluye") o "que contiene" (y cualquier forma de contener, tal como "contienen" y "contiene"), son inclusivas o abiertas, y no excluyen elementos o etapas de proceso adicionales no mencionadas.

35 Tal como se usa en esta memoria descriptiva y en la(s) reivindicación(es), la expresión "que consiste", y sus derivados, pretenden ser términos cerrados, que especifican la presencia de las características, elementos, componentes, grupos, números enteros, y/o etapas indicadas, y también excluyen la presencia de otras características, elementos, componentes, grupos, números enteros y/o etapas no indicadas.

40 La expresión "que consiste básicamente en", tal como se usa en la presente memoria, pretende especificar la presencia de las características, elementos, componentes, grupos, números enteros, y/o etapas indicadas, así como aquellas que no afectan materialmente a la(s) característica(s) básica(s) y nueva(s) de estas características, elementos, componentes, grupos, números enteros, y/o etapas.

45 Las expresiones "alrededor de", "sustancialmente" y "aproximadamente", tal como se usan en la presente memoria, significan una cantidad razonable de desviación de la expresión modificada, de forma que el resultado final no cambia significativamente. Se debería considerar que estas expresiones de grado incluyen una desviación de al menos $\pm 10\%$ de la expresión modificada, si esta desviación no invalida el significado de la expresión que modifica.

50 "Escoria de acero" se refiere en la presente memoria al subproducto de escoria producido a partir de la fabricación de acero. La escoria de acero puede incluir una escoria producida en hornos de oxígeno básico (BOF). La escoria de acero también puede incluir una escoria producida en hornos de arco eléctrico (EAF). La escoria de acero, tal como se usa en la presente memoria, puede incluir además una escoria de cuchara. Se entenderá que la "escoria de acero", tal como se usa en la presente memoria, excluye la escoria de hierro y la escoria de alto horno que se generan en general durante la producción de hierro, y que se puede usar en la fabricación de cemento, tal como la escoria puzolánica.

La "escoria de cuchara" se refiere en la presente memoria a un tipo de escoria de acero. La escoria de cuchara se produce como subproducto de una operación de refinado en cuchara. En los diversos procesos de fabricación de

acero, el acero fundido producido en un proceso EAF o BOF se somete a procesos de refinado adicionales basándose en la calidad del acero deseado. Se añaden fundentes y aleaciones adicionales a una cuchara para eliminar las impurezas del acero y producir un acero con las propiedades deseadas. La reacción tiene lugar en presencia de una escoria en la que los óxidos más significativos son SiO₂, Al₂O₃, CaO, y MgO. Esta operación se conoce como refinado en cuchara, debido a que se ejecuta en la cuchara de transferencia. Durante este proceso se generan escorias de acero adicionales, que son escorias de cuchara. Se ha observado que las composiciones químicas de la escoria de cuchara que están asociadas al grado del acero producido son muy variables y diferentes de las composiciones químicas de las escorias de acero de BOF y EAF. Se ha observado que la escoria de cuchara muestra un contenido mayor de óxido de aluminio y un contenido menor de óxido de hierro en comparación con las escorias de acero de BOF y EAF. En general, las escorias de cuchara exhiben una proporción óxido de calcio/óxido de sílice de alrededor de 2.

La "escoria EBH" se refiere en la presente memoria a un híbrido de EAF-BOF, que es un tipo de escoria de acero formada de una mezcla de escorias producidas en EAF y BOF.

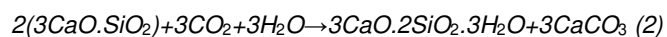
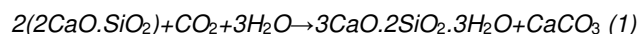
Se entenderá que, con respecto a la finura, un grado mayor de finura indica un estado más fino (es decir, tamaños más pequeños) y un grado menor de finura indica un estado menos fino (es decir, tamaños más grandes). Por ejemplo, para la finura tal como se mide mediante el número de finura de Blaine, un mayor número de finura de Blaine indica un estado más fino y un menor número de finura de Blaine indica un estado menos fino.

Las acerías producen alrededor de 130 millones de toneladas de escoria en todo el mundo. Las escorias de horno de arco eléctrico (EAF), de horno de oxígeno básico (BOF) y las escorias de cuchara son los tipos principales de escorias de acero producidas en el proceso de fabricación de acero. En la actualidad, los subproductos de la fabricación de acero se comercializan principalmente como agregados para la construcción, lo que incluye su uso en el pavimento de asfalto, la construcción de firmes de carreteras, y el hormigón.

Aunque la escoria de acero es rica en calcio, el uso de la escoria de acero como material de cementación no es habitual. La escoria de acero no es un material ni hidráulico ni puzolánico, ya que carece de un compuesto de silicato tricálcico y del contenido de dióxido de silicio (SiO₂) amorfo. El comportamiento hidráulico de la escoria de acero se puede modificar mediante un tratamiento a temperatura elevada para que sirva como material cementoso para una mezcla de cemento. El tratamiento térmico, seguido de un proceso de enfriamiento adecuado, genera fases que mejoran las propiedades hidráulicas de la escoria. La adición de hasta un 20% de escoria de acero tratada térmicamente a cemento Portland puede proporcionar un hormigón de una resistencia equivalente al cemento base.

Debido a su contenido elevado de calcio, la escoria de acero puede reaccionar con dióxido de carbono (CO₂). La capacidad elevada de la escoria de reaccionar con CO₂ se aprovechó recientemente para la carbonatación mineral mediante el uso de la escoria de acero como materia prima para fijar dióxido de carbono y reducir las emisiones de carbono. Para la fijación de dióxido de carbono, la reacción se lleva a cabo en general en un reactor de alta presión y alta temperatura con un polvo finamente molido (<38 micras). Basándose en la masa de la escoria, la absorción de carbono por la escoria de acero podría alcanzar hasta un 75% de la capacidad de absorción teórica.

Se obtiene otro beneficio de activar la escoria de acero para servir como aglutinante en lugar de cemento Portland para fabricar productos de construcción. La escoria de acero contiene silicatos de calcio que se pueden convertir en hidratos de silicato de calcio y carbonatos de calcio que contribuyen a la resistencia tras la exposición a dióxido de carbono. Las reacciones del silicato dicálcico (C₂S) y silicato tricálcico (C₃S) con CO₂ se describen respectivamente mediante las siguientes Ecuaciones (1) y (2):



Mientras se han llevado a cabo varios estudios sobre la escoria de acero para el uso como aditivo para cemento Portland o como materia prima en la carbonatación mineral, los estudios que se enfocaron en el desarrollo de resistencia a la compresión en la escoria de acero como único aglutinante de cemento son escasos, aunque el aumento de la resistencia activada por la carbonatación es de sumo interés. Isoo et al. (2000) informó que un bloque de escoria de 1 m³ alcanzó una resistencia a la compresión de 18,4 MPa después de 12 días de carbonatación para una aplicación de lecho de algas. Los polvos compactos de escoria de acero inoxidable expuestos a dióxido de carbono durante una hora alcanzaron una resistencia a la compresión de 9 MPa y una absorción de dióxido de carbono del 18%. Mediante la sustitución del cemento Portland por escoria de acero en los productos de construcción, se reduce significativamente el consumo de energía y de recursos naturales. Además, como la carbonatación de la escoria es un proceso de absorción de CO₂, se puede fijar dióxido de carbono por medio de la precipitación mineral en los productos de escoria, lo que da como resultado una reducción del CO₂ emitido a la atmósfera. Por ejemplo, el CO₂ gaseoso se convierte en un producto carbonáceo.

Con respecto a la Figura 1, en ella se ilustra un diagrama de flujo de las etapas de un método ejemplar 100 para fabricar un producto de construcción a partir de escoria de acero.

- Se recibe una escoria de acero producida como subproducto de un proceso de fabricación de acero. La escoria de acero puede incluir una mezcla de fragmentos gruesos de escoria y fragmentos finos de escoria. Los fragmentos gruesos de escoria pueden tener una finura menor de alrededor de 150 m²/kg, y los fragmentos finos de escoria pueden tener una finura mayor de alrededor de 150 m²/kg. Los fragmentos gruesos de escoria, los fragmentos finos de escoria, o ambos se pueden haber enviado a vertederos como resultado de un proceso típico de fabricación de acero.
- En la etapa 108, la escoria de acero recibida se puede refinar opcionalmente. Se puede llevar a cabo el refinado de la escoria recibida cuando el subproducto recibido de escoria de acero no está inmediatamente listo para el uso para fabricar el producto de construcción.
- El refinado de la escoria de acero puede incluir filtrar la escoria de acero recibida para separar los fragmentos finos de escoria de los fragmentos gruesos de escoria.
- De manera alternativa o adicional, el refinado de la escoria de acero recibida también puede incluir pulverizar la escoria de acero hasta un polvo fino. En ciertas realizaciones ejemplares, los fragmentos finos filtrados se pulverizan mientras los fragmentos más gruesos no se pulverizan. Por ejemplo, para la escoria de acero de EAF, la escoria se puede pulverizar hasta una finura de Blaine de al menos 150 m²/kg, y preferiblemente alrededor de 178 m²/kg. Por ejemplo, para la escoria de acero de EBH, la escoria se puede pulverizar hasta una finura de Blaine de al menos 200 m²/kg, y preferiblemente alrededor de 240 m²/kg. En otras realizaciones ejemplares, la escoria de acero se puede pulverizar hasta un tamaño más fino.
- En la etapa 116, la escoria de acero se combina con un material de relleno. La escoria de acero refinada puede ser más fina que el material de relleno. Por lo tanto, el material de relleno es un material granular, mientras la escoria de acero refinada actúa como aglutinante. La escoria de acero y el material granular combinados se mezclan además con una cantidad de agua. El material granular puede tener ya cierto contenido de agua. Se puede introducir agua adicional. La cantidad de agua mezclada con la escoria de acero y el material granular combinados puede variar dependiendo del tipo de material granular y del producto de construcción a fabricar.
- La cantidad de agua se puede caracterizar mediante una proporción agua/escoria de acero. Se entenderá que la proporción agua/escoria se refiere a la proporción del contenido de agua respecto del contenido de escoria que se usa como aglutinante. Es decir, la proporción agua/escoria no tiene en cuenta el uso de escoria adicional, tal como la escoria que se usa como material agregado. Por ejemplo, la proporción agua/escoria de la mezcla inicial de escoria de acero, material granular y agua puede ser de alrededor de 0,10, alrededor de 0,12, alrededor de 0,15, alrededor de 0,20, o alrededor de 0,25.
- La escoria de acero se puede proporcionar en la mezcla de escoria de acero, material granular y agua de forma que la escoria de acero constituya al menos un 30% de la masa total de la mezcla. En otras realizaciones ejemplares, la escoria de acero se puede proporcionar para constituir al menos alrededor del 40%, al menos alrededor del 50% o al menos alrededor del 60% de la masa total de la mezcla. Se entenderá que la cantidad de escoria de acero también puede corresponder a un porcentaje de la masa total del producto de construcción. La pérdida de masa debida a la evaporación y/o reacción se compensa sustancialmente por la absorción de CO₂, de forma que en diversas realizaciones ejemplares la masa total de la mezcla es aproximadamente la misma que la masa del producto de construcción.
- En la etapa 120, la mezcla de escoria de acero y de material granular se puede moldear o preformar. El moldeo también puede incluir compactar la mezcla de escoria de acero y material granular. Se puede aplicar el moldeo y la compactación para conseguir la forma y dimensiones deseadas del producto de construcción. La cantidad de presión aplicada en la compactación puede variar dependiendo del tipo de material granular y del producto de construcción a fabricar. Por ejemplo, la cantidad de presión puede ser de entre 5 MPa y 20 MPa, y preferiblemente alrededor de 12 MPa. Se observó que una cantidad mayor de presión puede contribuir a una resistencia a la compresión mayor del producto de construcción, pero dio como resultado una absorción de carbono menor, y de ese modo también se limita la resistencia a la compresión conseguida. Por lo tanto, se aplica una cantidad de presión menor de alrededor de 20 MPa para permitir una absorción satisfactoria de carbono.
- En la etapa 128, la mezcla moldeada y compactada de escoria de acero y material granular se endurece con dióxido de carbono. El endurecimiento provoca la activación de la mezcla, y también da como resultado la fijación del dióxido de carbono en la mezcla.
- Con respecto a la Figura 2, en ella se ilustra una representación esquemática de un sistema de carbonatación ejemplar 200. La mezcla de escoria de acero y material granular en forma de muestras 204 a endurecer se coloca en una cámara de endurecimiento 208. Una fuente de gas CO₂ 216 se calienta mediante un calentador 224 a temperatura ambiente y se inyecta en la cámara 208 a presión. La presión se regula mediante un regulador 232. El regulador también mantiene una presión constante y asegura que el dióxido de carbono consumido por la mezcla de escoria de acero y material granular se reponga continuamente. También se puede proporcionar una balanza 240 y un registrador de datos 248 para calcular la absorción de dióxido de carbono.

- La fuente de gas CO₂ 216 puede ser CO₂ sustancialmente puro, tal como gas CO₂ al 99,5%. Sin embargo, se entenderá que, en otras realizaciones ejemplares, se puede usar un gas que tiene una concentración inferior de CO₂. Por ejemplo, se puede usar un gas que tiene una concentración de al menos un 90% de gas CO₂ para el endurecimiento. Por ejemplo, se puede usar un gas que tiene una concentración de al menos un 80% de gas CO₂ para el endurecimiento.
- 5 Por ejemplo, se puede usar un gas que tiene una concentración de al menos un 50% de gas CO₂ para el endurecimiento. En otras realizaciones, el gas puede ser un gas de chimenea producido como subproducto de la fabricación de acero.
- Según diversas realizaciones ejemplares, la mezcla de escoria de acero y material granular se endurece con dióxido de carbono durante al menos alrededor de 2 horas. La mezcla se puede endurecer con dióxido de carbono durante
- 10 menos de alrededor de 36 horas.
- La mezcla de escoria de acero y material granular se puede endurecer con CO₂ durante un periodo de al menos alrededor de 2 horas. Se observó que la absorción de carbono se da en las primeras 2 horas aproximadamente, pero continúa incrementándose después. Según ciertas realizaciones ejemplares, la mezcla de escoria de acero y material granular se puede endurecer con CO₂ durante un periodo de al menos alrededor de 6 horas, al menos alrededor de
- 15 12 horas o al menos alrededor de 24 horas.
- Con respecto de nuevo a la Figura 1, el método 100 opcionalmente puede incluir además hidratar la mezcla de escoria de acero y material granular en la etapa 132. Por ejemplo, la mezcla de escoria de acero y material granular se coloca en un medio de hidratación sellado durante una cantidad predeterminada de tiempo después del endurecimiento. La longitud de la hidratación puede variar dependiendo del producto de construcción a fabricar.
- 20 Por ejemplo, la mezcla se puede hidratar durante al menos 2 días.
- Por ejemplo, la mezcla se puede hidratar durante al menos alrededor de 7 días.
- Por ejemplo, la mezcla se puede hidratar durante al menos alrededor de 14 días.
- Por ejemplo, la mezcla se puede hidratar durante alrededor de 35 días.
- El producto de construcción formado según los métodos ejemplares descritos en la presente memoria puede incluir una escoria de acero de un horno de arco eléctrico, una escoria de acero de un horno de oxígeno básico o una mezcla de las mismas.
- 25 Se observó que ciertos tipos de escoria de acero pueden ser útiles tal como se reciben para fabricar un producto de construcción. La escoria de acero "tal como se recibe" se refiere a la escoria de acero en el estado en el que se recibe como subproducto de un proceso de fabricación de acero. Se entenderá que puede ser necesario cierto refinado de la escoria de acero, pero no es necesario un tratamiento adicional, tal como un tratamiento térmico, para hacer que la escoria de acero tal como se recibe sea inmediatamente útil para fabricar los productos de construcción.
- 30 Por ejemplo, la escoria de acero tal como se recibe usada para fabricar el producto de construcción tiene un contenido de cal libre menor de alrededor del 10,8% en la composición química. Por lo tanto, el método para fabricar el producto de construcción se puede llevar a cabo sin (es decir, sin requerir) un tratamiento térmico de la escoria de acero.
- 35 Por ejemplo, la escoria de acero tal como se recibe usada para fabricar el producto de construcción tiene un contenido de cal libre menor de alrededor del 7,2% en la composición química. Por lo tanto, el método para fabricar el producto de construcción se puede llevar a cabo sin (es decir, sin requerir) un tratamiento térmico de la escoria de acero.
- Por ejemplo, la escoria de acero tal como se recibe usada para fabricar el producto de construcción tiene un contenido acumulativo de silicato de calcio (ex: concentración de fases de C₂S +C₃S) de al menos alrededor del 15%. Por lo tanto, el método para fabricar el producto de construcción se puede llevar a cabo sin (es decir, sin requerir) un
- 40 tratamiento térmico de la escoria de acero.
- Por ejemplo, la escoria de acero tal como se recibe usada para fabricar el producto de construcción tiene un contenido acumulativo de silicato de calcio (ex: concentración de fases de C₂S +C₃S) de al menos alrededor del 23,3%. Por lo tanto, el método para fabricar el producto de construcción se puede llevar a cabo sin (es decir, sin requerir) un
- 45 tratamiento térmico de la escoria de acero.
- Por ejemplo, la escoria de acero tal como se recibe usada para fabricar el producto de construcción tiene un contenido acumulativo de silicato de calcio (ex: concentración de fases de C₂S +C₃S) de al menos alrededor del 30%. Por lo tanto, el método para fabricar el producto de construcción se puede llevar a cabo sin (es decir, sin requerir) un
- 50 tratamiento térmico de la escoria de acero.

Por ejemplo, la escoria de acero tal como se recibe usada para fabricar el producto de construcción tiene un contenido de SiO₂ de al menos alrededor del 6%. Por lo tanto, el método para fabricar el producto de construcción se puede llevar a cabo sin (es decir, sin requerir) un tratamiento térmico de la escoria de acero.

5 Por ejemplo, la escoria de acero tal como se recibe usada para fabricar el producto de construcción tiene un contenido de SiO₂ de al menos alrededor del 12,4%. Por lo tanto, el método para fabricar el producto de construcción se puede llevar a cabo sin (es decir, sin requerir) un tratamiento térmico de la escoria de acero.

En otras realizaciones ejemplares, el producto de construcción se puede fabricar con una escoria de acero que se pretrata, tal como mezclándola con un material rico en sílice y aplicando un tratamiento térmico, como se describe en otra parte en la presente memoria.

10 El producto de construcción formado según los métodos ejemplares descritos en la presente memoria puede tener un aglutinante que consiste básicamente en la escoria de acero. Además, el material granular que se usa puede ser un material de desecho y/o un material reciclado. Por lo tanto, el producto de construcción consiste básicamente en un material de desecho y/o un material reciclado. El material granular que es un material de desecho puede ser arena de escoria de acero, serrín, agregado de vidrio, agregado ligero y agregado de hormigón reciclado.

15 Según diversas realizaciones ejemplares, el producto de construcción que se fabrica es un bloque de construcción. Con respecto a la Figura 3, en ella se ilustra un diagrama de flujo de las etapas de un método ejemplar 300 para fabricar un bloque de construcción que incluye una escoria de acero.

20 En la etapa 108, la escoria de acero recibida se puede refinar opcionalmente. Por ejemplo, se puede usar un proceso de filtración o un proceso equivalente para separar los fragmentos finos de escoria de los fragmentos gruesos de escoria. De manera alternativa o adicional, el refinado de la escoria de acero recibida también puede incluir pulverizar parte de la escoria de acero hasta un polvo fino.

25 En la etapa 116, se proporciona un agregado adecuado como material granular que se mezcla con la escoria de acero que se usa como aglutinante. Según ciertas realizaciones ejemplares, el agregado es arena de escoria de hierro expandida. Por ejemplo, la escoria de hierro expandida se puede producir a partir de una escoria de hierro fundida que se trata con vapor a alta presión.

Según diversas realizaciones ejemplares, el material granular usado para fabricar un bloque de construcción incluye un agregado ligero, tal como un agregado ligero natural, agregado de arcilla expandida, agregado de esquisto expandido, agregado de escoria expandida, agregado de escoria de acero expandida y agregado de escoria de hierro expandida.

30 El agregado adecuado se mezcla además con el aglutinante de escoria de acero y agua a una primera proporción agua/escoria. Se entenderá que la primera proporción agua/escoria se refiere a la proporción del contenido de agua respecto del contenido de escoria que se usa como aglutinante, y no tiene en cuenta cualquier arena de escoria de acero proporcionada como agregado. La primera proporción agua/escoria puede ser mayor que una proporción agua/escoria concreta que es óptima para alcanzar la absorción de CO₂ más alta en la etapa de endurecimiento 128.

35 Se observó que una primera proporción agua/escoria mayor mejora la calidad de la superficie de los bloques de construcción que se fabrican. Se observó que al incrementar la primera proporción agua/escoria se incrementó la lisura de la superficie de los bloques de construcción que se fabrican. Por lo tanto, la primera proporción agua/escoria es una que favorece, o es eficaz para, la formación de una superficie lisa en el bloque de construcción. Por ejemplo, la primera proporción agua/escoria puede ser de al menos alrededor de 0,15. Por ejemplo, la primera proporción agua/escoria puede ser de alrededor de 0,16, alrededor de 0,17, alrededor de 0,18, alrededor de 0,19, alrededor de 40 0,20 o mayor de alrededor de 0,20.

45 En la etapa 120, la mezcla de escoria de acero y agregado adecuado se moldea o se preforma. El moldeo incluye compactar la mezcla de escoria de acero y agregado. Se puede aplicar una presión de compactación mayor, ya que el bloque de construcción puede tener una densidad elevada. Por ejemplo, la cantidad de mezcla de escoria de acero y agregado que se vierte en un molde y la presión de la compactación se eligen en conjunto de forma que el grosor resultante del bloque tras la compactación corresponde a un grosor convencional, tal como 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm o 30 mm.

50 La presión de la compactación puede ser de al menos alrededor de 5 MPa. Por ejemplo, la presión de la compactación puede ser de alrededor de 8 MPa, alrededor de 10 MPa, o alrededor de 12 MPa o mayor de 12 MPa. En otras realizaciones ejemplares, la presión de la compactación puede ser mayor de 15 MPa.

Se observó que una mayor presión de compactación puede conducir a una mayor resistencia a la compresión del bloque de construcción. Una mayor presión de compactación puede dar como resultado una resistencia a la compresión ligeramente mayor.

55 Se observó además que una cantidad más grande de presión puede dar como resultado menos absorción de carbono, y de ese modo también se limita la resistencia a la compresión conseguida. Por lo tanto, la presión de la compactación es menor de 20 MPa.

Después del moldeo, el bloque formado de la mezcla de escoria de acero y agregado se retira del molde.

En la etapa 308, la cantidad de agua en la mezcla de escoria de acero y agregado se reduce hasta una segunda proporción agua/escoria. La segunda proporción agua/escoria es menor que la primera proporción agua/escoria. Se entenderá que la segunda proporción agua/escoria se refiere a la proporción del contenido de agua respecto del contenido de escoria que se usa como aglutinante, y no tiene en cuenta cualquier arena de escoria de acero proporcionada como agregado. La segunda proporción agua/escoria es una que favorece, o es eficaz para, la absorción de carbono durante la etapa posterior de endurecimiento con dióxido de carbono. Por ejemplo, la segunda proporción agua/escoria puede ser de entre aproximadamente 0,06 y aproximadamente 0,12. Por ejemplo, la segunda proporción agua/escoria puede ser de entre aproximadamente 0,08 y aproximadamente 0,10.

Según una realización ejemplar, la cantidad de agua en la mezcla de escoria de acero y agregado se reduce después del moldeo de la etapa 120 aplicando un flujo de aire a la mezcla (es decir, el bloque formado a partir del moldeo de la etapa 308). Se cree que la aplicación del flujo de aire también incrementa la porosidad de la mezcla de escoria de acero y agregado en forma de bloque. La porosidad incrementada conduce además a una absorción de carbono incrementada en la etapa posterior de endurecimiento con dióxido de carbono. Por ejemplo, la mezcla de escoria de acero y agregado en forma de bloque se airea con un ventilador durante al menos alrededor de 1 hora para reducir el contenido de agua. Por ejemplo, la mezcla de escoria de acero y agregado se airea con un ventilador durante alrededor de 2 horas.

En la etapa 128, la mezcla moldeada y compactada de escoria de acero y agregado en forma de bloque se endurece con dióxido de carbono. El endurecimiento provoca la activación de la mezcla, y también da como resultado la fijación del dióxido de carbono en la mezcla. Por ejemplo, la mezcla de agregado de escoria de acero en forma de bloque se endurece con dióxido de carbono durante un período de al menos alrededor de 2 horas. Según ciertas realizaciones ejemplares, la mezcla de escoria de acero y agregado de escoria de acero se puede endurecer con CO₂ durante un período de al menos alrededor de 6 horas, al menos alrededor de 12 horas o al menos alrededor de 24 horas. Por ejemplo, la mezcla de agregado de escoria de acero en forma de bloque se endurece a una presión de entre 0,1 MPa y 0,5 MPa.

Opcionalmente, en la etapa 132, la mezcla endurecida de escoria de acero y agregado se puede hidratar adicionalmente como se describió anteriormente. Por ejemplo, la mezcla de escoria de acero y agregado en forma de bloque se hidrata en una cámara sellada, tal como una tienda de plástico sellada, o al aire ambiental durante al menos 2 días.

Por ejemplo, la mezcla se puede hidratar durante al menos 2 días.

Por ejemplo, la mezcla se puede hidratar durante al menos alrededor de 7 días.

Por ejemplo, la mezcla se puede hidratar durante al menos alrededor de 14 días.

Por ejemplo, la mezcla se puede hidratar durante alrededor de 35 días.

Con respecto a la Figura 4, en ella se ilustra un diagrama de flujo que muestra las etapas de un proceso ejemplar 400 para el tratamiento de una escoria de acero para fabricar un material de construcción. El material de construcción puede ser un material cementoso (es decir, similar al cemento) que se puede usar para fabricar un producto de construcción. Por ejemplo, el material de construcción puede ser el material aglutinante que se mezcla con el material granular para fabricar los productos de construcción descritos en la presente memoria.

El proceso ejemplar 400 se puede aplicar para tratar los tipos de escoria que no están inmediatamente listos para el uso como aglutinantes para fabricar un producto de construcción. Es decir, la escoria de acero tal como se recibe de un proceso de fabricación de acero requiere un tratamiento además del refinado de la etapa 108 para usarla como aglutinante.

Por ejemplo, la escoria de acero que requiere un tratamiento adicional puede ser una escoria de cuchara.

Por ejemplo, la escoria de acero que requiere un tratamiento adicional puede ser una escoria de acero que tiene un contenido acumulativo de silicato de calcio menor de alrededor del 15%. Por ejemplo, el contenido acumulativo de silicato de calcio de la escoria de acero es menor de alrededor del 12%.

Por ejemplo, la escoria de acero que requiere un tratamiento adicional puede ser una escoria de acero que tiene una concentración de cal libre mayor de alrededor del 7,2%.

Por ejemplo, la escoria de acero que requiere un tratamiento adicional puede ser una escoria de acero que tiene una concentración de dióxido de silicio menor de alrededor del 6,2%.

En la etapa 408, la escoria de acero se mezcla con un material rico en sílice. El material rico en sílice puede ser cualquier material que incluye al menos un 40% de dióxido de silicio (SiO₂) en la composición química. En otras realizaciones, el material puede incluir al menos alrededor del 50% de dióxido de silicio, al menos alrededor del 60% de dióxido de silicio o al menos alrededor del 70% de dióxido de silicio en la composición química.

El material rico en sílice puede incluir uno o más de vidrio, ceniza volante, metacaolín, humo de sílice, zeolita y ceniza de cascarilla de arroz, o una combinación de los mismos.

Según diversas realizaciones ejemplares, el material rico en sílice consiste básicamente en materiales de desecho y/o reciclados.

- 5 En ciertas realizaciones ejemplares, el material rico en sílice incluye vidrio. Por ejemplo, el vidrio consiste básicamente en vidrio de desecho y/o reciclado, tal como vidrio recuperado de lámparas fluorescentes. Tal vidrio puede tener al menos una concentración de un 70% de dióxido de silicio.

- 10 En ciertas realizaciones ejemplares, el material rico en sílice incluye ceniza volante. Los residuos generados en la combustión del carbón incluyen la ceniza volante. La ceniza volante también se halla en las partículas finas que surgen de los gases de chimenea. Los subproductos de las centrales eléctricas también incluyen ceniza volante, que se clasifica como de Clase F o Clase C. Tal ceniza volante puede tener al menos una concentración del 50% de dióxido de silicio.

- 15 La escoria de acero se mezcla con el material rico en sílice según una proporción escoria/material rico en sílice. La proporción escoria/material rico en sílice puede variar dependiendo del tipo de material rico en sílice proporcionado. Por ejemplo, la proporción escoria/material rico en sílice puede variar dependiendo de la concentración de dióxido de silicio en el material rico en sílice.

Por ejemplo, cuando el material rico en sílice consiste básicamente en vidrio, la escoria y el material rico en sílice se mezclan de forma que la mezcla incluye entre alrededor del 10% de vidrio y alrededor del 30% de vidrio. Por ejemplo, la mezcla puede incluir alrededor del 20% de vidrio.

- 20 Por ejemplo, cuando el material rico en sílice consiste básicamente en ceniza volante, la escoria y el material rico en sílice se mezclan de forma que la mezcla incluye entre alrededor del 20% y alrededor del 40% de ceniza volante. Por ejemplo, la mezcla puede incluir alrededor del 30% de ceniza volante.

- 25 La escoria se puede mezclar con el material rico en sílice en un pulverizador. Por lo tanto, la mezcla también provoca la molienda de la escoria y el material rico en sílice. En otras realizaciones ejemplares, la escoria y el material rico en sílice se pueden moler antes de mezclarlos.

En la etapa 416, se compacta la mezcla de escoria y material rico en sílice. Por ejemplo, la mezcla se compacta en clínkers de un tamaño predeterminado. La mezcla se puede compactar en un molde, tal como un molde de acero, a una presión de al menos 30 MPa. Por ejemplo, la mezcla se compacta a una presión de entre alrededor de 40 MPa y 60 MPa, y preferiblemente alrededor de 50 MPa.

- 30 En la etapa 424, la mezcla compactada de escoria y material rico en sílice se calienta adicionalmente. En un ejemplo, la mezcla de escoria y material rico en sílice se calienta sobre placas refractarias colocadas en hornos de alta temperatura. Sin embargo, se entenderá que se pueden usar otras formas adecuadas de calentamiento.

- 35 El calentamiento se puede llevar a cabo incrementando lentamente la temperatura hasta una temperatura objetivo. El calentamiento continúa después a la temperatura objetivo durante un periodo de tiempo determinado. La temperatura objetivo y la duración del calentamiento a la temperatura objetivo pueden variar.

- 40 Por ejemplo, cuando el material rico en sílice consiste básicamente en vidrio, la mezcla de escoria y vidrio se calienta a la temperatura objetivo a una velocidad de alrededor de 5 °C/min. La temperatura objetivo puede ser de al menos alrededor de 700 °C. Por ejemplo, la temperatura objetivo puede ser de entre alrededor de 900 °C y alrededor de 1200 °C. En una realización ejemplar, la mezcla de escoria y vidrio se calienta a una temperatura objetivo de alrededor de 1100 °C. La mezcla de escoria y vidrio se puede calentar a la temperatura objetivo durante un periodo de al menos alrededor de 30 minutos.

En ciertas realizaciones ejemplares, la mezcla de escoria y vidrio se puede calentar a la temperatura objetivo durante un periodo de alrededor de 30 minutos a alrededor de 60 minutos.

- 45 Por ejemplo, cuando el material rico en sílice consiste básicamente en ceniza volante, el material de escoria y ceniza volante se calienta a la temperatura objetivo a una velocidad de alrededor de 5 °C/min. La temperatura objetivo puede ser de al menos alrededor de 1000 °C. Por ejemplo, la temperatura objetivo puede ser de entre alrededor de 1200 °C y alrededor de 1400 °C. En una realización ejemplar, la mezcla de escoria y ceniza volante se calienta a una temperatura objetivo de alrededor de 1250 °C.

- 50 En ciertas realizaciones ejemplares, la mezcla de escoria y ceniza volante se puede calentar a la temperatura objetivo durante un periodo de al menos alrededor de 30 minutos. En ciertas realizaciones ejemplares, la mezcla de escoria y ceniza volante se puede calentar a la temperatura objetivo durante un periodo de alrededor de 30 minutos a alrededor de 60 minutos.

En la etapa 432, la mezcla de escoria y material rico en sílice se enfría rápidamente después de calentarla en la etapa 424. La mezcla se puede enfriar aplicando un flujo de aire a la mezcla de escoria y vidrio. Por ejemplo, el flujo de aire

puede ser de un ventilador que sopla sobre la mezcla en forma de clíners. Por ejemplo, el flujo de aire puede tener una velocidad de enfriamiento de alrededor de 600 °C por hora. Por ejemplo, el flujo de aire se aplica a la mezcla durante un periodo de al menos alrededor de 1 hora. El flujo de aire se puede aplicar durante un periodo de alrededor de 2 horas.

- 5 La mezcla también se puede enfriar al aire ambiental. En tales realizaciones ejemplares, la mezcla se puede enfriar durante un periodo de tiempo más largo, tal como 6 horas o más. Dependiendo del método de enfriamiento y del caudal de aire, la duración del enfriamiento puede variar de alrededor de 1 hora a alrededor de 6 horas.

En la etapa 440, la mezcla de escoria y material rico en sílice se muele hasta fragmentos finos después de enfriarla. Los fragmentos finos de la mezcla de escoria y material rico en sílice forman un material de construcción que está listo para su uso como aglutinante en un producto de construcción. Los fragmentos finos pueden exhibir propiedades similares al cemento que los hacen adecuados para el uso para fabricar un producto de construcción.

- 10

Por ejemplo, la mezcla de escoria y material rico en sílice en forma de clíners después del enfriamiento se pulveriza en la etapa 440.

- 15

La mezcla se puede pulverizar hasta fragmentos finos que tienen un número de Blaine de al menos alrededor de 200 m²/kg.

Por ejemplo, cuando el material rico en sílice es vidrio, la mezcla de escoria y vidrio se muele hasta una finura de alrededor de 285 m²/kg.

Por ejemplo, cuando el material rico en sílice es ceniza volante, la mezcla de escoria y ceniza volante se muele hasta una finura de alrededor de 200 m²/kg.

- 20 Según diversas realizaciones ejemplares, los productos de construcción fabricados según los métodos 100 o 300 se pueden fabricar mediante el uso del material similar a cemento formado según el método 400. El material similar a cemento formado según el método 400 se usa como aglutinante en el producto de construcción.

De manera ventajosa, los materiales de construcción y los productos de construcción fabricados con los métodos y procesos ejemplares descritos en la presente memoria pueden usar uno o más materiales de desecho o reciclados. En particular, se usa escoria de acero, que es un subproducto de la fabricación de acero, como material aglutinante.

- 25

En otros ejemplos, también se usa arena de escoria de acero como agregado para fabricar los productos de construcción.

En otros ejemplos, se mezcla vidrio de desecho con escoria de acero, concretamente una escoria de cuchara, y se usa para fabricar un material cementoso.

- 30

En otros ejemplos, se mezcla ceniza volante con escoria de acero, concretamente una escoria de cuchara, y se usa para fabricar un material cementoso.

Según diversos materiales de construcción y productos de construcción ejemplares descritos en la presente memoria, los materiales de construcción y los productos de construcción consisten básicamente en materiales de desecho y/o reciclados.

- 35 Según diversas realizaciones ejemplares, se usa la escoria de acero tal como se recibe de un proceso de fabricación de acero como aglutinante para fabricar un producto de construcción. Por lo tanto, se puede evitar el tratamiento térmico necesario en general para fabricar cemento Portland, y de ese modo se consigue ahorrar energía.

Según diversas realizaciones ejemplares, la escoria de acero se trata mezclándola con un material rico en sílice y un tratamiento térmico adicional. La temperatura del tratamiento térmico es inferior a la necesaria en general para fabricar cemento Portland. Por lo tanto, se puede conseguir ahorrar energía.

- 40

De manera ventajosa, se observó que el endurecimiento con dióxido de carbono al menos mejoró la resistencia temprana de los productos de construcción que se fabricaron. También se observó que el endurecimiento mediante carbonatación puede mejorar la resistencia a la compresión definitiva. También se observó que el endurecimiento mediante carbonatación de los productos de construcción con dióxido de carbono mejora las propiedades de durabilidad, tales como la resistencia a la congelación y descongelación y/o la permeabilidad. El endurecimiento con dióxido de carbono da como resultado además la fijación del dióxido de carbono. Esta fijación reduce el dióxido de carbono que se emite por la fabricación de acero o del que es necesario deshacerse de otra manera.

- 45

Programas experimentales y resultados

Medida de la absorción de carbono

- 50 Los diversos programas experimentales que se llevaron a cabo incluyeron medir la cantidad de absorción de carbono del endurecimiento con dióxido de carbono. Se usaron tres métodos diferentes para cuantificar la absorción de dióxido

de carbono por parte de placas de escoria de acero sometidas a carbonatación. Los resultados son complementarios y comparables. Son el método del aumento de masa, el método de la curva de masa, y el método del analizador de CO₂.

5 El método del aumento de masa, expresado en la Ecuación 3, estima la diferencia de masas antes y después de la carbonatación. La diferencia de masas junto con el agua evaporada de la reacción de carbonatación exotérmica representa el aumento de masa debido a la absorción de dióxido de carbono. La reacción de carbonatación es de naturaleza exotérmica, y como resultado cierta cantidad del agua de mezcla de las muestras se evapora y se condensa en las paredes internas de la cámara. Esta agua se puede recoger mediante el uso de un papel absorbente, y se debería añadir a la masa de la muestra carbonatada, ya que el agua presente en la cámara es parte del agua en la
10 masa de escoria original.

$$\text{Absorción de CO}_2 (\%) = \frac{\text{Masa final} + \text{Masa de pérdida de agua} - \text{Masa inicial}}{\text{Masa de la muestra seca}} \dots \text{Ecuación 3}$$

15 El método de la curva de masa determina la absorción de CO₂ mediante el uso de la masa registrada con el origen en el momento de la inyección de gas. Se registró una curva de masa hasta el final del proceso, en cuyo momento se liberó el CO₂ y se midió la masa residual, M. El sistema se calibró repitiendo los ensayos mediante el uso de una espuma de poliestireno insensible a CO₂ del mismo volumen para obtener una segunda masa residual, m. La diferencia entre M y m representó la absorción de CO₂ en la muestra (Ecuación 2). Los datos recogidos mediante los métodos del aumento de masa y de la curva de masa son dos medidas simultáneas del mismo proceso, y por lo tanto deberían ser comparables. Son independientes de cualquier contenido de carbono que existiese antes de la carbonatación.

$$\text{Absorción de CO}_2 (\%) = \frac{M - m}{\text{Masa de la muestra seca}} \dots \text{Ecuación 4}$$

20 También se usó un analizador de carbono ELTRA CS-800 con un horno de inducción y detección infrarroja del CO₂ desarrollado para cuantificar la absorción de CO₂ de polvos compactos de escoria de cuchara tras la carbonatación. Como comparación, también se midió el contenido de CO₂ de la referencia de escoria hidratada mediante el uso del analizador ELTRA CS-800. La absorción de CO₂ de los polvos compactos de escoria tras la carbonatación se proporciona mediante la diferencia en el contenido de carbono (ΔM) entre las escorias carbonatadas e hidratadas con
25 respecto a la masa de la placa seca (Ecuación 3):

$$\text{Absorción de CO}_2 (\%) = \frac{\Delta M}{\text{Masa de la muestra seca}}$$

30 Se llevó a cabo un análisis de difracción de rayos X (XRD) para identificar las fases generadas o consumidas durante la carbonatación/hidratación de las diferentes formas de escoria consideradas en este estudio: tal como se recibe, tratada térmicamente, hidratada, y carbonatada. Se empleó un difractómetro Bruker D8 (radiación de Cu K α , intervalo de barrido 15-80° 2 θ , 0,02°) para llevar a cabo este análisis.

35 El análisis termogravimétrico y el análisis termogravimétrico diferencial (TG/DTG) también se llevaron a cabo mediante el uso de un termoanalizador NETZSCH TG 449F3 Jupiter para determinar los productos de hidratación y carbonatación. El mismo polvo preparado para el análisis de XRD se usó para el análisis de TG. Las muestras se recogieron para incluir la superficie y el núcleo, y el polvo se mezcló de manera uniforme para representar el grosor medio. El polvo se calentó después entre 20 y 1000 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Los productos de hidratación y carbonatación se determinaron basándose en los picos característicos en las curvas de DTG.

Producto de construcción de muestra 1: Bloque de construcción

40 Se fabricó un bloque unido por escoria con escoria de acero EBH (escoria de EAF+BOF) como aglutinante. La composición química de la escoria EBH se presenta en la Tabla 1 a continuación en la presente memoria. La Tabla 2 muestra el diseño de la mezcla para el bloque unido por escoria. La escoria de acero fue el único aglutinante usado en la producción de un bloque, en el que se usó un agregado de escoria expandida como agregado. La absorción de agua y la densidad de la arena de escoria expandida son del 6,5% y 1900 kg/m³, respectivamente. Aunque la proporción óptima agua/escoria (A/E) para conseguir la absorción de CO₂ y la resistencia más altas se determinó como 0,08 (~0,1), esta proporción dio como resultado la producción de un bloque con una superficie rugosa. La proporción
45 agua/escoria se incrementó después progresivamente para mejorar la calidad de la superficie de los bloques. La proporción agua/escoria más alta ensayada, es decir, 0,20, condujo a la superficie más lisa, y por lo tanto se identificó como la primera proporción agua/escoria deseada en el diseño de la mezcla. La mezcla de EBH, agregado y agua se compactó a una presión de 12 MPa, tras lo cual se vertió en el molde de acero. El grosor del bloque de 127x76 mm tras la compactación se diseñó para que fuera 30 mm, que es el grosor de pared del bloque comercial convencional.
50 Tras el desmolde, las muestras se colocaron delante de un ventilador durante 2 horas para reducir la proporción agua/escoria de 0,20 a 0,10. Después, los bloques con la superficie lisa y la proporción A/E óptima para la activación con dióxido de carbono se expusieron a CO₂ durante 24 horas a una presión de 158,58 kPa (23 psi) en la cámara de carbonatación. Se midió la absorción de dióxido de carbono mediante el uso del método del aumento de masa. Todos los bloques se mantuvieron en bolsas de plástico durante 35 días para la hidratación posterior antes de ensayar sus
55 propiedades mecánicas y de durabilidad. También se llevaron a cabo ensayos con un bloque de cemento comercial convencional como comparación respecto del bloque unido por escoria.

Tabla 1: Composición química de la escoria de acero (%p)

Muestra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
EBH	12,47	0,87	6,87	19,48	3,84	10,57	39,08	<0,01	0,01	0,41
KOBM	11,5	-	2,8	9,9	-	27,2	43,7	0,08	0,01	-

Tabla 2: Diseño de la mezcla

Tipo de muestra	EBH (kg/m ³)	Arena de escoria de la mezcla (kg/m ³)	Proporción agua/escoria inicial	Compactación (MPa)
Bloque unido por escoria	1555	930	0,2	12,0

5 La densidad y la absorción de agua de los bloques unidos por escoria y de cemento comercial se informó como la media de 3 resultados. La resistencia a la compresión de los bloques se determinó en dos condiciones: en seco y en húmedo. Para medir la resistencia a la compresión en húmedo, los bloques se mantuvieron en agua a una temperatura de 23 °C durante 48 horas. La superficie de cada bloque se secó después antes de someter los bloques a una carga de compresión a una velocidad de 0,5 mm/min.

10 Se determinó la durabilidad de los bloques mediante su exposición a ciclos de congelación y descongelación. Los métodos de ensayo de congelación y descongelación se llevaron a cabo de acuerdo con la norma CSA A23.1 (2009). Los valores de masa informados son las medias de 3 resultados.

15 Se muestra una representación esquemática del sistema de carbonatación en la Figura 2. Incluye un cilindro de gas CO₂ comprimido de una pureza del 99,5%, una cámara de carbonatación, un transductor de presión, un regulador de presión y un calentador. El transductor de presión monitoriza la presión del gas y el regulador mantiene la presión de la cámara constante a 0,15 MPa a lo largo del proceso de carbonatación. Se usa un calentador eléctrico para calentar el gas CO₂ a 22 °C antes de que entre en la cámara de carbonatación.

20 Como muestra la Tabla 3, la absorción de dióxido de carbono del bloque unido por escoria alcanzó un 6,6%, que fue casi igual que la absorción de CO₂ de la placa unida por escoria (discutida adicionalmente más adelante). La equivalencia de las absorciones de CO₂ se debe al hecho de que la absorción tanto para la placa unida por escoria como para los bloques unidos por escoria se midieron basándose en el peso de la escoria de acero.

Tabla 3: Absorción de dióxido de carbono en un bloque unido por escoria

Producto	Presión de CO ₂ (MPa)	Exposición a CO ₂ (horas)	Hidratación posterior (días)	Absorción de dióxido de carbono (%)
Bloque unido por escoria	0,15	24	35	6,6±0,2

25 Los resultados de densidad y absorción de agua del bloque de cemento comercial y del bloque unido por escoria se presentan en la Tabla 4 más adelante en la presente memoria. La densidad del bloque unido por escoria exhibió justo un incremento del 10% en comparación con el bloque comercial. La absorción de agua del bloque de cemento comercial y del bloque unido por escoria fue del 5,5% y 6,7%, respectivamente. Por lo tanto, las propiedades físicas representadas por la densidad y la absorción de agua fueron básicamente iguales para ambos tipos de bloques.

Tabla 4: Densidad y absorción de agua de un bloque unido por escoria

Producto	Bloque unido por escoria	Bloque de cemento comercial
Densidad (kg/m ³)	2545,0±25,1	2254,9±52,7
Absorción de agua (%)	6,7±0,1	5,5±0,2

30 La Figura 5 ilustra la resistencia a la compresión en seco y en húmedo de un bloque de cemento comercial y del bloque unido por escoria. Las resistencias a la compresión en seco de los bloques comerciales y los unidos por escoria fueron 23,6 MPa y 22,8 MPa, respectivamente. La resistencia a la compresión del bloque unido por escoria cumplió los requisitos mínimos para las unidades portantes de carga de albañilería, tal como sugiere la norma BS 6073 (2008). La

resistencia a la compresión del bloque de cemento comercial en húmedo cayó un 10%, mientras el bloque unido por escoria en húmedo no exhibió una reducción de la resistencia en comparación con el bloque en seco. Los valores de resistencia a la compresión para el bloque unido por escoria sugieren que el bloque fabricado únicamente a partir de materiales de desecho puede competir en comportamiento mecánico con el bloque de cemento comercial. No se ha publicado previamente ningún informe sobre las propiedades de los bloques fabricados con escoria como aglutinante y arena de escoria como agregado. Sin embargo, los resultados del estudio llevado a cabo por Monkman y Shao (2010) mostraron que la resistencia a la compresión de unidades de albañilería fabricadas con cemento y arena de escoria tras someterlas a una carbonatación de 2 horas seguido de 28 días de hidratación fue de 15,5 MPa. El mayor periodo de carbonatación del programa experimental actual dio como resultado una mayor resistencia a la compresión que la observada por Monkman y Shao, aunque ellos usaron cemento como aglutinante.

La Figura 6 son fotografías de bloques unidos por escoria, de acuerdo con una realización ejemplar, y de bloques de cemento comerciales, tras 20 ciclos de congelación y descongelación. Las dos fotografías inferiores son fotografías de los bloques de cemento comerciales, y las dos fotografías superiores son fotografías del bloque unido por escoria.

La Figura 7 muestra la pérdida de masa de bloques unidos por escoria y bloques de cemento comerciales sometidos a 20 ciclos de congelación y descongelación. Los bloques comerciales y los unidos por escoria comenzaron a perder masa tras 2 y 7 ciclos, respectivamente. A partir del 7^o ciclo, ambos bloques experimentaron la misma velocidad de pérdida de masa. Tras 20 ciclos de congelación y descongelación, el bloque comercial perdió un 32% de su masa, mientras el peso del bloque unido por escoria disminuyó solamente un 17%. Por lo tanto, el bloque unido por escoria exhibió una resistencia mayor al exponerlo a ciclos de congelación y descongelación en comparación con el bloque comercial. Considerando los resultados de la resistencia a la compresión y de la congelación y descongelación, se puede concluir que las propiedades mecánicas y de durabilidad de los bloques fabricados con materiales de desecho en este experimento fueron equivalentes o superiores en comparación con un bloque de cemento comercial.

Producto de construcción de muestra 2: Panel de escoria

Se usó la escoria de KOBM como aglutinante en la fabricación de paneles unidos por escoria. El proceso de inyección de oxígeno de Klockner Maxhutte (KOBM) se considera un subgrupo del proceso en horno de oxígeno básico (BOF). Su composición química, tal como se determinó mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF), se presenta en la Tabla 1 anteriormente mencionada. Antes de su uso, la escoria se molió hasta un polvo mediante el uso de un molino de bolas Bico Braun modelo 395-5 durante 2 horas, y en los experimentos posteriores se usó solamente el material que pasó a través de un tamiz de 75 μm . La finura de Blaine de la escoria molida fue de $402 \pm 55 \text{ m}^2/\text{kg}$. El serrín de madera blanda usado en la fabricación de los paneles se tamizó a través de un tamiz de 600 μm y se secó en horno a 50 °C hasta que su masa fue constante.

El sistema de carbonatación mostrado en la Figura 2 y descrito anteriormente en la presente memoria también se usa en la presente memoria para la carbonatación de paneles.

Una mezcla de escoria de acero de KOBM, serrín y agua se moldeó a una presión de 12 MPa durante 15 segundos para crear una placa ligera de escoria de acero que midió 76 mm por 127 mm, con un grosor de 12 mm. En los ensayos preliminares, la proporción serrín/escoria varió del 5 al 15% en masa a una proporción agua/escoria de 0,15, y se llevó a cabo la carbonatación durante 2 horas. En los experimentos posteriores, se eligió una proporción serrín/escoria del 10% y un periodo de carbonatación de 24 horas para optimizar la densidad y la resistencia de la placa. Se llevaron a cabo ensayos mecánicos con los paneles de laboratorio tras 28 días de hidratación tras la carbonatación. La resistencia y el módulo de flexión se determinaron mediante el uso de una flexión de 3 puntos a lo largo de un tramo de 102 mm. La resistencia a la compresión se determinó a lo largo de un área de compresión de 127 mm x 12 mm. Las propiedades mecánicas de las placas de serrín unido por escoria se compararon con las de tres paneles comerciales: placa de cemento y malla, placa de fibrocemento, y placa de cemento y esferas de poliestireno expandido (EPS).

También se determinó la capacidad de absorción capilar de agua de las placas de serrín y escoria de acero de KOBM. Después de 28 días de endurecimiento en una bolsa sellada, las placas se secaron en un horno a 50 °C. Después del secado, cada placa de escoria-serrín se sumergió verticalmente en una capa de agua de 5 mm de grosor durante 28 días. A intervalos de 24 horas, las placas se retiraron del agua, se secó su superficie, y después se pesaron. Después de 28 días, las placas se retiraron del agua, se secó de nuevo su superficie, y después se ensayó la resistencia a la flexión, la resistencia a la compresión, y el módulo de Young. Después se compararon los resultados con los de los controles secos que se habían dejado en una bolsa de plástico sellada durante 56 días.

Para investigar el efecto del serrín sobre el comportamiento de las placas de escoria carbonatada, se compararon las propiedades mecánicas de cuatro lotes con diferentes proporciones serrín/escoria. Los polvos compactos cilíndricos tuvieron 20 mm de altura y 15 mm de diámetro, y se formaron en condiciones óptimas de proceso: presión de compactación = 12 MPa, proporción agua/escoria = 0,15, tiempo de carbonatación = 2 horas, y presión de gas CO_2 = 1,5 bar. Se usó una proporción agua/escoria mayor que la óptima para incorporar el uso del serrín seco. Se llevaron a cabo ensayos de compresión una hora tras la carbonatación. El efecto del serrín sobre la absorción de carbono y la resistencia a la compresión se muestra en la Figura 8. Mientras la absorción de carbono no se vio influenciada significativamente por la adición del serrín, la resistencia a la compresión de la escoria carbonatada disminuyó

claramente con el contenido relativo de serrín. Esta reducción no solamente fue el resultado de una reducción de la cantidad de aglutinante, sino también de la hidratación retardada debido a la lignina del serrín. El contenido de carbohidratos en la lignina sirvió como retardador de la hidratación. Independientemente del contenido de serrín, la carbonatación siempre mejoró el comportamiento del producto de serrín unido por escoria.

5 Se muestra una fotografía de una muestra de placa de serrín unida por escoria (76 x 127 x 12 mm) fabricada en el laboratorio en la Figura 9. Se ensayaron dichas placas de serrín unidas por escoria 28 días tras la carbonatación y la hidratación. Los resultados de la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad y la densidad se presentan en la Tabla 5 a continuación en la presente memoria, junto con los de tres productos de placas comerciales. Revelaron que las propiedades físicas de la placa de escoria de KOBM fueron comparables a las de los
10 productos comerciales. La resistencia a la flexión de la placa de escoria de KOBM-serrín (6,3 MPa) fue mayor que la de la placa de cemento y malla, y cercana a la de la placa de fibrocemento y de la placa de cemento y EPS. La resistencia a la compresión de la placa de escoria de KOBM-serrín fue de 13,8 MPa, dentro del intervalo de valores de resistencia de los productos comerciales. Dada la densidad elevada del aglutinante, la placa de escoria de KOBM-serrín tuvo la densidad más alta (1,4 g/cm³) de los cuatro materiales ensayados.

15 Tabla 5: Comparación de propiedades de los paneles

Panel	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo (GPa)	Densidad (g/cm ³)
Escoria-serrín (10%)	13,8±0,6	6,3±0,3	1,1±0,1	1,4±0,04
Placa comercial [Cemento y malla]	13,0±0,5	4,9±0,7	1,9±0,2	1,3±0,01
Placa comercial [Fibrocemento]	14,8±0,6	6,9±0,2	2,2±0,3	1,2±0,06
Placa comercial [Cemento y EPS]	15,5±0,7	7,9±0,4	2,2±0,1	1,1±0,04

Como las placas basadas en cemento, la placa de escoria de KOBM se diseñó para aplicaciones en húmedo. Por lo tanto, la absorción capilar de agua y su efecto sobre el comportamiento mecánico es una medida importante de su durabilidad. La absorción de agua capilar de la placa de escoria-serrín se midió a lo largo de un periodo de 4 semanas.
20 Después de secarla en un horno a 50 °C hasta una masa constante, la placa de escoria carbonatada se sumergió verticalmente en una capa de agua de 5 mm de profundidad durante 28 días. Los ensayos se llevaron a cabo por triplicado y se calculó la media. La curva de absorción de agua se muestra en la Figura 10. El incremento de masa debido a la absorción de agua fue más alto en los primeros 3 días, y la absorción alcanzó un 9,8% en el día número 3. La absorción continuó hasta que se alcanzó una meseta en el día 19 a alrededor del 14,2%, lo que indicó que la muestra alcanzó la saturación por medio de la acción capilar. La absorción de agua se atribuyó a la estructura abierta de la placa en presencia de las partículas de serrín, lo que incrementó la cantidad de huecos de aire en la muestra. El efecto de la absorción de agua sobre las propiedades mecánicas de la placa de serrín unida por escoria de KOBM se presenta en la Figura 11. La resistencia a la flexión y el módulo elástico de las muestras en húmedo y en seco fueron similares estadísticamente, lo que indicó que la saturación de los poros no tuvo efecto sobre la resistencia a la flexión o la rigidez de la placa de escoria. Sin embargo, hubo una reducción en la resistencia a la compresión tras 28 días de infiltración de agua, ya que la resistencia cayó de 13,8 MPa a 11,9 MPa, una disminución del 14%.
30

Ejemplo 3: Tratamiento de la escoria de acero para fabricar un material de construcción

Se recibieron dos escorias de cuchara (L2 y L3) de una acería de Montreal, Canadá. Se recogieron de la misma línea de producción de la acería en momentos diferentes. Se recibieron con una diferencia de alrededor de dos años entre sí. Debido al enfriamiento lento, la escoria de cuchara se produjo en forma de un polvo que después se comprimió en "tortas" porosas para su transporte y manipulación. Las "tortas" de escoria de cuchara secas tal como se recibieron se trituraron primero y después se pulverizaron adicionalmente hasta un polvo con números de Blaine de 318 m²/kg y 247 m²/kg para L2 y L3, respectivamente. La escoria L2 se recibió dos años antes que L3.
35

Se determinaron las composiciones químicas de las escorias de cuchara (L2 y L3) tal como se recibieron mediante análisis de fluorescencia de rayos X (XRF), y se presentan en la Tabla 6. Se puede observar la variabilidad entre las dos formas brutas de escoria. La diferencia de composición de la escoria de cuchara está provocada posiblemente por los cambios en el proceso y los diferentes productos de acero. Como se muestra en la Tabla 6, la escoria de cuchara L2 muestra un mayor contenido de calcio y sílice, mientras la escoria de cuchara L3 tuvo un mayor contenido de alúmina, hierro y magnesio. El contenido de dióxido de carbono se determinó mediante un analizador de carbono basado en infrarrojos. Fueron relativamente bajos. La cal libre se midió mediante el uso del método de Franke, de acuerdo con la norma ASTM C114 (2014). La escoria de cuchara L3 contiene más cal libre que la escoria de cuchara L2. Para evaluar el comportamiento de hidratación y carbonatación de la escoria de cuchara, es importante determinar las fases mineralógicas, principalmente el silicato dicálcico (C₂S) y el silicato tricálcico (C₃S). Esto se llevó a cabo mediante el uso de un análisis semicuantitativo de difracción de rayos X (QXRD) con un 10% de TiO₂ como referencia interna (Chung 1974). Comparando los picos de XRD de C₂S puro, C₃S puro, TiO₂ puro y escoria de cuchara, se puede
50

5 estimar el porcentaje de C₂S y C₃S en la escoria de cuchara. La escoria de cuchara L2 tiene un contenido de C₃S mucho mayor que la escoria de cuchara L3. Es posible que la escoria de cuchara contenga C₃S (Posch et al. 2002), ya que la temperatura del proceso pudo superar los 1500 °C (He et al. 2012). La Tabla 6 también muestra la composición química del vidrio de desecho molido como aditivo de sílice para el tratamiento térmico en caso de que la escoria de cuchara tal como se recibe no se pueda activar directamente mediante carbonatación (posiblemente debido a la ausencia de silicatos de calcio). El vidrio de desecho es el subproducto del proceso de reciclaje de lámparas fluorescentes, y se muele hasta un polvo que tiene un número de Blaine de 600 m²/kg.

Tabla 6: Composiciones químicas y fases de silicato de calcio del material bruto

ID	Composiciones químicas (%)								Fases (%)	
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	CO ₂	Cal libre	C ₂ S	C ₃ S
Escoria de cuchara (L2)	65,23	12,35	16,55	0,79	3,96	0,08	1,10	7,2	9,5	31,1
Escoria de cuchara (L3)	57,55	6,21	23,17	3,55	5,04	0,16	0,20	10,8	9,3	3,6
Vidrio de desecho	4,89	70,68	1,62	0,22	3,08	16,06	-	-	-	-

10 Para cada escoria de cuchara, se formaron mediante compactación un total de nueve muestras de losas de 76x127x12 mm a una presión de 12,5 MPa con una proporción agua/escoria de 0,1. Seis muestras se sometieron a activación mediante carbonatación justo después de la formación de la muestra. De las seis losas carbonatadas, tres se ensayaron inmediatamente después de la carbonatación con respecto a la resistencia a la compresión, y las otras tres se ensayaron después de la hidratación posterior durante 35 días en bolsas de plástico selladas. Se endurecieron tres
15 muestras de referencia de hidratación en bolsas de plástico selladas y se ensayaron después de 35 días de hidratación. El sistema de carbonatación se muestra en la Figura 2. Se usó un gas CO₂ con una pureza del 99,5% para la carbonatación. El gas se calentó primero mediante un calentador, y después se inyectó en la cámara a una presión de 0,15 MPa durante un periodo de 24 horas. La presión se mantuvo constante mediante el regulador, de forma que se pudiera reponer el dióxido de carbono consumido por los productos de escoria.

20 Primero se ensayaron ambas escorias de cuchara L2 y L3 tal como se recibieron. Los polvos compactos de la escoria de cuchara L2 fueron reactivos con CO₂, y pudieron desarrollar resistencia en 24 h mediante la activación con carbono. Sin embargo, los polvos compactos de la escoria de cuchara L3 se agrietaron completamente debido al calor extremo generado por la carbonatación.

25 El comportamiento de carbonatación de la escoria de cuchara tal como se recibe, L2 y L3, se caracterizó por la absorción de dióxido de carbono. Los polvos compactos de la escoria de cuchara L2 exhibieron una excelente reactividad con el carbono. Los resultados del método del aumento de masa proporcionaron una absorción del 9,9%, que fue ligeramente inferior al valor del 12,8% obtenido mediante el método de la curva de masa. El contenido medio de carbono mediante el analizador de CO₂ fue del 9,4%, que fue del mismo orden de magnitud tal como se mide mediante los métodos del aumento de masa y de la curva de masa. La curva de masa típica del polvo compacto de escoria de cuchara L2 se muestra en la Figura 12. Fue interesante observar que más del 70% de la reacción de carbonatación se había dado en las primeras dos horas. Parece que el polvo compacto de escoria de cuchara pudo alcanzar un grado similar de reacción de carbonatación que el polvo de escoria de cuchara.

35 En contraste, la escoria de cuchara L3 con un bajo contenido de sílice se agrietó durante la carbonatación, como se muestra en la Figura 13. No hubo un incremento de masa ni absorción de dióxido de carbono. En su lugar, se generó un calor significativo. Los polvos compactos de la escoria de cuchara L3 se agrietaron de una manera similar al polvo compacto de cal viva (CaO), lo que indica que se creó calor por la carbonatación de la cal libre. Esta disipación de calor se percibió inmediatamente después de mezclar la escoria L3 con agua, un efecto que surge de la reacción hidráulica de la cal libre. Como se observa en la Tabla 6, el contenido de cal libre de L3 fue un 50% mayor que para L2. Probablemente existe un valor umbral de contenido de cal libre por encima del cual la escoria de cuchara no puede resistir las reacciones de hidratación y carbonatación.

45 La Tabla 7 muestra la resistencia a la compresión de polvos compactos de escoria de cuchara debido a la hidratación y la carbonatación. La escoria de cuchara L2 fue débil en la reacción hidráulica. La resistencia a la compresión de los polvos compactos L2 alcanzó solamente 6,0 MPa después de 35 días de hidratación sellada. Por otra parte, las mismas muestras de polvos compactos que se sometieron a 24 horas de endurecimiento mediante carbonatación alcanzaron una resistencia a la compresión significativamente mayor de 34,8 MPa. Las muestras de polvos compactos que se sometieron a un endurecimiento combinado de 24 h de carbonatación seguido de 35 días de hidratación alcanzaron una resistencia a la compresión de 39,5 MPa, lo que demostró que la resistencia definitiva fue la superposición de la resistencia por carbonatación temprana con la resistencia por hidratación tardía. En otras palabras, la carbonatación no impide la hidratación, y se adquirió más resistencia tras la carbonatación a partir de la hidratación posterior. Para la escoria de cuchara L3, los polvos compactos se agrietaron por la carbonatación o por la hidratación.
50 En la hidratación de la escoria de cuchara L3, se desarrolló un patrón de agrietamiento similar al mostrado en la Figura

13 en el polvo compacto hidratado después de 10 días de hidratación sellada. Es el contenido de cal libre el que produjo el calor y agrietó los polvos compactos.

Tabla 7: Resistencia a la compresión de polvos compactos de escoria de cuchara

ID	Tipo de escoria	Tiempo de hidratación (días)	Tiempo de carbonatación (h)	Hidratación posterior (días)	Edad de ensayo (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
L2-0C+35H	L2	35	-	-	35	6,0±1,7
L2-24C+0H	L2	0	24	0	1	34,8±9,52
L2-24C+35H	L2	0	24	35	36	39,5±11,9
L3-0C+35H*	L3	35	0	0	35	0
L3-24C+0H*	L3	0	24	0	1	0

5 La Figura 14 muestra los patrones de XRD de ambas escorias tal como se reciben, L2 y L3. La escoria L2 con mayor contenido de Ca y Si exhibió claramente picos intensos para C_2S/C_3S , hidróxido de calcio (CH), y un contenido mucho menor de cal libre. En la escoria L2, las fases principales incluyeron fases de C_2S/C_3S , mayenita ($C_{12}A_7$) y las fases menores incluyeron merwinita (C_3MS_2) y gehlenita (C_2AS). Se halló calcio-ferrita (C_2F) y MgO en cantidades mínimas. La escoria L3, por otra parte, reveló la presencia de fases importantes de CH, mayenita ($C_{12}A_7$), merwinita (C_3MS_2), cal libre (CaO libre) y fases menores de gehlenita (C_2AS), C_2S/C_3S , y calcio-ferrita (C_2F). Se presentan las curvas de TG y DTG de L2 y L3 en la Figura 15. La existencia de una pérdida de masa entre 400-500 °C confirmó la presencia de CH en L2 y L3. Las fases mineralógicas explicaron por qué la escoria de cuchara L2 fue reactiva con CO_2 , lo que produjo productos de reacción con una contribución a la resistencia, y por qué la escoria de cuchara L3 se agrietó. Parece que las fases de silicato de calcio desempeñaron un papel crucial en el desarrollo de la resistencia. Aunque el contenido de C_2S para ambas muestras de escoria fue prácticamente idéntico, el contenido de C_3S varió significativamente (Tabla 6). Un contenido de C_3S del 31,1% en la escoria L2 fue 9 veces mayor que el valor obtenido para la escoria L3, en la que se observó que el contenido de C_3S fue del 3,6%. Aunque la escoria de cuchara exhibe en general un contenido mayor de C_2S en comparación con C_3S , la escoria de cuchara con un contenido elevado de C_3S , como la descrita en la presente memoria para la muestra L2, se ha informado previamente. Está bien establecido que las fases mineralógicas de la escoria están fuertemente controladas por la temperatura a la que se produce la escoria. Se estimó que la temperatura de la escoria de cuchara fundida fue de alrededor de 1500 °C (He et al. 2012); cuanto mayor es la temperatura de procesamiento de la escoria de acero fundida, mayor es la probabilidad de que se forme C_3S . Posch et al. (Posch et al. 2002) demostró que su escoria de cuchara con una basicidad de 2,1 tuvo contenidos de C_2S y C_3S del 9,6% y 24,7%, respectivamente. La escoria L2 con un contenido elevado de C_3S mostró resultados prometedores relacionados con la reactividad con CO_2 y el aumento de la resistencia por la carbonatación.

Los patrones de XRD para los polvos compactos de la escoria de cuchara L2 después de una carbonatación de 24 h, después de una carbonatación de 24 h seguida de una hidratación de 35 días, y después de una hidratación de 35 días se representan en la Figura 16 junto con los del polvo de escoria de referencia tal como se recibió. Al comparar las escorias tal como se recibieron y las carbonatadas, fue evidente que la carbonatación dio como resultado la precipitación de las fases de $CaCO_3$, y el consumo simultáneo de las fases de silicato de calcio y $Ca(OH)_2$ para formar los productos de carbonatación. Además, los resultados de XRD sugieren que la merwinita no fue reactiva con CO_2 . Mientras tanto, la ligera reducción de intensidad para los picos de mayenita puede indicar la reactividad débil de la mayenita con CO_2 . La reducción de la intensidad a 2θ de 18° tras la carbonatación se debió probablemente al consumo tanto del hidróxido de calcio como de la mayenita. Parece que los minerales de óxido de calcio unidos estructuralmente con componentes elementales (Mg, Fe o Al), distintos de sílice, mostraron una baja reactividad con CO_2 en comparación con las fases de silicato de calcio.

Los productos de reacción se pueden determinar mediante análisis de TG/DTG. Las curvas típicas de TG y DTG para los polvos compactos fabricados con la escoria L2 se representan en la Figura 17. Basándose en los picos de DTG, la pérdida de masa se puede dividir en tres regiones que fueron representativas de tres productos de reacción típicos: 105-400 °C, 400-500 °C y 500-900 °C. La pérdida de masa entre 105-400 °C representó la pérdida de agua debida a la deshidratación de C-S-H y C-A-H, la pérdida de masa entre 400-500 °C representó la pérdida de agua debida a la deshidratación de $Ca(OH)_2$, y la pérdida de masa entre 500-900 °C representó la pérdida de CO_2 debida a la descarbonatación de $CaCO_3$. La suposición de que la pérdida de masa entre 105-400 °C se debió a la deshidratación de C-S-H y C-A-H se basó en el hecho de que tanto el silicato de calcio como la mayenita se pueden hidratar, lo que genera productos de hidratación. Los productos de reacción se resumen en la Tabla 8. Al comparar las muestras hidratadas con las muestras carbonatadas, el contenido de hidróxido de calcio en la escoria carbonatada se redujo mientras el carbonato de calcio se incrementó significativamente. La formación de C-S-H+C-A-H y CH en la escoria hidratada fue indicativa de un comportamiento hidráulico lento. Aunque el contenido de C-S-H+C-AH fue similar en los

5 polvos compactos de escoria hidratada y carbonatada, la escoria carbonatada mostró una resistencia a la compresión mucho mayor. Se cree que esta resistencia mejorada se debe atribuir a la formación de carbonato de calcio. El contenido total de C-S-H+C-A-H más CaCO_3 , consideradas las fases dobles que contribuyen al aumento de la resistencia, fue mayor en la escoria carbonatada que en la hidratada. La resistencia a la compresión de 35 días fue 6 veces mayor en la muestra carbonatada que en la muestra hidratada. Los cristales de carbonato de calcio precipitados fortalecen el aglutinante de escoria de una manera equivalente a una forma de material compuesto reforzado particulado, lo que da como resultado una matriz más resistente. El pico en el ángulo de 18° en el patrón de XRD mostrado en las Figuras 4-6 fue una mezcla de hidróxido de calcio y mayenita. Aunque la carbonatación consumió aparentemente tanto el hidróxido de calcio como la mayenita, la reactividad de la mayenita con CO_2 es más débil. La hidratación lenta de la mayenita pudo contribuir a la formación de calcio-aluminato-hidrato (C-A-H).

Tabla 8: Productos de reacción en el aglutinante de escoria de cuchara (L2)

ID	Edad (días)	Pérdida de agua en CSH+CAH ^a	Pérdida de agua en CH ^b	Pérdida de CO_2 en CaCO_3^c	Ca(OH)_2^b	CaCO_3^c
L2 tal como se recibe, %	-	0,31	1,93	1,00	7,93	2,27
L2-0C+35H, %	35	3,31	2,82	1,06	11,59	2,41
L2-24C+0H, %	1	3,50	0,57	7,91	2,34	17,98
L2-24C+35H, %	36	3,00	0,61	7,18	2,51	16,32

^a Calculado basándose en la pérdida de masa entre 105-400 °C

^b Calculado basándose en la pérdida de masa entre 400-500 °C

^c Calculado basándose en la pérdida de masa entre 500-900 °C

15 Para mejorar el comportamiento de la carbonatación de la escoria de cuchara L3, se llevó a cabo un tratamiento térmico. El polvo de vidrio se mezcló con el polvo de escoria en una máquina de pulverización durante 30 segundos. Después se compactó el polvo mezclado en un molde de acero a una presión de 50 MPa para formar agregados prismáticos de 20x20x14 mm. Después se colocaron los polvos compactos en forma de agregados prismáticos en bandejas refractarias y se colocaron con cuidado dentro del horno. La temperatura del tratamiento térmico se ajustó a 20 1100 °C para minimizar el consumo de energía y maximizar la formación de silicatos dicálcicos. Se requirieron alrededor de 3,5 horas para que el horno alcanzase 1100 °C a una velocidad de 5 °C/min. Los agregados se mantuvieron a 1100 °C durante 30 minutos y después se retiraron del horno inmediatamente para enfriarlos al aire libre en condiciones ambientales a una velocidad de enfriamiento de 600 °C por hora con la ayuda de un ventilador de refrigeración. Se requirieron alrededor de 2 horas para enfriar los sedimentos hasta la temperatura ambiente. Los 25 polvos compactos agregados se molieron después hasta un polvo mediante el uso de un pulverizador hasta un número de Blaine de 286 kg²/m. En la presente memoria se hace referencia a la escoria de cuchara tratada resultante como L3T (la T indica "tratada"). El polvo de escoria tratada se usó después para fabricar nueve muestras de losas similares a las que se usaron en los ensayos L2 y L3. Se carbonataron seis durante 24 horas. De las seis, se ensayaron tres inmediatamente después de la carbonatación con respecto a la resistencia a la compresión, y tres se ensayaron 30 después de la hidratación posterior de 35 días. Además, se ensayaron tres como referencia de hidratación después de haberlas sellado en una bolsa de plástico durante 35 días. La composición química de la escoria de cuchara tratada (L3T) se presenta en la Tabla 9. La adición de vidrio de desecho incrementó el contenido de SiO_2 del 6,2 al 17,0%, más del doble que el contenido original. Esta adición se realizó con el fin de incrementar la reacción a alta temperatura entre la cal libre y la sílice para la formación final de silicatos de calcio. Como se muestra en la Tabla 9, el contenido 35 de cal libre cayó al 0,15% desde el 10,8%, lo que confirma que el tratamiento térmico ideado fue eficaz para combinar de manera beneficiosa la cal libre y la sílice para producir más silicatos dicálcicos. Con la ayuda del análisis semicuantitativo de XRD, se determinaron las fracciones de las fases de silicato de calcio de la muestra. En comparación con el material de escoria L3 sin tratar, el contenido de C_2S se incrementó del 9,3% al 20,3%. Como se esperaba, no hubo ningún cambio en la cantidad del componente C_3S , debido a que la temperatura empleada no fue 40 suficiente para favorecer la formación de esta fase. La Figura 18 muestra la posición de las composiciones normalizadas de L3 y L3T en el diagrama de fases cristalinas primarias del $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. La suplementación de sílice desplazó la composición original de la escoria de cuchara desde una región de cal muy saturada hasta una en la que predominó C_2S , que tuvo un valor de basicidad característicamente inferior (2,74 en comparación con el original, 9,27). Termodinámicamente, esto favoreció la cristalización de C_2S en la escoria modificada, y por tanto contribuyó a 45 un incremento perceptible de la reactividad con CO_2 .

Tabla 9: Composición química y fases de silicato de calcio de la escoria de cuchara tratada

Composiciones químicas (%)									Fases (%)	
ID	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	CO ₂	Cal libre	C ₂ S	C ₃ S
L3T	46,60	17,00	20,70	5,39	4,58	0,60	0,01	0,15	20,3	3,0

El comportamiento de carbonatación de la escoria de cuchara tratada L3T se caracterizó mediante la absorción de CO₂ de la reacción de carbonatación. Los polvos compactos de 127x76x12 mm se sometieron a un endurecimiento mediante carbonatación de 24 h a una presión de gas de 0,15 MPa. Las absorciones de CO₂ registradas mediante los tres métodos diferentes fueron de valores similares: 5,3% mediante el método del aumento de masa, 4,0% mediante el método de la curva de masa, y 5,1% mediante el analizador de CO₂ basado en infrarrojos. Se presenta una curva de masa típica en la Figura 12. La absorción absoluta fue menor en L3T que en L2. De forma similar a L2, la mayoría de la reacción de L3T se dio en las primeras dos horas. Fue evidente que el tratamiento térmico hizo que la escoria de cuchara L3 fuera reactiva con CO₂, aunque el grado de reactividad fue solamente la mitad que el de L2. Esto se atribuyó principalmente al contenido de silicato de calcio relativamente mayor (C₂S+C₃S= 40,6%) en la escoria L2 en comparación con el 23,3% en la escoria modificada L3T.

Se determinó la resistencia a la compresión de los polvos compactos modificados de L3T. Los resultados se resumen en la Tabla 10. Las muestras solamente hidratadas exhibieron propiedades hidráulicas bajas, en las que una hidratación de 35 días se tradujo en un aumento de la resistencia de 3,8 MPa. Esto fue solamente la mitad de la resistencia desarrollada en la escoria L2, posiblemente debido al bajo contenido de C₃S de la escoria tratada. No hubo agrietamiento generado por la hidratación, lo que confirmó adicionalmente la conversión de la cal libre en silicatos de calcio. El endurecimiento mediante carbonatación durante 24 horas incrementó la resistencia a la compresión de la escoria tratada hasta 25,9 MPa. Al llevar a cabo una combinación de carbonatación de 24 horas más un endurecimiento mediante hidratación de 35 días se elevó la resistencia a 26,7 MPa. Por lo tanto, parece que la hidratación posterior tras la carbonatación fue insignificante. Aunque que demuestra una mejora significativa, la escoria modificada L3T no pudo alcanzar una resistencia a la compresión tan elevada como la registrada para la muestra de escoria L2. Probablemente esto se pudo deber a un contenido inferior de silicato de calcio en la escoria L3T y una reactividad inferior en la carbonatación.

Tabla 10: Resistencia a la compresión de polvos compactos de escoria de cuchara tratada

ID	Tipo de escoria	Tiempo de carbonatación (h)	Presión de CO ₂ (MPa)	Hidratación posterior (días)	Edad de ensayo (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
L3T-0C+35H	L3T	0	-	35	35	3,8±0,9
L3T-24C+0H	L3T	24	0,15	0	1	25,9±4,9
3L3T-24C+35H	L3T	24	0,15	35	36	26,7±3,3

La Figura 19 muestra los patrones de XRD para la escoria L3T tras un tratamiento térmico, tras una carbonatación de 24 h, tras una carbonatación de 24 h seguida de una hidratación de 35 días y tras una hidratación de 35 días. La mayenita y los silicatos de calcio fueron las fases principales identificadas en la escoria tratada. El hidróxido de calcio se eliminó completamente mediante el tratamiento térmico. Esto se demostró mediante las curvas de TG en la Figura 20. La escoria tratada también mostró la presencia de merwinita, así como trazas de gehlenita y óxido de hierro y calcio. El contenido de las fases de silicato de calcio se estimó mediante el uso de un análisis semicuantitativo, y los resultados se muestran en la Tabla 9. La intensidad de los picos para mayenita disminuyó tras una hidratación de 35 días, lo que sugirió la formación de hidrato de aluminato de calcio. La mayenita se puede hidratar en presencia de agua (Segui et al. 2013). Una ligera reducción de la intensidad de mayenita tras la carbonatación sugiere la reactividad de la mayenita con el CO₂. Este fenómeno también se observó para L2. Además, la gehlenita no fue reactiva, ya que su pico no mostró ningún cambio durante el endurecimiento mediante carbonatación o hidratación. La presencia del pico de carbonato de calcio a un ángulo 2θ de 29° demuestra la reacción de carbonatación de las fases de silicato de calcio.

Las curvas de TG/DTG para la escoria tratada (L3T) sometida a diferentes condiciones de endurecimiento se presentan en la Figura 20, y los resultados cuantitativos se resumen en la Tabla 11. Las curvas de TG/DTG para la escoria tratada fueron planas, lo que confirmó la eliminación del hidróxido de calcio durante el tratamiento. La pérdida de agua entre 105-400 °C, que representa el contenido de C-S-H+C-A-H de la muestra, ensayada inmediatamente tras la carbonatación, mostró un incremento. La activación mediante carbonatación también incrementó el contenido

de carbonato de calcio, como se esperaba. La presencia de más partículas de carbonato de calcio en las fases hidratadas (C-S-H y C-A-H) ayudó a reforzar la estructura del compuesto resultante. El grado de aumento de la resistencia se puede medir, por lo tanto, mediante la cantidad de precipitación de CaCO_3 . La coexistencia de carbonatos de calcio con las fases hidratadas puede reforzar considerablemente este sistema de matriz compuesta.

5 Tabla 11: Productos de reacción en el aglutinante de escoria de cuchara tratada (L3T)

ID	Edad (días)	Pérdida de agua en CSH+CAH ^a	Pérdida de agua en CH ^b	Pérdida de CO_2 en CaCO_3^c	Ca(OH)_2^b	CaCO_3^c
L3T, %	-	0,11	0,05	0,02	0,21	0,05
L3T-0C+35H, %	35	1,56	1,00	0,73	4,12	1,65
L3T-24C+0H, %	1	3,49	1,02	3,64	4,19	8,27
L3T-24C+35H, %	36	4,04	0,93	5,03	3,82	11,43

^a Calculado basándose en la masa perdida a 105-400 °C

^b Calculado basándose en la masa perdida a 400-500 °C

^c Calculado basándose en la masa perdida a 500-900 °C

10 En este estudio, se investigó el comportamiento de carbonatación de dos escorias de cuchara típicas con respecto a su capacidad de servir como aglutinantes de cementación en aplicaciones de productos de construcción. Fueron representativas de dos grupos de escoria: una se puede activar mediante carbonatación en su forma tal como se recibe, y una necesita un tratamiento térmico con la adición de sílice. Algunas conclusiones que se pueden extraer son:

15 1. La escoria de cuchara con mayor contenido de SiO_2 y menor contenido de cal libre mostró una reactividad de carbonatación más intensa. La escoria tal como se recibe se pudo activar mediante dióxido de carbono para desarrollar una resistencia suficiente para las aplicaciones de productos de construcción. La alta reactividad de carbonatación se atribuyó a la presencia de fases de silicato de calcio. Se recomienda que se considere la sílice como agente de desoxidación en vez de alúmina durante la producción de acero para producir más silicatos de calcio en la escoria de cuchara y reducir el contenido de cal libre, lo que conduce a una escoria más reactiva con CO_2 para aplicaciones de valor añadido.

25 2. La escoria de cuchara con mayor contenido de aluminato o mayor contenido de cal libre no se pudo activar mediante dióxido de carbono para desarrollar la resistencia. El tratamiento térmico a 1100 °C con la adición de sílice fue eficaz para producir más fases de silicato dicálcico y mejorar la reactividad de carbonatación. El tratamiento térmico y la adición de sílice se pueden llevar a cabo cuando la escoria todavía está en la etapa fundida para producir una escoria de cuchara de valor añadido.

3. La resistencia definitiva de la escoria de cuchara activada mediante carbonatación se atribuyó a la estructura híbrida de los productos de carbonatación e hidratación. Las precipitaciones de carbonato de calcio fortalecieron la matriz C-S-H+C-A-H amorfa formando un material compuesto reforzado particulado.

30 4. Fueron las fases de C_2S y C_3S , no el contenido total de CaO , lo que determinó la reactividad de carbonatación de la escoria de cuchara. Las fases que albergaban calcio, tales como merwinita y gehlenita, no fueron reactivas con CO_2 y no contribuyeron a la resistencia mediante la activación con carbono.

Ejemplo 4: Tratamiento de escoria con vidrio para fabricar un cemento sintetizado

35 La escoria de cuchara fue el subproducto del proceso de fabricación de acero de la planta de Quebec Rio Tinto Iron & Titanium (RTIT). Debido al enfriamiento lento, la escoria de cuchara se produjo en forma de un polvo que después se comprimió en "tortas" porosas para su transporte y manipulación. Primero se trituraron las "tortas" de escoria de cuchara secas tal como se reciben, y después se pulverizaron adicionalmente hasta un polvo con un número de Blaine de 247 m^2/kg .

40 Se recogió vidrio de desecho del reciclaje de lámparas fluorescentes. Se trituraron y se molieron hasta un número de Blaine de 600 m^2/kg , y se usaron como fuente de sílice para sintetizar cemento. Se determinó la composición química de la escoria de cuchara y los materiales de vidrio de desecho mediante XRF, y los resultados se presentan en la Tabla 12. La escoria de cuchara mostró un 57% de CaO y el vidrio de desecho tuvo un 70% de SiO_2 . El contenido de cal libre de la escoria de cuchara tal como se recibe es un 10,8%, que se determina mediante el método de Franke de acuerdo con la norma ASTM C114. Se llevó a cabo un análisis semicuantitativo de XRD del contenido de silicato de calcio, es decir, C_2S y C_3S , de la escoria de cuchara para determinar la cantidad de C_2S y C_3S en la escoria original.

45 Se usó un método de calibración de 2 puntos para comparar las alturas de los picos en la mezcla de escoria de cuchara y TiO_2 (90% de escoria + 10% de TiO_2) con los de C_2S puro (100% de C_2S), C_3S puro (100% de C_3S) y TiO_2 puro

(100% de TiO₂) (Chung 1974). La escoria contuvo un 9,3% de C₂S y un 3,6% de C₃S.

Tabla 12: Composición química y fases de los materiales tal como se reciben

	Composiciones químicas (%)								Fases (%)	
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cal libre	C ₂ S	C ₃ S
Escoria de cuchara (L3)	57,55	6,21	23,17	3,55	5,04	0,02	0,16	10,8	9,3	3,6
Vidrio de desecho	4,89	70,68	1,62	0,22	3,08	0,48	16,06	-	-	-

5 Se prepararon diferentes lotes en los que se añadió vidrio de desecho a la escoria a diversos porcentajes en peso y se mezclaron individualmente en una máquina de pulverización durante 30 segundos. El polvo mezclado se compactó después en clíners cúbicos de 20x20x20 mm en un molde de acero a una presión de 50 MPa. Los clíners cúbicos se situaron en placas refractarias que después se colocaron en un horno de alta temperatura. La temperatura del horno se incrementó hasta la temperatura deseada a una velocidad de 5 °C/min. Cuando se alcanzó la temperatura deseada, se mantuvo constante durante 30 minutos, tras lo cual se extrajeron los clíners y se enfriaron rápidamente
10 dirigiendo una corriente de aire generada mediante un ventilador mecánico durante 2 horas. Los clíners cúbicos enfriados se molieron después hasta un polvo con un número de Blaine de 286 m²/kg pulverizándolos durante 2 minutos.

15 El comportamiento hidráulico del cemento sintetizado y su reactividad con CO₂ se basan claramente en la composición química de los materiales en bruto y la temperatura de síntesis. Se llevó a cabo un estudio paramétrico completo para optimizar el proceso.

20 Para determinar la proporción óptima vidrio/escoria, se estudiaron mezclas con un 10, 20, y 30 por ciento en peso de vidrio de desecho. Los clíners con diferentes proporciones vidrio/escoria se calentaron después hasta una temperatura constante de 1250 °C. El cemento sintetizado se moldeó en polvos compactos prismáticos de 20x20x12 mm y se activó mediante carbonatación durante 24 horas a una presión de gas de 0,15 MPa. La proporción óptima vidrio/escoria se eligió basándose en la resistencia a la compresión por la carbonatación.

Para optimizar adicionalmente el consumo de energía, se ensayaron diferentes temperaturas de síntesis, todas por debajo de 1250 °C. Se prepararon clíners mediante el uso de la proporción optimizada vidrio/escoria, y se sintetizaron a diferentes temperaturas de 700 °C, 800 °C, 1100 °C y 1200 °C. Se sintetizó Cemento a partir de cada uno de los clíners.

25 Para la evaluación del comportamiento del cemento sintetizado producido a partir de los clíners calentados a las diferentes temperaturas, se prepararon polvos compactos prismáticos de cemento con dimensiones de 20x20x12 mm. Se seleccionó un grosor de 12 mm para simular los productos de placas de fibrocemento. Para cada muestra prismática, se mezclaron 10 g del cemento sintetizado con 1 g de agua (agua/cemento = 0,1). Se moldearon mediante compactación a una presión de 12,5 MPa. Estas pastas de cemento prismáticas se activaron mediante carbonatación durante 2 horas a 0,15 MPa. Tras la carbonatación, la mitad de las muestras se ensayaron inmediatamente con respecto a la resistencia a la compresión, y la mitad de las muestras se sellaron para la hidratación posterior. El endurecimiento combinado incluyó una carbonatación constante seguida de una hidratación posterior durante periodos de 3, 14, y 35 días. Esto ayudaría a estudiar el efecto de la hidratación posterior sobre las características del cemento carbonatado. También se hicieron muestras de referencia y se sellaron en un recipiente de plástico para una hidratación de 35 días. Para destacar la eficacia del proceso de síntesis propuesto, los prismas preparados a partir de escoria tal como se recibe también se sometieron a las mismas condiciones de endurecimiento mediante carbonatación e hidratación.

40 Los valores de absorción de dióxido de carbono y de resistencia a la compresión registrados para el cemento sintetizado a diferentes porcentajes de vidrio de desecho se presentan en la Tabla 13. La adición del 10 al 20% de vidrio de desecho proporciona una resistencia a la compresión de hasta 36 MPa tras una carbonatación de 24 horas con una absorción de CO₂ de alrededor del 9,6%. Un incremento adicional del contenido de vidrio de desecho hasta un 30% dio como resultado una disminución tanto de la resistencia como de la absorción de dióxido de carbono. Por esta razón, se seleccionó el 20% como porcentaje óptimo de la proporción vidrio/escoria. Este estudio paramétrico se llevó a cabo mientras se llevó a cabo la síntesis a una temperatura fija de 1250 °C. La Tabla 14 presenta los resultados de la absorción de CO₂ y la resistencia a la compresión para cementos preparados mediante el uso de una proporción vidrio/escoria del 20% y sintetizados a diferentes temperaturas que oscilaron de 700 a 1200 °C. Aunque el incremento de la temperatura no tuvo un efecto significativo sobre la absorción de dióxido de carbono, tuvo un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión. Cuanto mayor fue la temperatura de síntesis, mayor fue la resistencia a la compresión. En la Tabla 14, se adquirió la resistencia mediante la activación por carbonatación de 2 horas. En comparación con las 24 horas de la Tabla 13, un tiempo de proceso más corto fue económicamente beneficioso. El aumento de la resistencia mediante una carbonatación de 2 h fue comparable a la carbonatación de 24 h si los

5 cementsos se procesaron a alrededor de 1200 °C. La elección de la temperatura fue para proporcionar condiciones optimizadas que aborasen con éxito la practicabilidad, la alcalinidad equivalente, el contenido de cal libre, la resistencia, el consumo de energía y las implicaciones ambientales. La consideración de estos parámetros conduce a la conclusión de que la temperatura de síntesis de 1100 °C con una proporción vidrio/escoria del 20% dio como resultado un cemento adecuado para la activación mediante carbonatación con un consumo de energía relativamente bajo.

Tabla 13: Resultados de cementos sintetizados con diferentes porcentajes de vidrio de desecho

ID	WTL1	WTL2	WTL3
Contenido de vidrio de desecho (%)	10	20	30
Temperatura de síntesis (°C)	1250	1250	1250
Tiempo de carbonatación (h)	24	24	24
Absorción de CO ₂ (%)	9,6±0,7	9,7±0,5	3,1±0,3
Resistencia a la compresión (MPa)	36,0±19,2	36,7±13,8	13,1±0,4

Tabla 14: Resultados de cementos sintetizados a diferentes temperaturas

ID	WTL4	WTL5	WTL6	WTL7
Contenido de vidrio de desecho (%)	20	20	20	20
Temperatura de síntesis (°C)	700	800	1100	1200
Tiempo de carbonatación (h)	2	2	2	2
Absorción de CO ₂ (%)	5,8±1,9	8,1±0,0	5,0±0,3	6,6±0,7
Resistencia a la compresión (MPa)	15,6±1,1	25,6±1,6	32,7±4,4	34,4±1,3

10 La Tabla 15 muestra la composición química de la escoria de cuchara sintetizada con un 20 %p de vidrio de desecho a 1100 °C. Se calculó que el álcali equivalente del cemento sintetizado fue un 0,7%; ligeramente mayor que el valor del 0,6% sugerido por la norma ASTM C150. El contenido elevado de óxido de sodio del vidrio de desecho hizo una contribución al nivel elevado de alcalinidad del cemento sintetizado. A pesar del nivel elevado de alcalinidad, la reacción álcali-silicato no se puede iniciar ya que la carbonatación mitiga el potencial de la reacción. Se midió que la finura del cemento sintetizado fue de 286 m²/kg. El vidrio de desecho tiene un contenido elevado de sílice, y su adición a la escoria de cuchara incrementa el contenido total de sílice, y también reduce las fracciones totales de contenidos de CaO y Al₂O₃ en el cemento sintetizado. Esta modificación desplaza la composición del material en el diagrama de fases cristalinas primarias del CaO-Al₂O₃-SiO₂, como se muestra en la Figura 18. El desplazamiento intencionado fue eficaz para reducir el contenido de cal libre del 10,8% en la escoria tal como se recibe al 0,15% en el cemento sintetizado, lo que sugiere que la cal libre reaccionó con la sílice añadida para favorecer la formación de las fases deseadas de silicato de calcio. Como resultado, se redujo significativamente el contenido de cal libre y se incrementó el contenido de C₂S.

Tabla 15 Composición química del cemento sintetizado (%)

	Composiciones químicas (%)								Fases (%)	
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cal libre	C ₂ S	C ₃ S
T1100 (L3T)	46,60	17,00	20,70	5,39	4,58	0,20	0,60	0,15	18,2	1,4

25 Los patrones de XRD de la escoria tal como se recibe y del cemento sintetizado se ilustran en la Figura 21. Se puede observar que la escoria tal como se recibe consistió principalmente en cal libre y mayenita, una fase de aluminato de calcio. Otras fases identificadas estuvieron en cantidades mínimas, que incluyeron gehlenita, silicato(s) de calcio, e hidróxido de calcio. La mayenita siguió siendo una de las fases constituyentes principales incluso después de completarse el proceso de síntesis con vidrio. Otros estudios también han relatado hallazgos similares con respecto a la presencia de mayenita (Uibu et al. 2011). Mientras tanto, se redujeron las intensidades de los picos de las fases de

hidróxido de calcio y de óxido de calcio libre, lo que sugiere una reacción con la sílice suplementada para formar fases basadas en silicato de calcio. Los resultados del contenido de cal libre obtenidos de acuerdo con el método de Franklin confirmaron la observación anterior. Se cree que las fases de silicato de calcio (C₂S/C₃S) son las fases principales que confieren a los materiales cementosos su comportamiento hidráulico y su reactividad con CO₂ (Rostami et al. 2011).

5 El contenido de silicato de calcio de la escoria tal como se recibe y del cemento sintetizado se cuantificó a través del análisis de QXRD. Como se muestra en la Tabla 15, el contenido de C₂S de la escoria sintetizada con vidrio de desecho se incrementó del 9,2% al 18,3%, mientras el contenido de C₃S no cambió significativamente. Un incremento en el contenido de C₂S confirma adicionalmente que el proceso de síntesis fue eficaz para combinar la cal libre con la sílice del vidrio para formar las fases de silicato de calcio. No se esperaba la formación de C₃S, ya que las reacciones asociadas con esta fase requieren temperaturas mayores (Taylor 1997). Se cree que la implementación de una temperatura mayor pudo dar como resultado la formación de C₃S, sin embargo, puede no ser justificable desde un punto de vista económico y práctico. Con el fin de ahorrar energía, se adoptó una temperatura de 1100 °C para este estudio.

15 La Figura 22 muestra las curvas de TG/DTG de la escoria tal como se recibe y del cemento sintetizado. Para la escoria tal como se recibe, un pico en la curva de DTG entre 450 °C y 550 °C sugiere la presencia de CH como se observó en el patrón de XRD. No se registró una pérdida de masa para este cemento sintetizado, sin carbonatar, lo que sugiere que no hubo presentes fases de carbonatos ni de hidratos de silicato de calcio en el cemento. El hidróxido de calcio existente en L3 se eliminó durante el proceso de síntesis, ya que se descompuso a la temperatura de 500 °C.

20 Los resultados de la resistencia a la compresión y la absorción de dióxido de carbono de las pastas preparadas a partir de la escoria de cuchara tal como se recibe y del cemento sintetizado, sometidos a diversos regímenes de endurecimiento, se presentan en la Tabla 16. Los resultados del cemento sintetizado también se muestran en la Tabla 16. El proceso de síntesis hizo que el material no hidráulico mostrase un comportamiento de hidratación. La resistencia a la compresión de 35 días de la pasta de cemento hidratada (T1100-1) exhibió un aumento medible de la resistencia de 9,1 MPa tras la hidratación de 35 días solamente. Esto fue indicativo de la formación de silicatos de calcio durante el proceso de síntesis. Cuando se expuso a un endurecimiento mediante carbonatación, el cemento mostró un aumento rápido de la resistencia. La resistencia a la compresión de las pastas de cemento se incrementó inmediatamente tras 2 horas de carbonatación, y alcanzó 23,1 MPa. Como se muestra en la Figura 23, la hidratación posterior de los cementos carbonatados hizo contribuciones adicionales al aumento de la resistencia. Las resistencias a la compresión de las pastas de cemento carbonatadas después de 3, 14 y 35 días de hidratación posterior alcanzaron valores de 37,3, 43,6 y 45,7 MPa, respectivamente. La carbonatación pareció intensificar las propiedades hidráulicas del cemento sintetizado. Se cree que este fenómeno se dio a medida que más mayenita fue accesible para la hidratación después de que se consumiera el C₂S unido a lo largo del periodo de carbonatación. Las muestras carbonatadas durante 2 horas y seguido de hidratación de 35 días (T1100-5) mostraron un pico a 247 °C en la curva de DTG (Figura 24), lo que sugirió la formación de aluminato de calcio hidratado; este pico no se puede observar en la muestra hidratada (T1100-1). Como se presenta en la Tabla 16, la absorción de CO₂ de los cementos carbonatados determinada basándose en el método del aumento de masa tras la carbonatación de 2 horas fue menor del 5%. A pesar de la baja absorción de dióxido de carbono, el aumento de la resistencia fue bastante significativo. Se cree que los cristales de carbonato de calcio precipitados fortalecen los productos de hidratación de una manera equivalente a una forma de material compuesto particulado. La dispersión de los carbonatos relativamente más resistentes en la fase de C-S-H+C-A-H incrementó la microestructura del material compuesto, y confirió a la pasta de material compuesto mejores propiedades mecánicas. Como analogía, se puede comparar el sistema C-S-H/C-A-H-CC con los sistemas de pasta de cemento y agregados u hormigón y fibras en los que el agregado o la fibra dispersada en la pasta de cemento o el hormigón crean un sistema compuesto con una resistencia elevada.

Tabla 16 Carbonatación e hidratación de pastas de cemento sintetizadas

ID	Tipo de escoria	Carbonatación (h)	Hidratación (días)	Absorción de CO ₂ (%)	Resistencia a la compresión (MPa)
L3-24C+0H	Tal como se recibe	24	0	-	Agrietado
L3-0C+35H	Tal como se recibe	0	35	-	Agrietado
T1100-1	Tratado	0	35	-	9,1±0,5
T1100-2	Tratado	2	0	4,0±0,2	23,1±2,9
T1100-3	Tratado	2	3	4,7±0,3	37,3±4,4
T1100-4	Tratado	2	14	4,8±0,2	43,6±6,4
T1100-5	Tratado	2	35	4,8±0,1	45,7±4,0

45 24C=24 horas de carbonatación

0C=Sin carbonatación

35H=35 días de hidratación

0H=Sin hidratación

5 La Figura 24 ilustra las curvas de TG y DTG de muestras carbonatadas/hidratadas hechas con el cemento sintetizado. Se consideró la pérdida de masa experimentada por encima de 550 °C para calcular la absorción de CO₂. Como se presenta en la Tabla 17, los valores de absorción de CO₂ tras una carbonatación de 2 horas (T1100-2) obtenidos a partir de las curvas de TG fueron del mismo orden de magnitud que los determinados mediante el método del aumento de masa de la Tabla 15. Como se esperaba, no se observó una pérdida de masa para la muestra hidratada (T1100-1) tras 550 °C, lo que indica la ausencia de carbonato. La pérdida de agua del hidrato de silicato de calcio y del hidrato de aluminato de calcio de los cementos endurecidos se midió basándose en la pérdida de masa entre 105 °C y 450 °C, y mostró un incremento al incrementarse el tiempo de hidratación. Las curvas de DTG de los cementos carbonatados que se hidrataron posteriormente durante 3, 14 y 35 días mostraron constantemente un incremento de la intensidad de los picos en la Figura 24 con respecto a la carbonatación sin hidratación (T1100-2). Esta pérdida de masa incrementada experimentada por los cementos sometidos a hidratación posterior fue indicativa del incremento de la formación de C-S-H+C-A-H debida a la hidratación. La otra prueba de la hidratación se observó mediante el incremento de Ca(OH)₂ en los cementos carbonatados. El cemento relativamente hidratado había mostrado el Ca(OH)₂ más bajo, lo que explicó la baja resistencia por hidratación después de 35 días de hidratación. Aunque el incremento en el contenido de C-S-H+C-A-H en la hidratación posterior no fue proporcional al tiempo de endurecimiento, el cemento tras la carbonatación de 2 h y la hidratación de 35 días fue mucho más resistente que el cemento tras la hidratación de 35 días (45,7 MPa frente a 9,1 MPa), lo que sugirió la acción compuesta por la formación simultánea de fases de C-S-H+C-A-H y CaCO₃. Fue evidente que la carbonatación había estimulado la hidratación posterior, lo que se atribuyó posiblemente a los carbonatos de calcio producidos mediante la carbonatación. Los carbonatos pueden actuar como núcleos de calcita para la hidratación posterior.

Tabla 17: Productos de reacción de pastas de cemento sintetizadas carbonatadas e hidratadas

Muestra	Edad (días)	Pérdida de agua de CAH+CSH	Pérdida de agua de CH	Pérdida de CO ₂ (%)	Ca(OH) ₂ (%)*	Contenido de CaCO ₃ (%)**
T1100-1	35	3,30	0,15	0,5	0,62	1,02
T1100-2	2 horas	2,76	1,13	2,7	4,65	6,11
T1100-3	3	3,42	1,24	3,6	5,10	8,14
T1100-4	14	3,64	1,30	3,8	5,34	8,66
T1100-5	35	3,76	1,17	4,0	4,81	9,16

25 * Calculado basándose en la masa perdida a 450-550 °C

** Calculado basándose en la masa perdida a 550-850 °C

30 La Figura 25 muestra los patrones de XRD del cemento sintetizado que había experimentado diferentes regímenes de endurecimiento. Es perceptible que aparecieron picos de carbonato de calcio en los cementos carbonatados, ya que la precipitación de esta fase se dio a partir de la reacción del CO₂ con las fases de silicato de calcio. Comparando los patrones de muestras sin carbonatar y carbonatadas, se puede concluir que la gehlenita no reaccionó con CO₂ y no contribuyó al aumento de la resistencia. Mientras tanto, una ligera reducción de los picos de mayenita indica su reactividad potencial con CO₂. Los patrones de XRD del cemento sintetizado hidratado y carbonatado también revelaron una ligera reducción de la intensidad de mayenita a lo largo del periodo de hidratación de 35 días, lo que sugiere la hidratación de la mayenita que dio como resultado la formación de C-A-H.

35 Los resultados de este estudio muestran que se puede usar vidrio de desecho como fuente de sílice para favorecer la formación de fases de silicato de calcio, incrementar la reactividad de la carbonatación e inducir un aumento considerable de la resistencia por la hidratación.

40 El cemento sintetizado mostró el desarrollo de resistencia cuando se sometió a la carbonatación, la hidratación, o una combinación de ambas. La mejor práctica con este cemento especial es la carbonatación en primer lugar para una resistencia temprana y la hidratación en segundo lugar para una resistencia tardía. La combinación de un 80% de finos de escoria de cuchara con un 20% de vidrio de desecho sintetizado a 1100 °C dio como resultado un cemento estable capaz de adquirir resistencia cuando se somete a endurecimiento mediante carbonatación e hidratación. Mediante el uso de vidrio de desecho como aditivo se pudo convertir una escoria de cuchara no reactiva en un producto aglutinante de valor añadido. Los resultados también sugirieron que el endurecimiento mediante carbonatación favoreció el aumento de la resistencia asociada a la hidratación posterior. La acción compuesta generada por el carbonato de calcio en una matriz C-S-H-C-A-H desempeñó finalmente un papel importante en la adquisición de resistencia.

Ejemplo 5: Tratamiento de una escoria con ceniza volante para fabricar un cemento sintetizado

5 La escoria de cuchara es la misma que se usó con el vidrio del Ejemplo 4. Primero se trituraron las "tortas" de escoria de cuchara seca tal como se reciben, y después se pulverizaron adicionalmente hasta un polvo con un número de Blaine de 247 m²/kg. La ceniza volante de tipo F con un número de Blaine de 438 m²/kg procedente de Alberta, Canadá, se introdujo en la escoria de cuchara como fuente de óxido de sílice. La composición química de la escoria de cuchara y los materiales de ceniza volante se obtuvieron mediante XRF, y los resultados se presentan en la Tabla 18. La escoria de cuchara ha mostrado un 57% de CaO y la ceniza volante tiene un 54% de SiO₂.

Tabla 18: Composición química de los materiales en bruto y del cemento producido

	Composición química (%)								Fases (%)		
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	*Na ₂ O ^e	Cal libre	C ₂ S	C ₃ S
Escoria de cuchara (L3)	57,55	6,21	23,17	3,55	5,04	0,02	0,16	0,17	10,8	9,3	3,6
Ceniza volante	11,3	54,39	23,65	3,9	1,17	0,75	2,91	3,42	-	-	-
Escoria de cuchara tratada (F1250)	42,99	16,92	25,26	6,51	4,22	0,03	0,22	0,24	0,11	13,5	1,9

*Na₂O^e=Na₂O+0,658×K₂O

10 Se sintetizó cemento según las siguientes etapas. Se añadió la ceniza volante a la escoria en porcentajes en peso variables y se mezcló individualmente en una máquina de pulverización durante 30 segundos. Después se compactó el polvo mezclado en un molde de acero de 20x20x20 mm a una presión de 50 MPa. Los agregados se situaron en placas refractarias que después se colocaron en un horno de alta temperatura. La temperatura del horno se incrementó después hasta la temperatura deseada a una velocidad de 5 °C/min. Cuando se alcanzó la temperatura deseada, el

15 horno se mantuvo a esa temperatura durante 30 minutos. Después del calentamiento, las muestras compactadas se retiraron del horno inmediatamente para enfriarlas al aire libre en condiciones ambientales a una velocidad de enfriamiento de 600 °C por hora con la ayuda de un ventilador de refrigeración. Los clínkers cúbicos enfriados se molieron después hasta un polvo con un número de Blaine de 202 m²/kg pulverizándolos durante 2 minutos.

20 El comportamiento hidráulico del cemento sintetizado y su reactividad con CO₂ se basan claramente en la composición química de los materiales en bruto y la temperatura de síntesis. Por esta razón, se llevó a cabo un estudio paramétrico completo para optimizar el proceso.

25 Para determinar la ceniza volante óptima, se produjeron unos cuantos lotes de ensayo de cemento introduciendo la ceniza volante en la escoria de cuchara en un 20, 30, 40 y 50% del peso de la escoria de cuchara. Después de preparar los agregados de clínkers a partir de cada mezcla, se calentaron hasta 1250 °C. En la siguiente etapa, se activaron con CO₂ muestras de 20x20x12 mm hechas con el cemento producido. Este proceso se realizó carbonatando las muestras durante 24 horas a una presión de 0,15 MPa en la cámara de carbonatación. Se eligió el porcentaje óptimo de ceniza volante basándose en los criterios de resistencia a la compresión (resistencia medida inmediatamente tras la carbonatación).

30 Para determinar la temperatura óptima de formación de clínkers, la mezcla de escoria de cuchara y de ceniza volante se sintetizó a diversas temperaturas, que incluyeron 800 °C, 900 °C, 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C, y 1250 °C. Las mezclas se prepararon mediante el uso del porcentaje óptimo de ceniza volante (30%). Las propiedades mecánicas y químicas de las muestras hechas con el cemento producido se examinaron tras someterlas a carbonatación. Finalmente, la vía de procesamiento final elegida fue una que aseguró una resistencia óptima a la compresión, la absorción de dióxido de carbono, un contenido mínimo de cal libre y un nivel controlado de alcalinidad.

35 Se usó un gas CO₂ con una pureza del 99,5% para la carbonatación de la escoria de acero. El gas CO₂ se calentó a temperatura ambiente y se inyectó en la cámara a una presión de 0,15 MPa. Se usó un regulador para mantener una presión constante y asegurar que el dióxido de carbono consumido por la muestra se repuso continuamente.

40 Tras determinar el porcentaje óptimo de ceniza volante y la temperatura de formación de clínkers, el cemento se produjo en cantidades mayores para el estudio en bruto. Se prepararon muestras con dimensiones de 20x20x12 mm a partir del cemento sintetizado. Para cada muestra prismática, se mezclaron 10 g de cemento y 1 g de agua (agua/escoria=0,10) y se compactaron a una presión de 12,5 MPa aplicada al molde de acero mediante un punzón. Estas muestras se sometieron a carbonatación durante 2 horas a 0,15 MPa. A continuación, se examinó el efecto combinado de la carbonatación y la hidratación para un aumento máximo de la resistencia. El endurecimiento combinado incluyó una etapa de carbonatación constante seguida de una hidratación posterior durante periodos de 0,

45 3, 14, y 35 días. Las muestras de referencia sin carbonatar se dejaron hidratarse simplemente durante 35 días en condiciones selladas. Esto ayudaría a estudiar el efecto de la hidratación posterior sobre las características de las

muestras carbonatadas.

El estudio paramétrico se llevó a cabo para determinar las adiciones suplementarias óptimas de ceniza volante y la temperatura de formación de clínkers. Inicialmente se eligió una temperatura arbitraria de 1250 °C y se fijó mientras se preparaban diferentes mezclas en bruto a partir de escoria de cuchara y ceniza volante. La Tabla 19 presenta los resultados de resistencia a la compresión y absorción de CO₂ para el cemento producido en porcentajes variables de ceniza volante tras carbonatarlo durante 24 horas. Como se ilustra en la Figura 26, un incremento en el porcentaje de ceniza volante del 20% al 30% incrementó la resistencia a la compresión (medida inmediatamente tras la carbonatación) desde 38,3 MPa hasta 45,7 MPa. Mientras tanto, la introducción de más ceniza volante en las mezclas no se comportó de manera proporcional, y estas muestras mostraron una resistencia inferior a la compresión. Los valores de absorción de dióxido de carbono para las muestras hechas con escoria-20% de ceniza volante y escoria-30% de ceniza volante fueron casi idénticos, y mayores en comparación con el cemento producido con un 40% y 50% de ceniza volante, lo que sugiere que el porcentaje óptimo de ceniza volante fue de alrededor del 30%. Para optimizar el consumo de energía, se emplearon diferentes temperaturas para el procesamiento de la mezcla seleccionada de escoria y ceniza volante. Las diferentes temperaturas de procesamiento fueron 800 °C, 900 °C, 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C y 1250 °C, y los resultados de resistencia a la compresión y absorción de dióxido de carbono tras 2 horas de carbonatación se presentan en la Tabla 20. Los resultados revelan que existe un incremento gradual en la resistencia a la compresión con el incremento de la temperatura de formación de clínkers; sin embargo, la absorción de CO₂ siguió siendo relativamente igual para las diversas temperaturas. Considerando los valores de los análisis comparativos, el porcentaje óptimo de ceniza volante y la temperatura de formación de clínkers para producir el cemento a partir de escoria de cuchara y ceniza volante fue del 30% y 1250 °C, respectivamente. Aunque los tratamientos térmicos a mayor temperatura podrían haber proporcionado potencialmente una resistencia mayor, basándose en la tendencia observada, el programa experimental optó por limitar la temperatura de formación de clínkers a 1250 °C por una cuestión de eficacia energética y practicabilidad (la producción de cemento corriente se lleva a cabo normalmente a 1450 °C).

Tabla 19: Composición química de los materiales en bruto y del cemento producido

ID	FTL1	FTL2	FTL3	FTL4
Contenido de ceniza volante (%)	20	30	40	50
Temperatura de formación de clínkers (°C)	1250	1250	1250	1250
Tiempo de carbonatación (h)	24	24	24	24
Resistencia a la compresión (MPa)	38,3±12,0	45,7±10,3	8,2±1,7	6,0±0,9
Absorción de dióxido de carbono (%)	8,9±0,1	6,5±0,3	3,4±0,2	1,6±0,4

Tabla 20: Resultados de cementos producidos a diferentes temperaturas de formación de clínkers

ID	FTL5	FTL6	FTL7	FTL8	FTL9	FTL10
Contenido de ceniza volante (%)	30	30	30	30	30	30
Temperatura de formación de clínkers (°C)	800	900	1000	1100	1200	1250
Tiempo de carbonatación (h)	2	2	2	2	2	2
Resistencia a la compresión (MPa)	10,1±2,2	10,2±1,8	7,4±2,2	11,7±2,2	15,3±1,3	24±6,2
Absorción de dióxido de carbono (%)	3,9±0,8	4,0±0,1	5,0±0,6	3,4±0,6	7,4±0,7	4,1±0,1

Las composiciones químicas del cemento producido con un 30% de ceniza volante a 1250 °C también se presentan en la Tabla 18. El cemento sintetizado mostró un contenido menor de CaO y contenidos mayores de SiO₂ y Al₂O₃ en comparación con la escoria de cuchara. Esto último se atribuye al aditivo de ceniza volante, que es intrínsecamente elevado en SiO₂ y Al₂O₃. Esta modificación desplaza la composición del material en el diagrama de fases cristalinas primarias del CaO-Al₂O₃-SiO₂ hacia la producción de la fase de C₂S. El contenido de cal libre de la escoria de cuchara, que se considera una fuente de problemas para las aplicaciones de construcción, cayó del 10,80% al 0,11%, lo que indica que este óxido se consumió durante la producción del cemento, y se formaron silicatos de calcio tras la reacción con sílice. Zong et al. (2009) introdujo ceniza volante al 5% como aditivo para cambiar la estructura de la escoria para

mejorar su triturabilidad. En su estudio, la mezcla de escoria y ceniza volante se fundió a alta temperatura, y el estado fundido se enfrió después rápidamente mediante enfriamiento con aire a alta presión. Su escoria modificada mostró un contenido menor de CaO libre y contenidos mayores de CS y β -C₂S. Una observación que es importante mencionar es la relación compositiva entre la proporción de CaO y SiO₂ en la mezcla en bruto, o la proporción de basicidad. Independientemente de la fuente o tipo de aditivo, se descubrió que la producción de cemento a partir de una escoria de cuchara es factible llevando la proporción de basicidad (CaO/SiO₂) hasta 2,6, conseguido en este estudio por medio del uso de ceniza volante.

El patrón de XRD del cemento se ilustra en la Figura 27. La identificación de las fases sugiere que las fases principales del cemento incluyeron mayenita y gehlenita, mientras se detectó di-calcio ferrita, óxido de calcio y merwinita en cantidades mínimas. El valor de cal libre reveló una presencia insignificante en la muestra, lo que confirmó los hallazgos del análisis de XRD. Se cree que la adición de ceniza volante, que se reveló que es rica en sílice y alúmina, contribuyó a la generación de más gehlenita durante el proceso de formación de clínkers. Al ejecutar el proceso de formación de clínkers con ceniza volante se eliminó el hidróxido cálcico de la escoria de cuchara. Como se muestra en la Tabla 18, los resultados de QXRD sugieren que el contenido de C₂S del cemento producido con un 30% de ceniza volante a 1250 °C se incrementó un 45% en comparación con la escoria de cuchara.

Como se muestra en la Figura 28, la curva de TG del cemento no mostró una pérdida de peso. Esto significa que no hubo presentes fases proclives a la descomposición térmica en el cemento producido. La línea plana de 450 °C a 550 °C en la curva de DTG para el cemento confirma la eliminación de la fase de hidróxido cálcico.

La Tabla 21 muestra los resultados de la resistencia a la compresión y la absorción de CO₂ para las muestras hechas con el cemento producido que se sometieron a una carbonatación de 2 horas y a periodos variables de hidratación posterior, con la excepción de la primera muestra que se sometió solamente a hidratación. Los resultados muestran que las muestras sin carbonatar adquirieron una resistencia relativamente considerable después de 35 días de hidratación, lo que indica que el proceso de formación de clínkers favoreció la formación de fases hidráulicas que no estuvieron presentes previamente ni en la escoria ni en la ceniza volante. Como se muestra en la Figura 29, el incremento en el tiempo de hidratación de la muestra carbonatada incrementó la resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión de las muestras ensayadas inmediatamente después de 2 horas de carbonatación alcanzó una media de 14,4 MPa, y se incrementó adicionalmente hasta 34,2 MPa cuando las muestras procesadas de forma similar se sometieron a 35 días de hidratación. La resistencia a la compresión de la muestra carbonatada (hecha con el cemento sintetizado) sometida a una hidratación de 35 días fue mayor en comparación con la resistencia a la compresión de la muestra carbonatada más la resistencia a la compresión de la muestra sin carbonatar hidratada durante 35 días. La carbonatación de las muestras pareció mejorar la reacción de hidratación, tal como se observó por el aumento posterior de la resistencia y comparado con los resultados de resistencia de la muestra solamente hidratada. En otras palabras, la carbonatación favoreció el aumento de la resistencia. Como también se muestra en la Tabla 21, las absorciones de dióxido de carbono de las muestras hechas con el cemento producido fueron coherentes, y todos los valores obtenidos fueron menores del 3 %p después de someterlas a 2 horas de carbonatación. Merece la pena indicar que, aunque la absorción de dióxido de carbono no fue significativa, la resistencia a la compresión alcanzó valores potencialmente suficientes para una demostración práctica. Se cree que el aumento incrementado de la resistencia que surge del endurecimiento implementado es resultado de la acción compuesta generada por los cristales de carbonato de calcio precipitados y los productos de hidratación. Basándose en este caso, incluso las pequeñas absorciones de dióxido de carbono pueden corresponder a una mejora mecánica considerable y a una resistencia elevada en el producto final.

Tabla 21: Resistencia a la compresión de las muestras endurecidas con edades diferentes

ID	Carbonatación (h)	Hidratación (días)	Absorción de CO ₂ (%)	Resistencia a la compresión (MPa)
F1250-1	0	35	-	13,9±2,1
F1250-2	2	0	2,5±0,3	14,4±1,7
F1250-3	2	3	2,6±0,2	23,3±2,9
F1250-4	2	14	2,6±0,0	26,1±3,8
F1250-5	2	35	2,4±0,5	34,2±2,0

La Figura 30 muestra las curvas de TG/DTG de muestras sometidas a diferentes regímenes de endurecimiento. Se calculó la absorción de CO₂ de las muestras carbonatadas considerando la pérdida de masa experimentada por encima de 550 °C. Como se presenta en la Tabla 21, se puede observar que los valores de absorción de CO₂ calculados basándose en el aumento de masa y los métodos de TG fueron casi equivalentes. La pérdida de masa de 105 °C a 450 °C representa los productos de hidratación. El contenido de C-S-H y CH de las muestras carbonatadas se incrementó al incrementarse el periodo de hidratación posterior. Aunque los productos de hidratación de la muestra

hidratada (F1250-1) fueron mayores que los productos de hidratación de la muestra carbonatada expuesta a una hidratación durante 35 días, la resistencia a la compresión de la muestra carbonatada (F1250-5) fue significativamente mayor debido a la acción compuesta. Por lo tanto, se puede concluir que la coexistencia de carbonatos de calcio y productos de hidratación en un sistema cementoso contribuye a una mejor resistencia que los sistemas hidratados únicamente basados en C-S-H para la contribución a la resistencia.

La Figura 31 ilustra los patrones de XRD del cemento sin endurecer, del cemento hidratado y de las muestras carbonatadas sometidas a periodos variables de hidratación posterior. Al comparar los patrones de la muestra carbonatada respecto del polvo sin endurecer, se puede observar que la fase de silicato de calcio se consume durante la carbonatación para formar la fase de carbonato de calcio, indicada mediante la etiqueta "4" en la figura. La baja intensidad del pico a 2θ de 29° refleja la baja absorción de CO_2 alcanzada por esta muestra. La gehlenita no reaccionó de manera eficaz con el CO_2 , ya que la intensidad de sus picos respectivos no cambió sustancialmente tras el endurecimiento mediante carbonatación. Mientras tanto, una ligera reducción de los picos de mayenita sugiere su baja reactividad con el dióxido de carbono. Los picos para la fase de CH fueron de una intensidad débil característica. Debido a que se observó que no hubo saltos significativos en el pico de CH para las muestras carbonatadas sometidas a 0, 3, 14 y 35 días de hidratación, se puede concluir que se generaron solamente cantidades pequeñas de CH a lo largo de este periodo. Vale la pena indicar que la intensidad de las fases no carbonatables (o no reactivas con CO_2), tales como la merwinita y gehlenita, siguió siendo constante en las diversas edades de endurecimiento. En otras palabras, el calcio, si se une a Si/Mg o Si/Al, no puede participar en una reacción con el dióxido de carbono.

Es posible fabricar cemento fabricado únicamente a partir de materiales de desecho como un cemento de bajo consumo de energía. En vez de caliza, una fuente típica de óxido de calcio en la producción de cemento, se introdujo la escoria de cuchara como sustituto adecuado de la caliza. La producción de cemento a partir de materiales de desecho es viable a una temperatura que es 200°C inferior a la de la producción de cemento Portland. El menor consumo de energía, la conservación de los recursos naturales, y la reducción de los vertidos son algunos de los beneficios importantes obtenidos a partir de la implementación de tal proceso a nivel práctico.

En este programa experimental, la caliza se sustituyó completamente por escoria de cuchara para producir un cemento respetuoso con el medio ambiente. Se introdujo la ceniza volante para que reaccionase con la escoria de cuchara a alta temperatura para favorecer la formación de fases de silicato de calcio. Las mezclas de escoria de cuchara y de ceniza volante se sometieron a un proceso de formación de clíners optimizado ideado para favorecer las fases de silicato de calcio. El cemento sintetizado exhibe un material más respetuoso con el medio ambiente y más eficaz energéticamente que el cemento Portland convencional.

El cemento sintetizado mostró un desarrollo de resistencia cuando se sometió a carbonatación, hidratación, y ambas combinadas. Los resultados también sugieren que el endurecimiento mediante carbonatación incrementó el aumento de la resistencia asociado a la hidratación posterior. La acción compuesta generada mediante el carbonato de calcio y los productos de hidratación finalmente desempeña un papel importante en el aumento de la resistencia.

Los resultados de este estudio muestran que la escoria de cuchara se puede mezclar con ceniza volante a una proporción del 30 por ciento para fabricar un cemento sintetizado a una temperatura de 1250°C . Cuanto mayores son las temperaturas usadas para la formación de clíners, mayor es la reactividad en la carbonatación e hidratación del cemento. Basándose en la disponibilidad de la escoria de cuchara y la ceniza volante, estos materiales se pueden usar para producir un cemento con la capacidad de aumentar la resistencia por medio del endurecimiento mediante carbonatación/hidratación. La producción del material propuesto puede reducir el consumo de energía, el consumo de recursos naturales, el coste de eliminación de CO_2 , los vertederos de materiales de desecho y la emisión total de CO_2 .

Aunque la descripción anterior proporciona ejemplos de las realizaciones, se apreciará que ciertas características y/o funciones de las realizaciones descritas son susceptibles de modificación sin apartarse del espíritu y los principios de funcionamiento de las realizaciones descritas. Por lo tanto, lo que se ha descrito anteriormente ha pretendido ser ilustrativo y no limitante, y las personas expertas en la técnica entenderán que se pueden hacer otras variantes y modificaciones sin apartarse del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

Referencias

Atis, C., Bilim, C., Celik, O. y Karahan, O. (2009) "Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar". *Construction and Building Materials* 23(1): 548-555.

CCMPA, Canadian Concrete Masonry Producer Association, *Metric Technical Manual, Physical properties*, 28 p. *Concrete Blocks*, 2009, http://www.sustainable-buildings.org/wiki/index.php/Concrete_Blocks, 2013.

El-Hassan, H. (2012) "Static and dynamic carbonation of lightweight concrete masonry units". *Tesis doctoral*, Universidad McGill, Canadá, 214 p.

Houghton, J., T. (2004) "Global warming: The Complete Briefing". Cambridge University Press, 351 p.

Johnson, D.C. (2000) "Accelerated carbonation of waste calcium silicate materials". *SCI lecture paper series*.

- Maslin, M. (2007) "Global warming: Causes, Effects, and the Future". Voyageur Press, 72 p.
- Monkman, S., Shao, Y. (2006) "Assessing the carbonation behavior of cementitious materials". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 18(6): 768-776.
- 5 Murphy, J., Meadowcroft, T., Barr, P. (1997) "Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag". 36(5): 315-331.
- National Research Council (2011) "American's Climate Choices". Washington D.C., 144 p.
- Nisbet, M., Venta, G. (2000) "Fiber-cement in the USA: past, present and the future", *Conference proceeding, Inorganic-bonded wood and fiber composite material*. 7: 248-257.
- 10 Precast Concrete Products, "Demand for precast concrete products to reach \$11.3 billion in 2015", <http://www.concreteconstruction.net/precast-concrete/demand-for-precast-concrete-products-to-reach-113-billion-in-2015.aspx>, Noviembre de 2013.
- Reddy, A., Pradhan, R., Chandra, S. (2006) "Utilization of basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic cement binder". *International Journal of Mineral Processing*. 79(2): 98-105.
- WorldSteel Association (2010) "Factsheet: Steel industry by-products- Achieving the goal of zero-waste". 2p.
- 15 Young, J., Berger, R., Breese J. (1974) "Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂". Presentado en la 75ª reunión anual, The American Ceramic Society, Cincinnati, EE.UU.
- Baciocchi, R., Costa, G., Poletini, A., Pomi, R. (2009) "Influence of particle size on the carbonation of stainless steel slag for CO₂ storage". *Energy Procedia* 1(1): 4859-4866.
- Canadian Slag Association (2009) <http://canslag.ca/techinfo.html>, Mayo de 2014.
- 20 Das, B., Prakash, S., Reddy, PSR., Misra, V.N. (2007) "An overview of utilization of slag and sludge from steel industries". *Resources Conservation and Recycling*. 50(1): 40-57.
- Dippenaar, R. (2005) "Industrial uses of slag (the use and re-use of iron and steelmaking slags)". *Ironmaking and Steelmaking*. 32:35-46.
- Euroslag (2010) <http://www.euroslag.com/products/statistics/2010/>, Noviembre de 2013.
- 25 Huijgen, W., Ruijg, G., Comans, R., Witkamp, G. (2006) "Energy consumption and net CO₂ sequestration of aqueous mineral carbonation". *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 45(26): 9184-9194.
- Isoo, T., Takahashi, T., Okamoto, N., Fukuharat, M. (2000) "Development of large steelmaking slag blocks using a new carbonation process". *Advances in Cement Research*. 12(3): 97-101.
- 30 Juckes, L. M. (2003) "The volume stability of modern steelmaking slags". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 112(3): 177-197.
- Li, G., Ni, H. (2011) "Recent progress of the stage processing for steelmaking slags in China considering stability and heat recovery". 2º Simposio Internacional de Valoración de la Escoria, Lovaina, Bélgica.
- Li, J., Yu., Q., Wei, J., Zhang, T. (2011) "Structural characteristics and hydration kinetics of modifies steel slag". *Cement and Concrete Research*. 41(3): 324-329.
- 35 Manso, J., Losanez, M., Polanco, A., González, J. (2005) "Ladle furnace slag in construction". *Journal Of Materials In Civil Engineering*. 17(5): 513-518.
- Monkman, S., Shao, Y., Shi, C. (2009) "Carbonation ladle slag fines for carbon uptake and sand substitute". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 21(11): 657-665.
- 40 Motz, H., Geiseler, J. (2011) "Products of steel slags an opportunity to save natural resources". *Waste Management*. 21(3): 285-293.
- Muhmood, L., Viita, S., Venkateswaan, D. (2009) "Cementitious and pozzolanic behavior of electronic arc furnace steel slags". *Cement and Concrete Research*. 39(2): 102-109.
- Netinger, I., Bjegovic, D., Vrhovac, G. (2011) "Utilization of steel slag as aggregate in concrete". *Materials and Structures*. 44(9): 1565-1575.
- 45 Asociación Japonesa de Escoria (2012) <http://www.slg.jp/e/statistics/index.html>, Recuperado en mayo de 2014.

- Pal, S., Mukherjee, A., Pathak, S. (2003) "Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace in concrete". *Cement and Concrete Research*. 33(9): 1481-1486.
- Radenovic, A., Malina, J., Sofilic, T. "Characterization of Ladle Furnace Slag from Carbon Steel Production as a Potential Adsorbent". (2013) *Advances in Materials Science and Engineering*. ID de artículo 198240, 6 páginas.
- 5 Sajedi, F., Abdul Razak, H. (2010) "The effect of chemical activators on early strength of ordinary Portland cement-slag mortars". *Construction and Building Materials*. 24(10): 1944-1955.
- Shi, C. (2004) "Steel slag-its production, processing, characteristics, and cementitious properties". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 16(3): 230-236.
- 10 Shi, C. (2002) "Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production". *Cement and Concrete Research*. 32(3): 459-462.
- Shi, C., Qian, J. (2000) "High performance cementing materials from industrial slags -a review". *Resources, Conservation and Recycling*. 29(3): 195-207.
- Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menad, M. (2007) "Characteristics of steel slag under different cooling conditions". *Waste Management*. 27(10): 1335-1344.
- 15 Wang, Q., Yan, P., Feng, J. (2011) "A discussion on improving hydration activity of steel slag by altering its mineral compositions". *Journal of Hazardous Materials*. 186(2-3): 1070-1075.
- Yildirim, I., Prezzi, M. (2011) "Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag". *Advances in Civil Engineering*. ID de artículo 463638, 13 páginas.
- 20 Zevenhoven, R., Wiklund, A., Fagerlund, J., Eloneva, J., Veen, B., Geerlings, H., Mossel, G., Boerrigter, H. (2010) "Carbonation of calcium-containing mineral and industrial by-products". *Frontiers of Chemical Engineering in China*, 4: 110-119.
- Zomeren, A., Laan, S., Kobesen, H., Huijgen, W., Comasn, R. (2011) "Changes in mineralogical and leaching properties of converter steel slag resulting from accelerated carbonation at low CO₂ pressure". *Waste Manage*. 31(11): 2236-2244.
- 25 Zong, Y., Cang, D., Zhen, Y., Li, Y., Bai, H. 2009 "Component modification of steel slag in air quenching process to improve grindability". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 19(3): 834-839.
- Adolfsson, D., Menad, N., Viggh, E., Björkman, B. (2007) "Hydraulic properties of sulphotoaluminate belite cement based on steelmaking slags". *Advances in Cement Research*. 19(3): 133-138.
- 30 Adolfsson, D., Robinson, R., Engstrom, F., Bjorkman, B. (2011) "Influence of mineralogy on the hydraulic properties of ladle slag". *Cement and Concrete Research*. 41(8): 865-871.
- Norma ASTM C114 (2011) "Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement". ASTM International, PA, EE.UU.
- Chung, F. (1974) "Quantitative interpretation of x-ray diffraction patterns of mixtures. I. Matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis". *Journal of Applied Crystallography*. 7:519-525.
- 35 He, F., Xu, A., Wang, H., He, D., Tian, N. (2012) "End temperature prediction of molten steel in LF based on CBR". *Steel Research International*. 83(11): 1079-1086.
- Monkman, S, Shao, Y., Shi, C. (2009) "Carbonated ladle slag fines for carbon uptake and sand substitute". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 21(11): 657-665.
- 40 Murri, A., Rickard, W.D.A., Bignozzi, M.C., Van Riessen, A. (2013) "High temperature behaviour of ambient cured alkali-activated materials based on ladle slag". *Cement and Concrete Research*. 43:51-61.
- Papayianni, I., Anastasiou, E. (2012) "Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag". *Cement and Concrete Composites*. 34(3): 400-407.
- Posch, W., Presslinger, H., Hiebler, H. (2002) "Mineralogical evaluation of ladle slags at voestalpine stahl GmbH". *Ironmak Steelmak*. 29(4): 308-312.
- 45 Rodríguez, A., Manso, J.M., Aragón, A., González, J.J. (2009) "Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag". *Resources, Conservation and Recycling*. 53(11): 645-651.
- Segui, P., Aubert, J., Husson, B., Measson, M. (2013) "Valorization of wastepaper sludge ash as main component of hydraulic road binder". *Waste and Biomass Valorization*. 4(2): 297-307.

- Setién, J., Hernández, D., González, J.J. (2009) "Characteristics of ladle furnace basic slag for use as a construction material". *Construction and Building Materials*. 23(5): 1788-1794.
- Shi, C., Hu, S. (2003) "Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing conditions". *Cement and Concrete Research*. 33(11): 1851-1856.
- 5 Champenois, J., Coumes, C., Poulesquen, A., Bescop, P., Damidot, D. (2013) "Beneficial use of a cell coupling rheometry, conductimetry, and calorimetry to investigate the early age hydration of calcium sulfoaluminate cement". *Rheologica Acta*. 52(2): 177-187.
- Chen, I., Juenger, M. (2012) "Incorporation of coal combustion residuals into calcium sulfoaluminate-belite cement clinkers". *Cement and Concrete Composites*. 34(8): 893-902.
- 10 Georgescu, M., Tipan, J., Badanoiu, L., Crisan, D., Dragan, I. (2000) "Highly reactive dicalcium silicate synthesised by hydrothermal processing". *Cement and Concrete Composites*. 22(5): 315-319.
- Janotka, I., Krajèi, U., Mojmudar, S.C. (2007) "Performance of sulfoaluminate-belite cement with high c4a3s content". *Ceramics*. 51(2): 74-81.
- 15 Kacimi, L., Simon-Masseron, A., Salem, S., Ghomari, A., Derriche, Z. (2009) "Synthesis of belite cement clinker of high hydraulic reactivity". *Cement and Concrete Research*. 39(7): 559-565.
- Rostami, V., Shao, Y., Boyd, A. (2011) "Durability of concrete pipes subjected to combined steam and carbonation curing". *Building and Construction Materials*. 25(8): 3345-3355.
- Singh, N., Rai, S., Singh, N. (2002) "Highly reactive β dicalcium silicate". *Journal of American Ceramic Society*. 85: 2171-2176.
- 20 Singh, N. (2006) "Hydrothermal synthesis of β -dicalcium silicate (β -Ca₂SiO₄)". *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 52: 77-83.
- Taylor, H.F.W. (1997) "Cement chemistry". Segunda edición, Thomas Telford Publishing, 459 p.
- Uibu, M., Kuusik, R., Andreas, L., Kirsimae, K. (2011) "The CO₂-binding by Ca-Mg-silicates in direct aqueous carbonation of oil shale ash and steel slag". *Energy Procedia* 4: 925-932.
- 25 Ukrainczyk, N., Mihelj, N., Sipusic, J. (2013) "Calcium sulfoaluminate eco-cement from industrial waste". *Chemical and Biochemical Engineering*. 27(1): 83-93.
- Instituto Geológico Británico (2005) "Mineral profile: Cement raw materials". Oficina del Viceprimer Ministro. 20 p.
- Bye, G.C. (1999) "Portland cement Thomas Telford" 225 p.
- Jankovic, A., Valery, W., Davis, E. (2004) "Cement grinding optimisation". *Minerals Engineering*. 17(11): 1075-1081.
- 30 Komljenovic, M., Petrainovi-Stojkanovi, L.J., Baarevi, Z., Jovanovi, N., Rosi, A. (2009) "Fly ash as the potential raw mixture component for Portland cement clinker synthesis". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 96(2): 363-368.
- Madlool, N.A., Saidur, R., Hossain, M.S., Rahim, N.A. (2011) "A critical review on energy use and savings in the cement industries". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15:4: 2042-2060.
- 35 Sherman, N., Beretkal, J., Santoro, L., Valenti, G.L. (1995) "Long-term behaviour of hydraulic binders based on calcium sulfoaluminate and calcium sulfosilicate". *Cement and Concrete Research*. 25(1): 113-126.
- Wang, J., Dai, Y., Gao, L. (2009) "Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry". *Applied Energy*. 86(6): 941-948.
- 40 Akers, S., Studinka J. (1989) "Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests" *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 11(2): 93-97.
- Norma ASTM C90 (2014) "Standard specification for loadbearing concrete masonry units". ASTM International; PA, EE.UU.
- Norma ASTM C1185 (2012) "Standard test methods for sampling and testing non-asbestos fiber-cement flat sheet, roofing and siding shingles, and clapboards". ASTM International; PA, EE.UU.
- 45 Asociación Canadiense del Cemento (2013) <http://www.cement.ca/en/Manufacturing/History-of-Cement.html>, agosto de 2013.

- Norma CSA A23.1 (2009) "Concrete materials and methods of concrete construction/Test methods and standard practices for concrete". Canadá.
- Fuwape, J., Fabiyi, J., Osuntuyi, E. (2007) "Technical assessment of three layered cement-bonded boards produced from wastepaper and sawdust". *Waste Management*. 27(11): 1611-1616.
- 5 Guntekin, E., Sahin, H. (2009) "Accelerated weathering performance of cement bonded fiberboard". *Scientific Research and Essay*. 4(5): 484-492.
- Haoze, W., Jun, C., Zhenzhao, P., Xin, C. (2011) "Effects of carbonation on steel slag products". *Advanced Materials Research*. 177: 485-488.
- 10 Johnson, D.C., Macleod, C., Cray, P., Hills, C. (2003) "Solidification of stainless steel slag by accelerated carbonation". *Environmental Technology*. 24(6): 671-678.
- Mohr, B., Nanko, H., Kurtis, K. (2005) "Durability of kraft pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling" *Cement and Concrete Composites*. 27(4): 435-448
- Monkman, S., Shao, Y. (2010) "Carbonation curing of slag-cement concrete for binding CO₂ and improving performance". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 22: 296-304
- 15 Monkman, S., Shao, Y. (2010b) "Integration of carbon sequestration into curing process of precast concrete". *Canadian Journal of Civil Engineering*. 37: 302-310
- Monkoman, S. (2008) "Maximizing carbon uptake and performance gain in slag-containing concretes through early carbonation". Tesis doctoral, Universidad McGill, Canadá, 222 p.
- 20 Rostami, V., Shao, Y., Boyd, A., He, Z. (2012) "Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing". *Cement and Concrete Research*. 42(1): 186-193.
- Simatupang, M., Habighorst, C., Lang, H., Neubauer, A. (1995) "Investigations on the influence of the addition of carbon dioxide on the production and properties of rapidly set wood-cement composites". *Cement and Concrete Composites*. 17(3): 187-197.
- 25 Soroushian, P., Wonb, J., Hassan, M. (2012) "Durability characteristics of CO₂-cured cellulose fiber reinforced cement composites". *Construction and Building Materials*. 34: 44-53
- Soroushian, P., Marikunte, S., Won, J. (1994) "Wood fiber reinforced cement composites under wetting-drying and freezing-thawing cycles". *Journal of Materials in Civil Engineering*. 6(4): 595-611.
- 30 Asociación del Transporte de Canadá (2013) "Integration of carbon dioxide curing into precast concrete production". <http://www.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2010/docs/k3/niven.pdf>, 25 de agosto de 2013.
- Turgut, P. (2007) "Cement composites with limestone dust and different grades of wood sawdust". *Building and Environment*. 42(11): 3801-3807.

REIVINDICACIONES

1. Un método para fabricar un bloque de construcción, que comprende proporcionar un material granular y un aglutinante que incluye escoria de acero; combinar el material granular y el aglutinante con agua a una primera proporción agua/escoria;
- 5 compactar el material granular, el aglutinante y el agua combinados a una presión de compactación menor de 20 MPa; reducir la cantidad de agua en el material granular, el aglutinante y el agua combinados hasta una segunda proporción agua/escoria que es inferior a la primera proporción agua/escoria; endurecer dicho material granular, el aglutinante y el agua combinados que tienen dicha segunda proporción agua/escoria con dióxido de carbono.
- 10 2. El método de la reivindicación 1, en el que la escoria de acero tiene un contenido acumulativo de silicato de calcio de al menos un 20 %p.
3. El método de la reivindicación 1 o 2, en el que la escoria de acero tiene una concentración de cal libre menor del 7 %p.
- 15 4. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que la escoria de acero tiene un contenido de dióxido de silicio de al menos un 6 %p.
5. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que la escoria de acero comprende al menos una escoria de horno de arco eléctrico (EAF), escoria de horno de oxígeno básico (BOF) y escoria de cuchara.
- 20 6. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que la escoria de acero comprende una mezcla de escoria gruesa que tiene una finura menor de 150 m²/kg y una escoria fina que tiene una finura mayor de 150 m²/kg.
7. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que el material granular se elige de un agregado ligero natural, un agregado de arcilla expandida, un agregado de esquisto expandido, un agregado de escoria expandida, un agregado de escoria de acero expandida y agregado de escoria de hierro expandida.
- 25 8. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que dicha reducción de la cantidad de agua hasta la segunda proporción agua/escoria comprende aplicar un flujo de aire al material granular, el aglutinante y el agua combinados.
9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que la primera proporción agua/escoria es de al menos 0,15, y en el que la segunda proporción agua/escoria es menor de 0,12.
- 30 10. El método de la reivindicación 9, en el que la primera proporción agua/escoria es de al menos 0,2, y en el que la segunda proporción agua/escoria es menor de 0,10.
11. El método de la reivindicación 9, en el que la segunda proporción agua/escoria es de al menos 0,08.
12. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, en el que dicho material granular, escoria de acero y agua combinados comprenden al menos un 30% de escoria de acero respecto de la masa total del material granular, la escoria de acero y el agua combinados.
- 35 13. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, en el que dicho bloque se hidrata después de dicha etapa de endurecimiento.

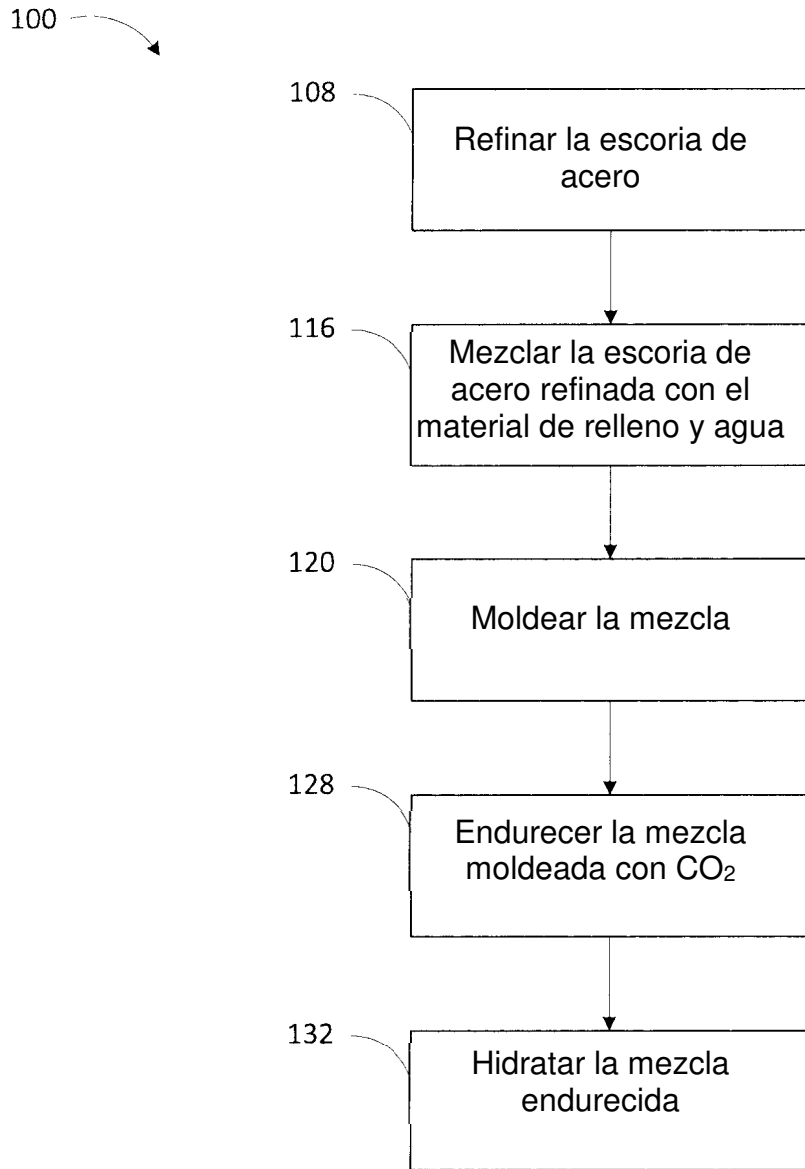


FIG 1

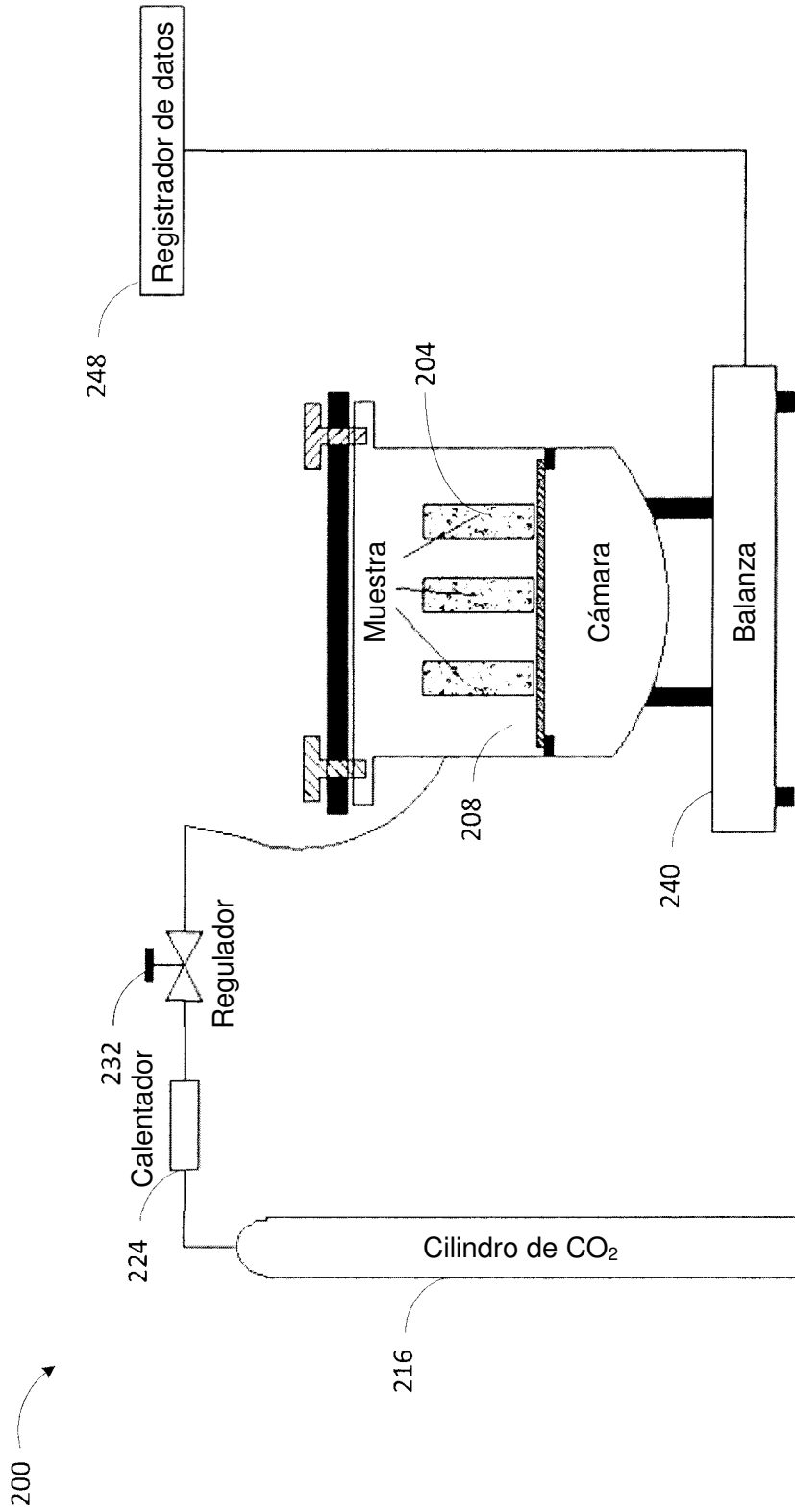


FIG. 2

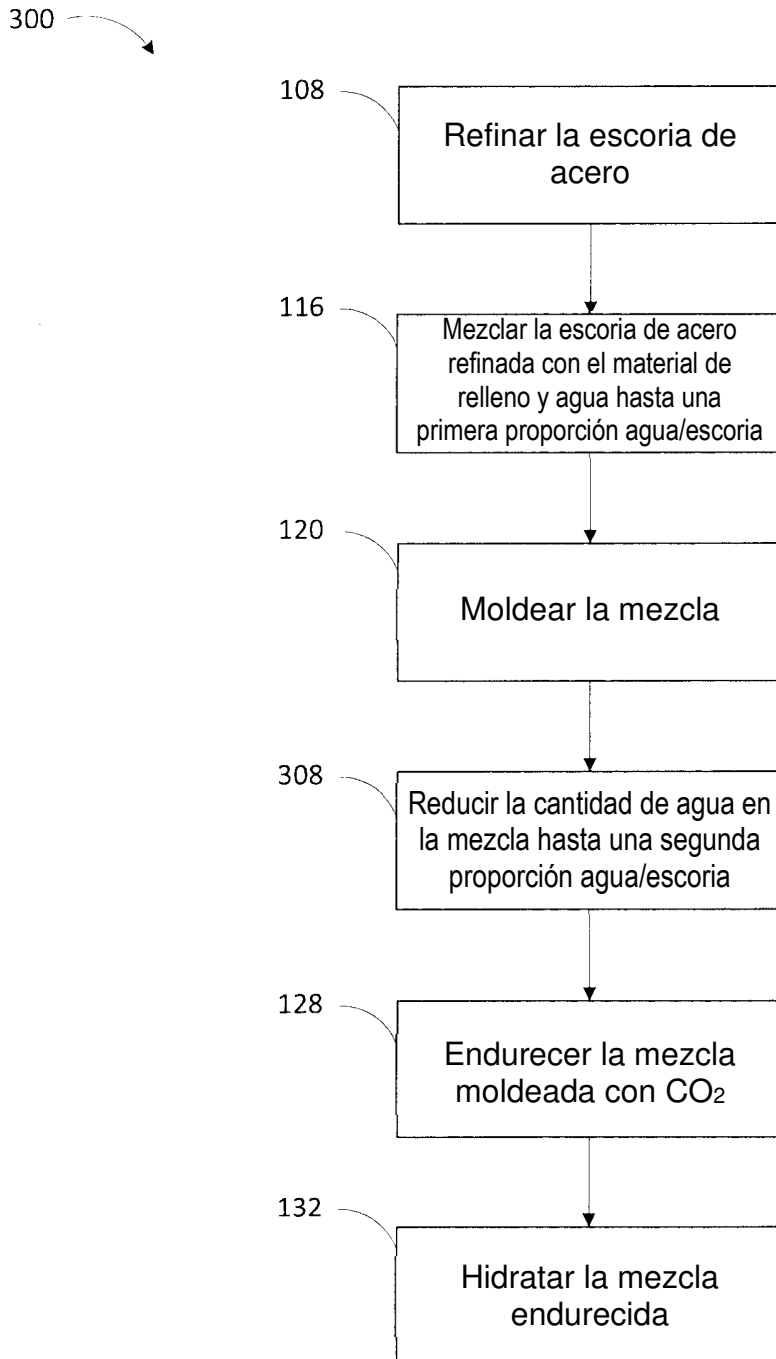


FIG 3

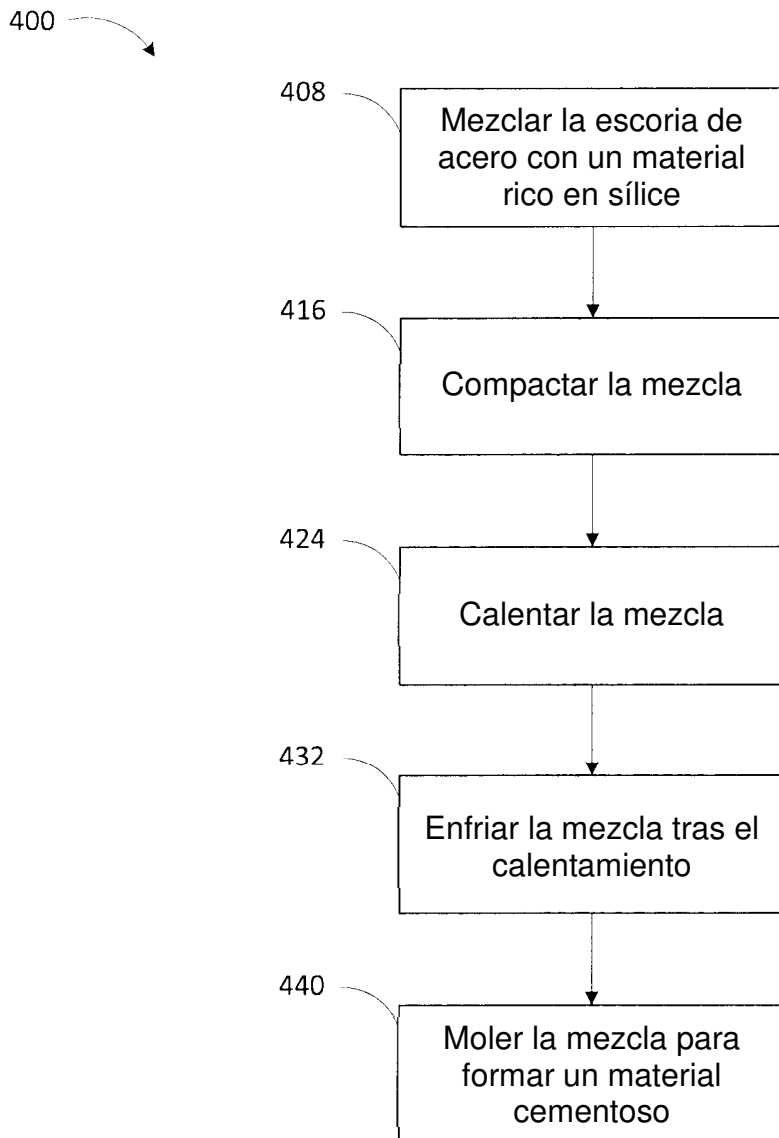


FIG 4

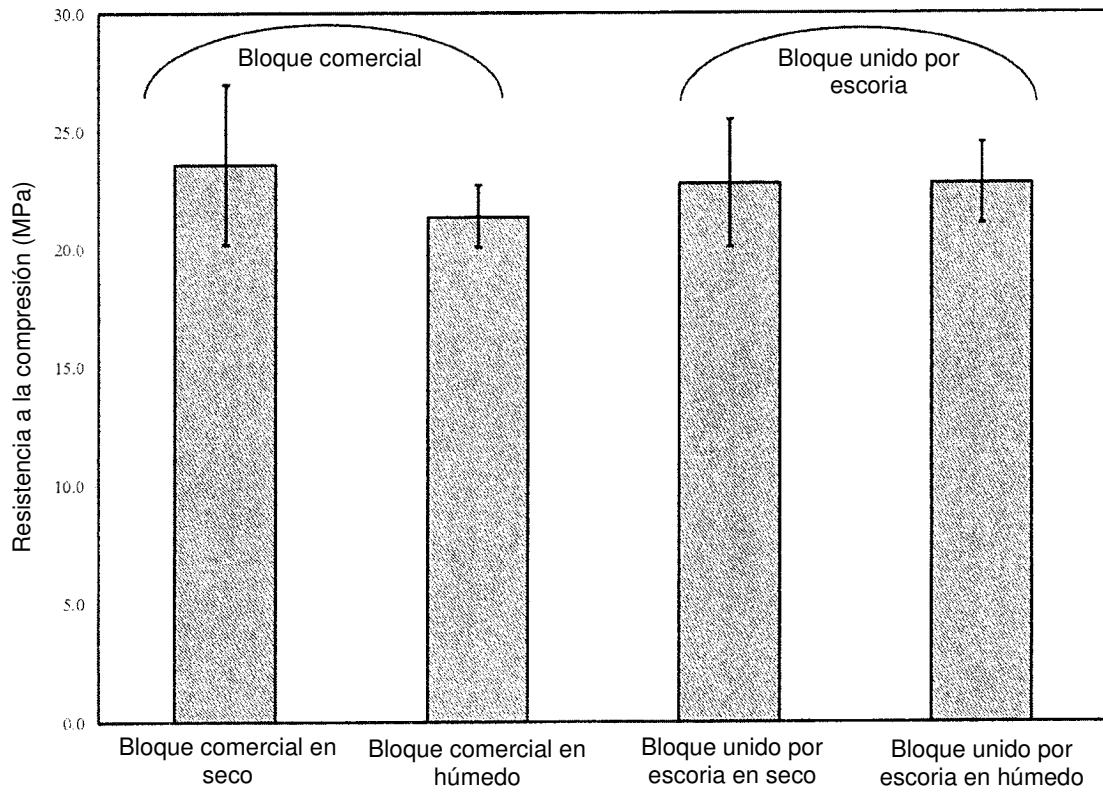


FIG 5

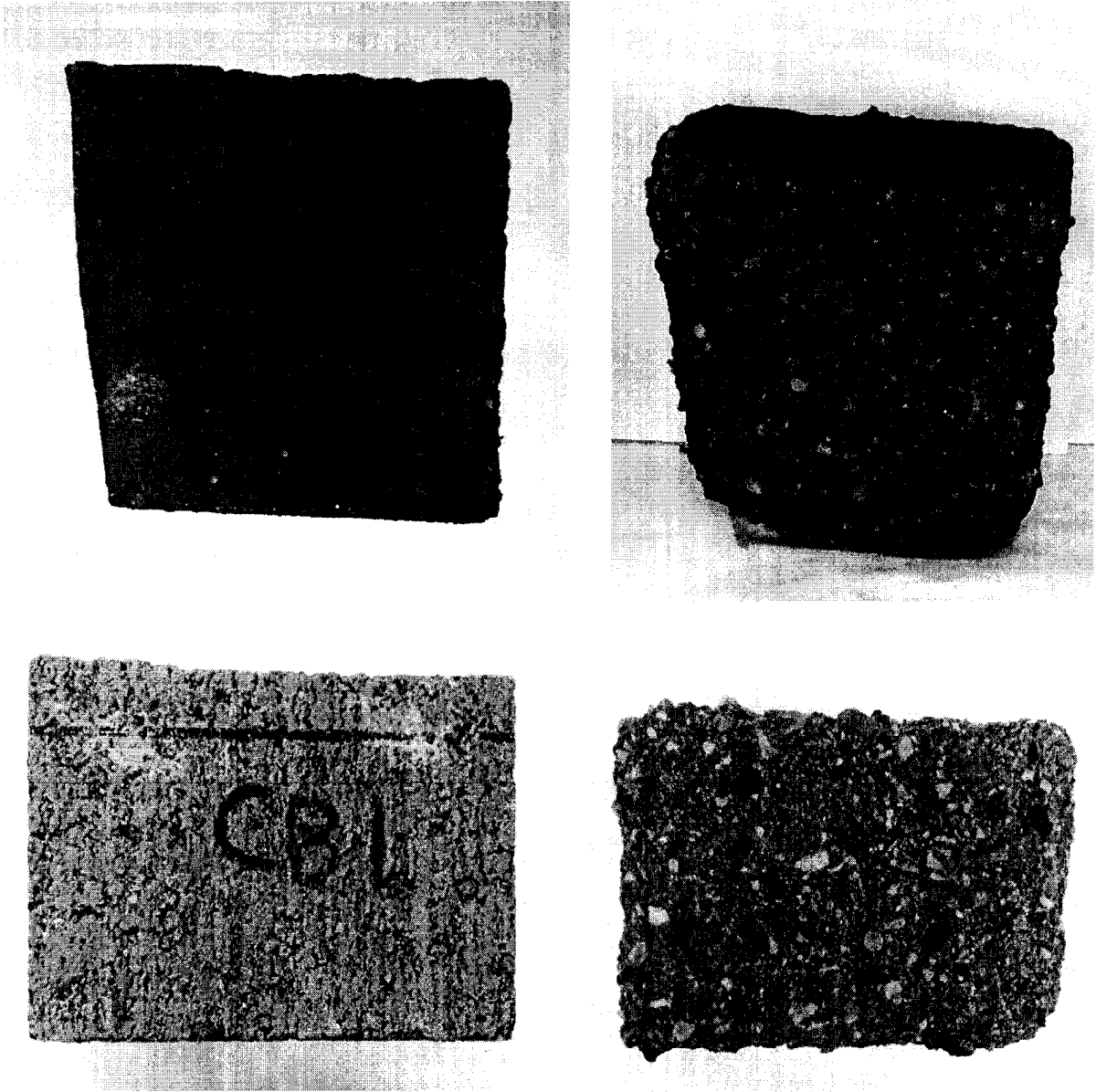


FIG 6

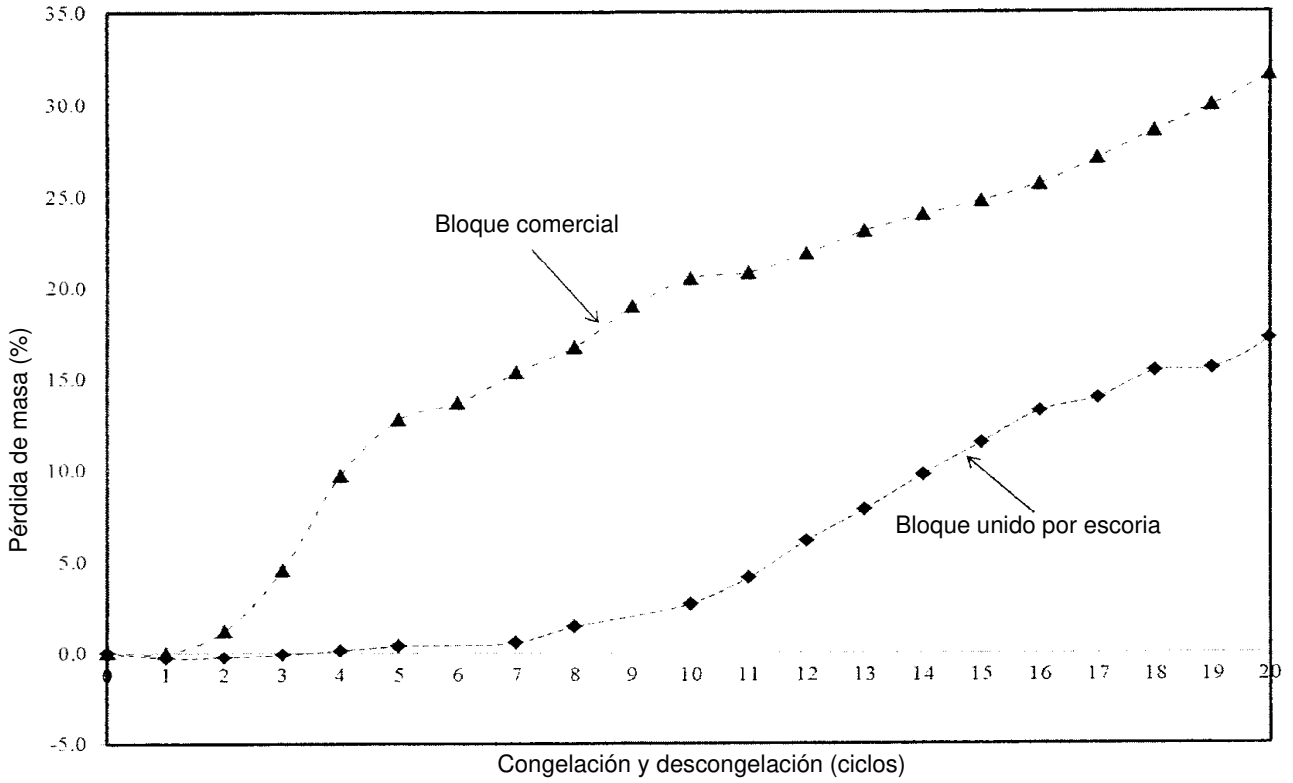


FIG 7

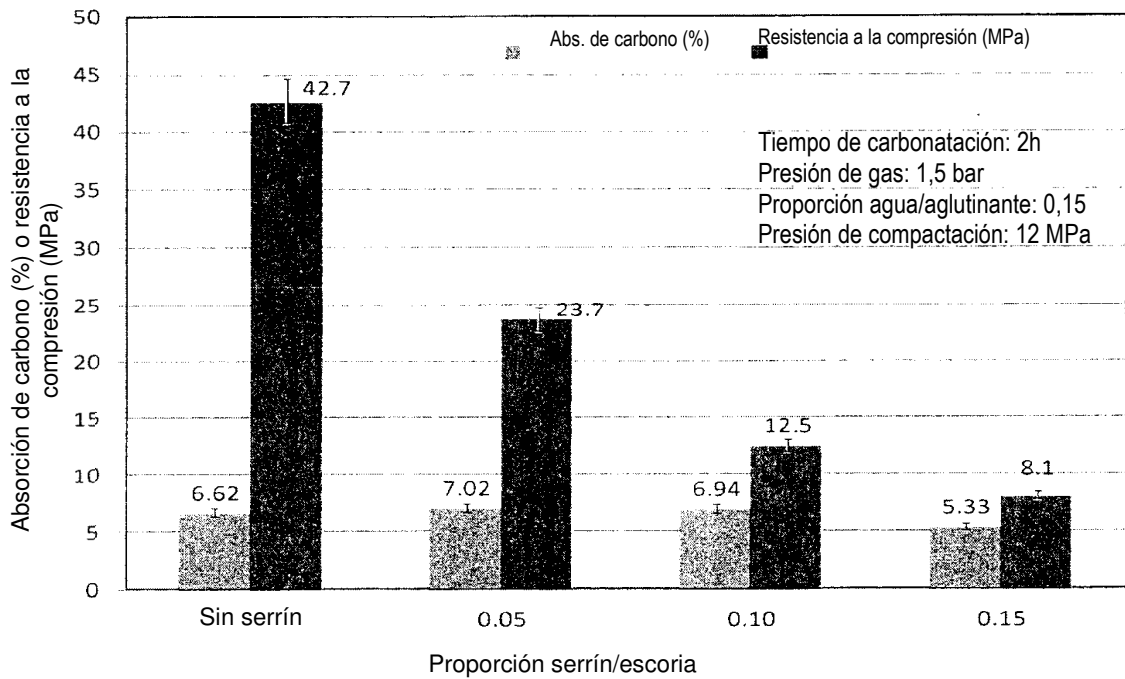


FIG 8

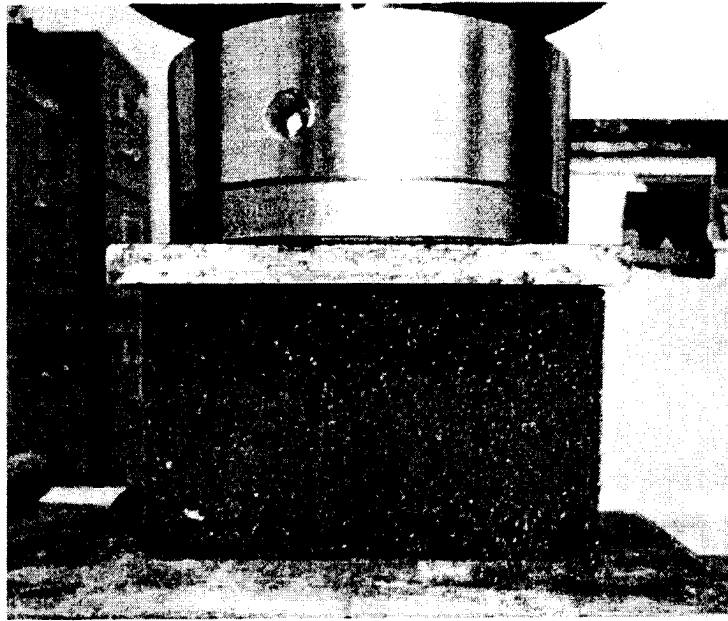


FIG 9

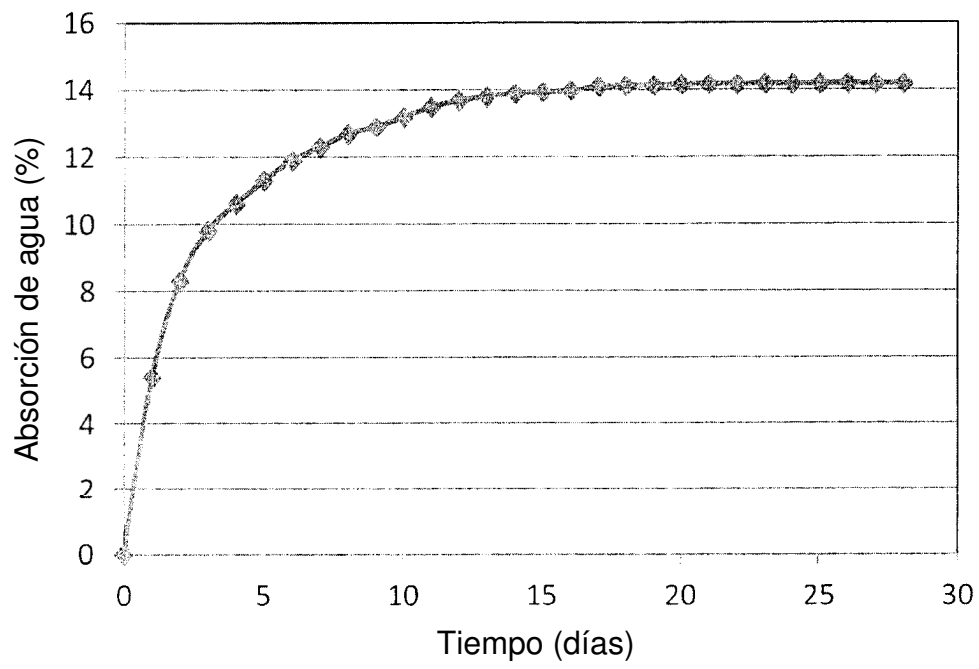


FIG 10

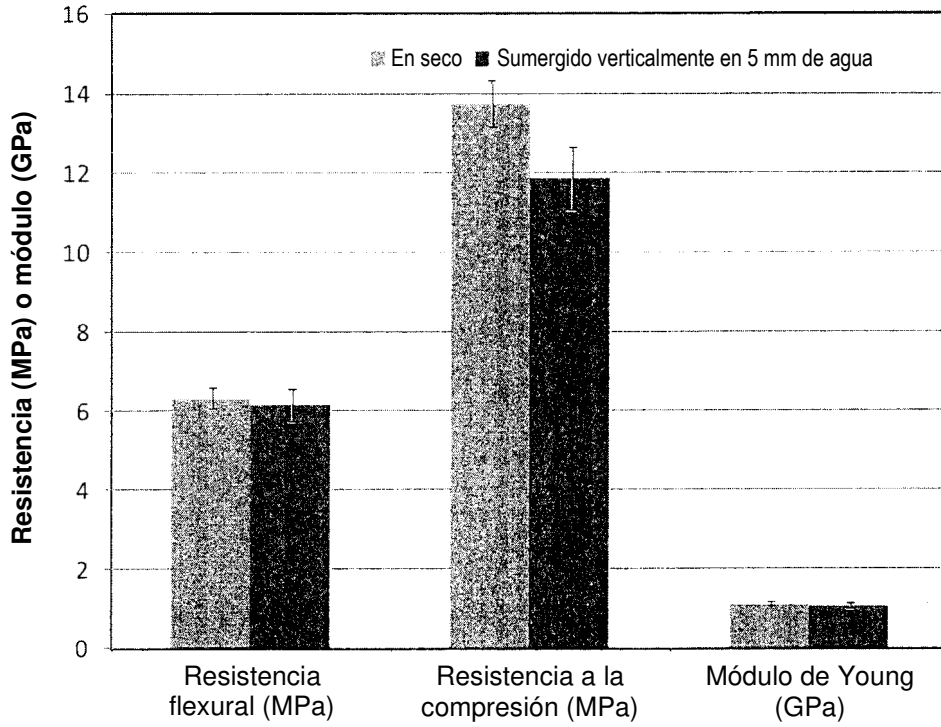


FIG 11

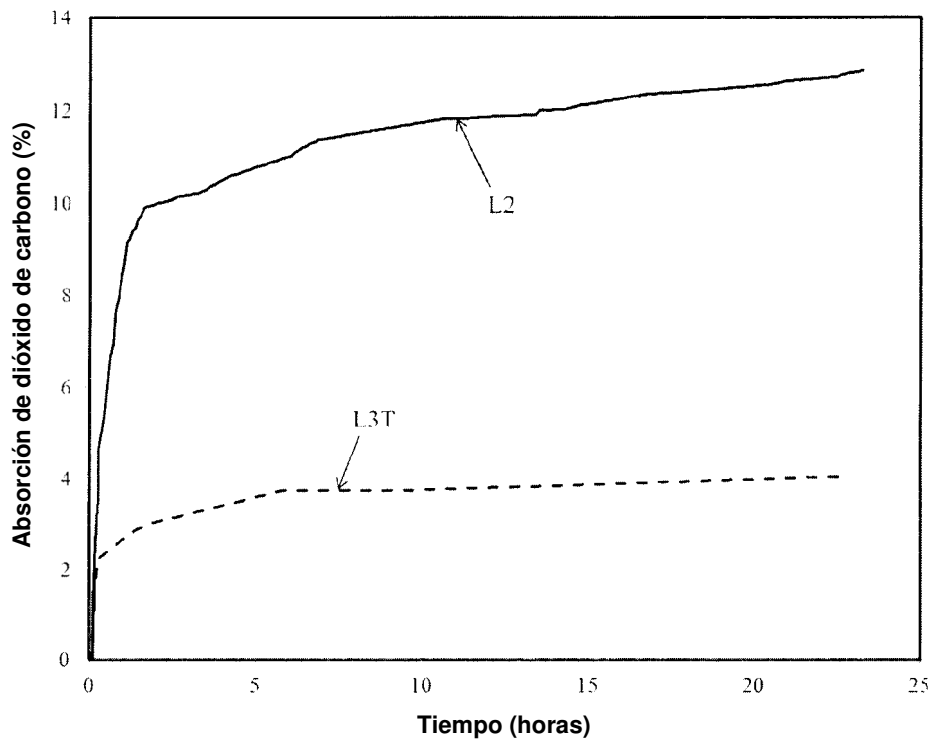


FIG 12

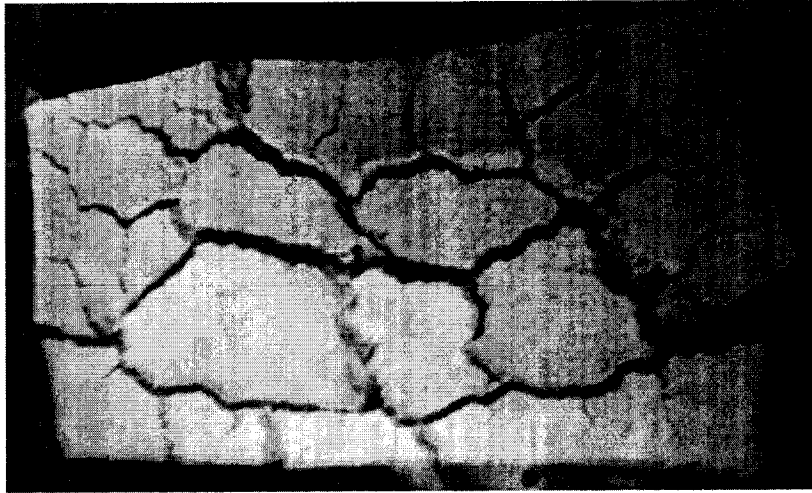


FIG 13

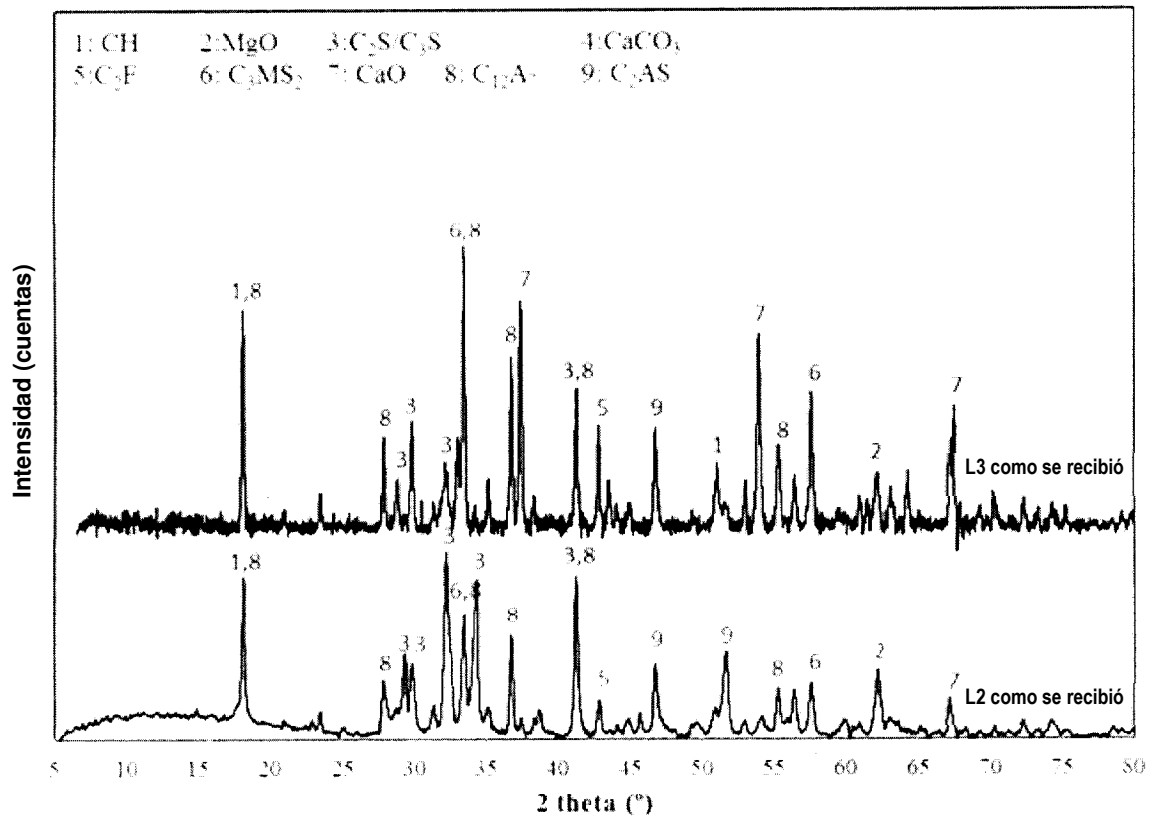


FIG 14

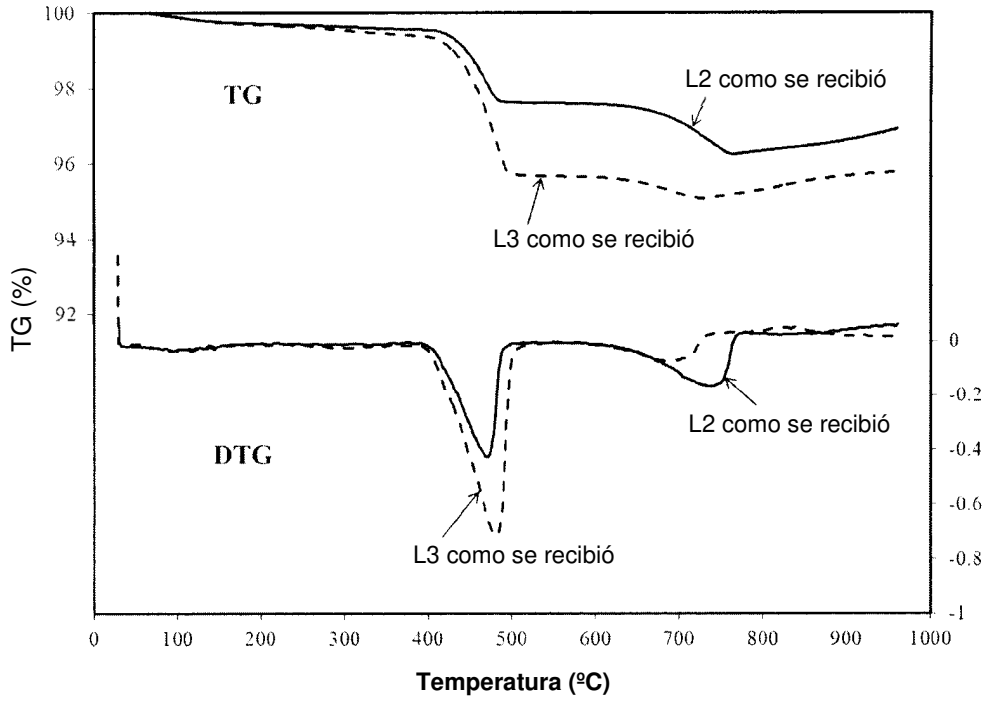


FIG 15

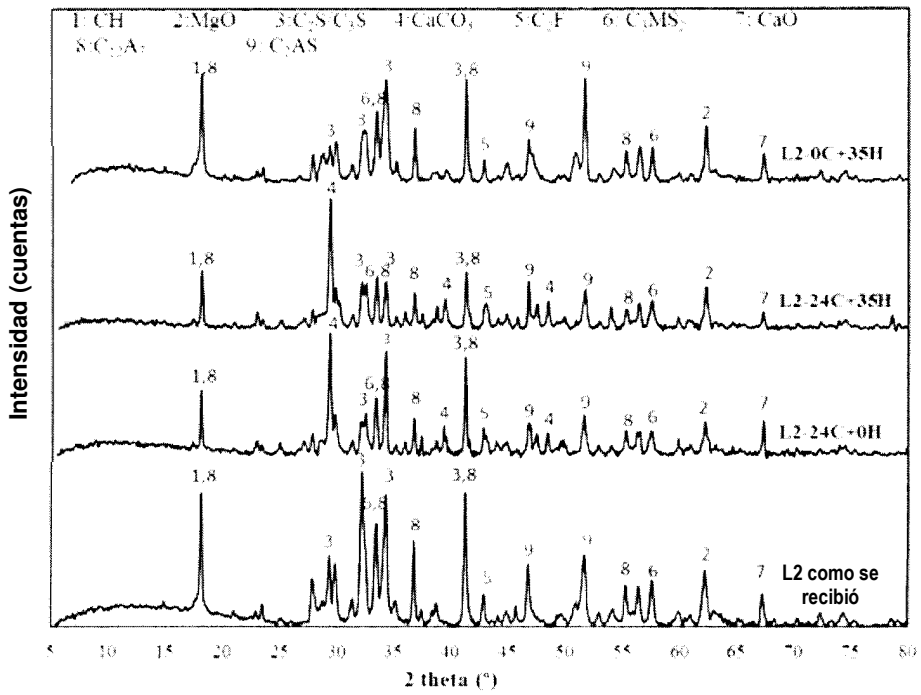


FIG 16

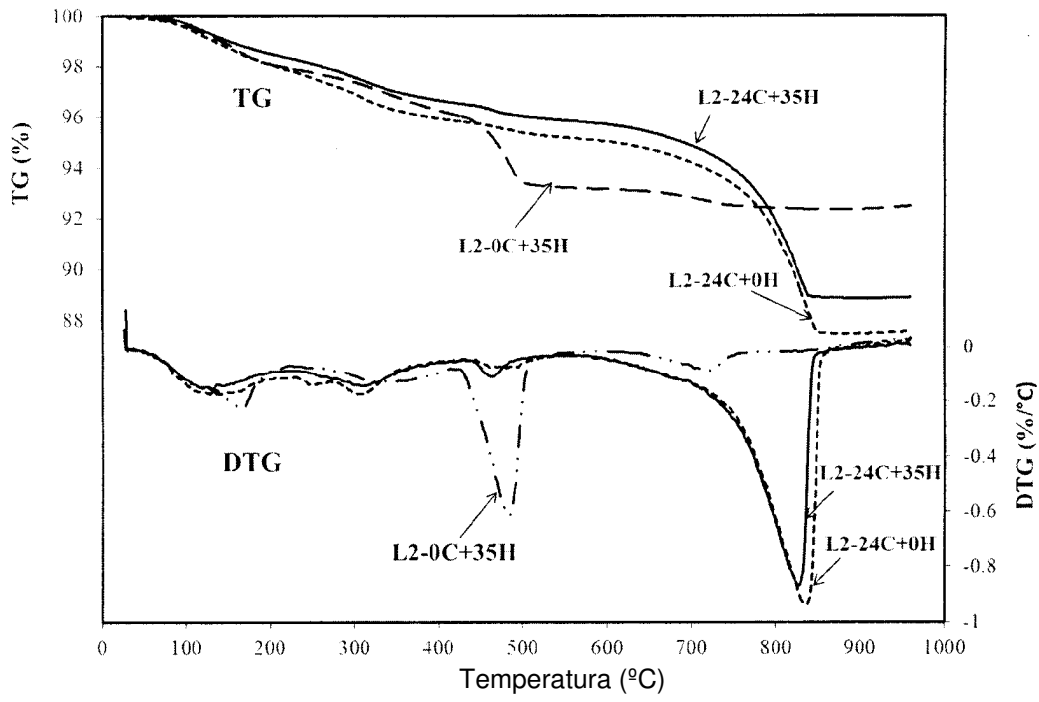


FIG 17

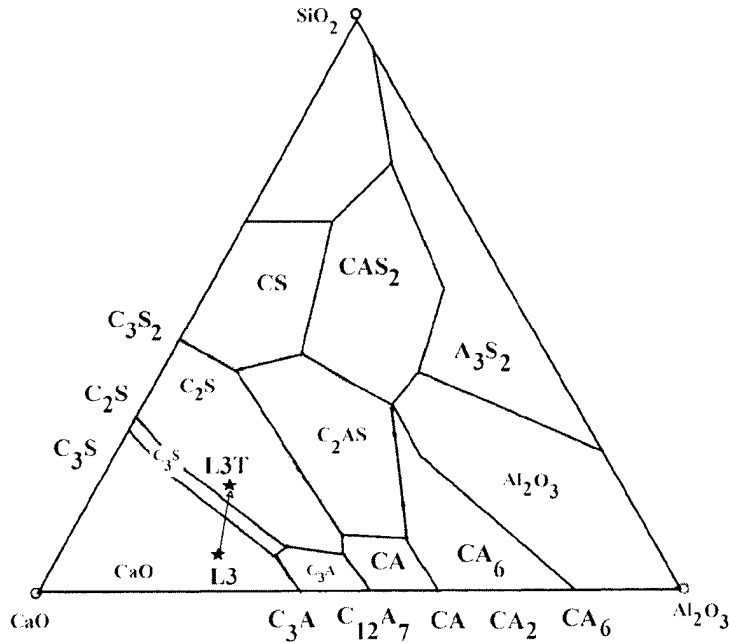


FIG 18

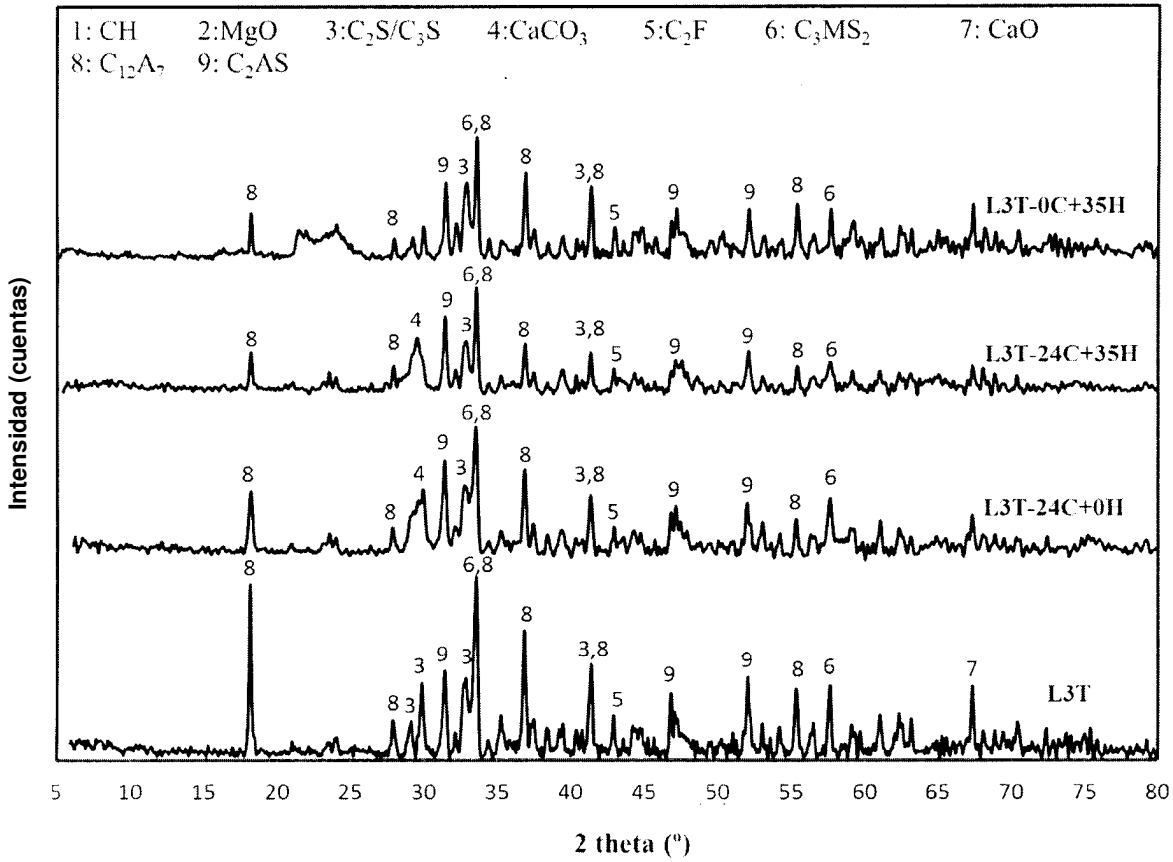


FIG 19

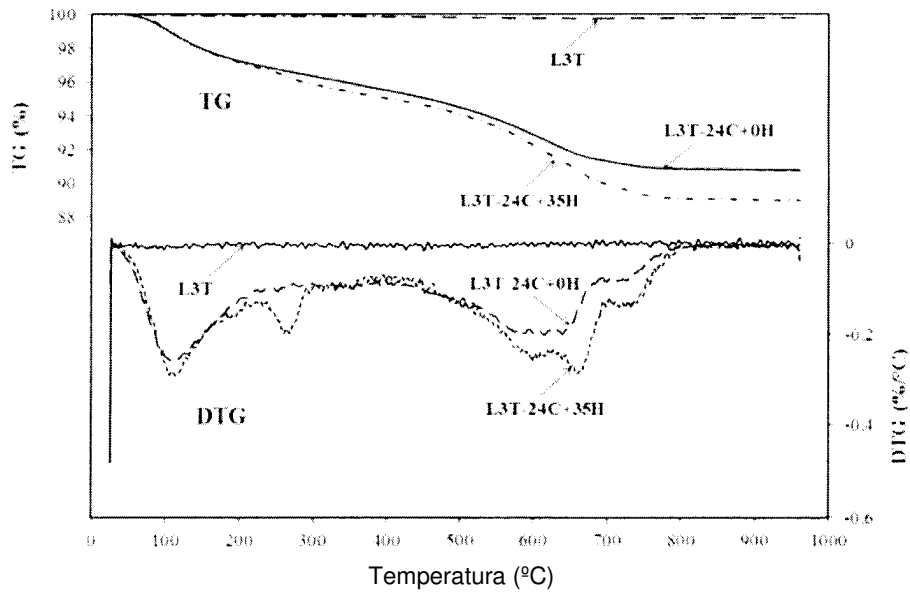


FIG. 20

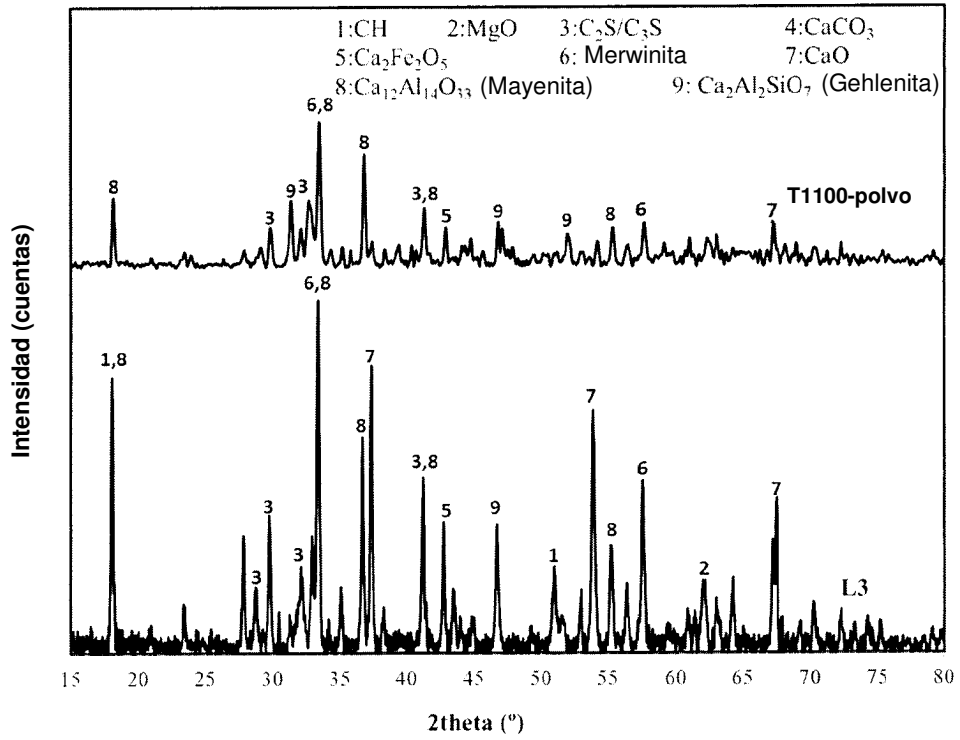


FIG 21

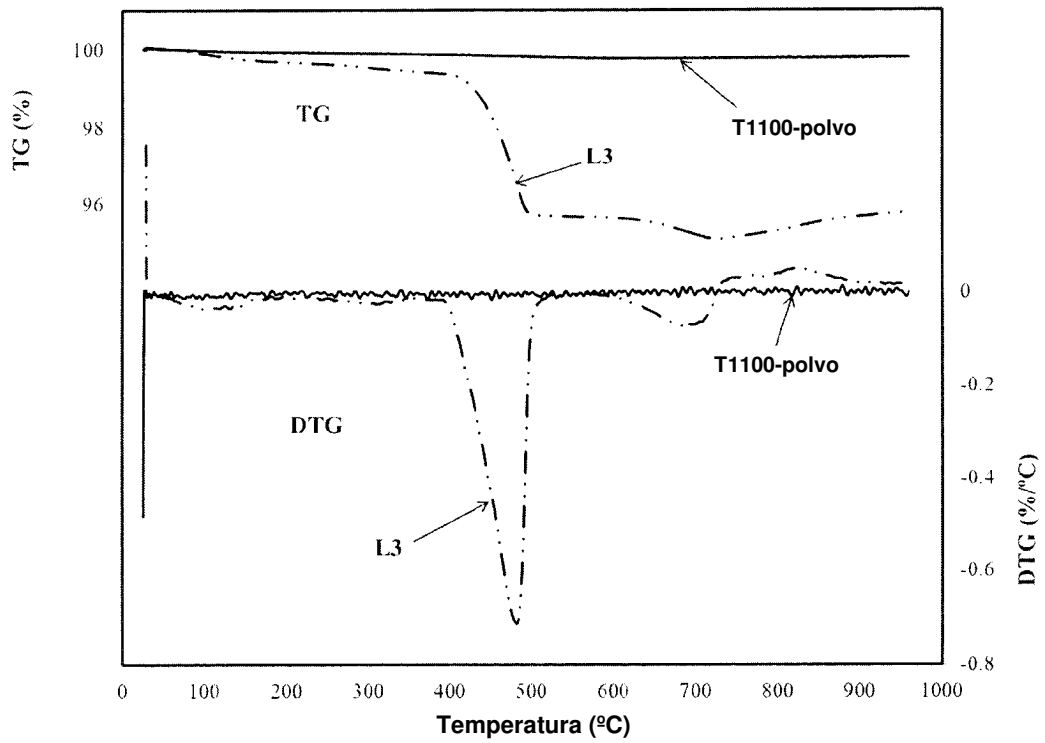


FIG 22

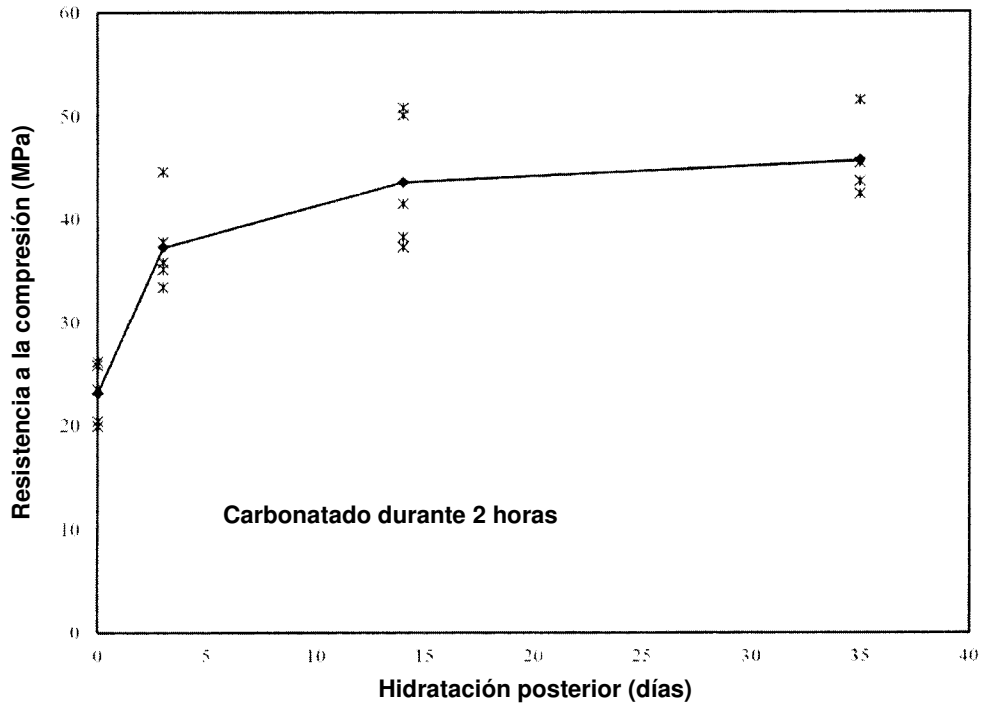


FIG 23

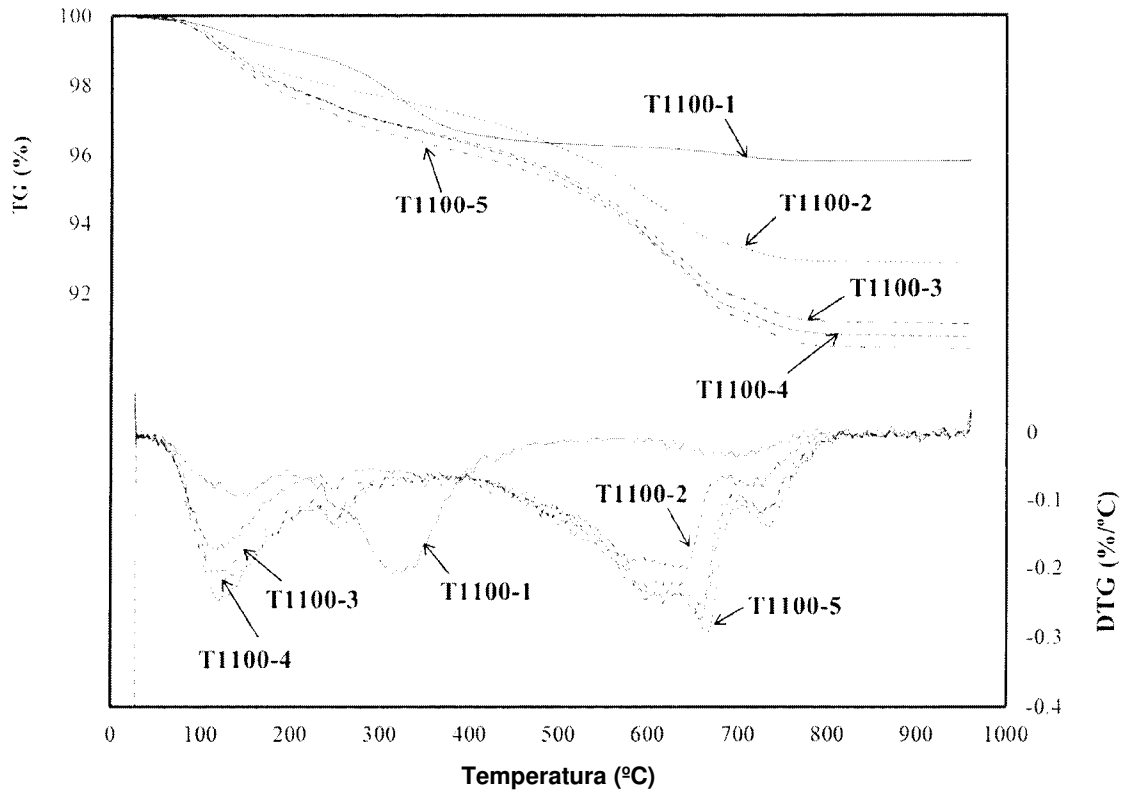


FIG 24

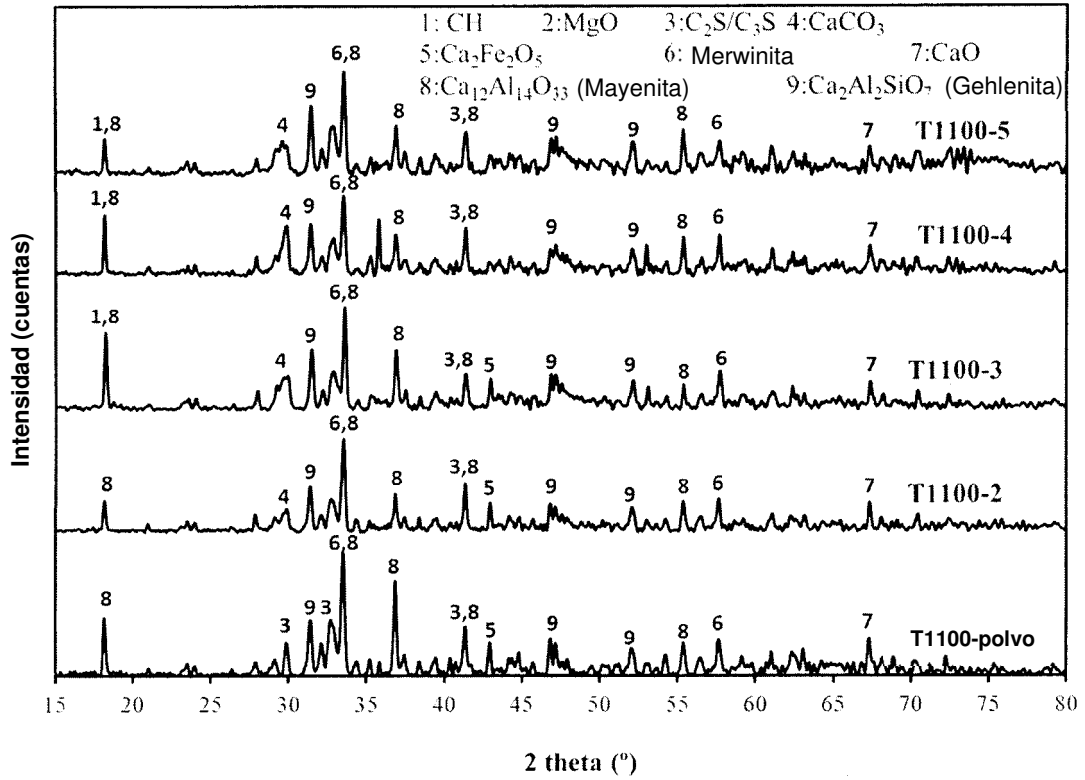


FIG 25

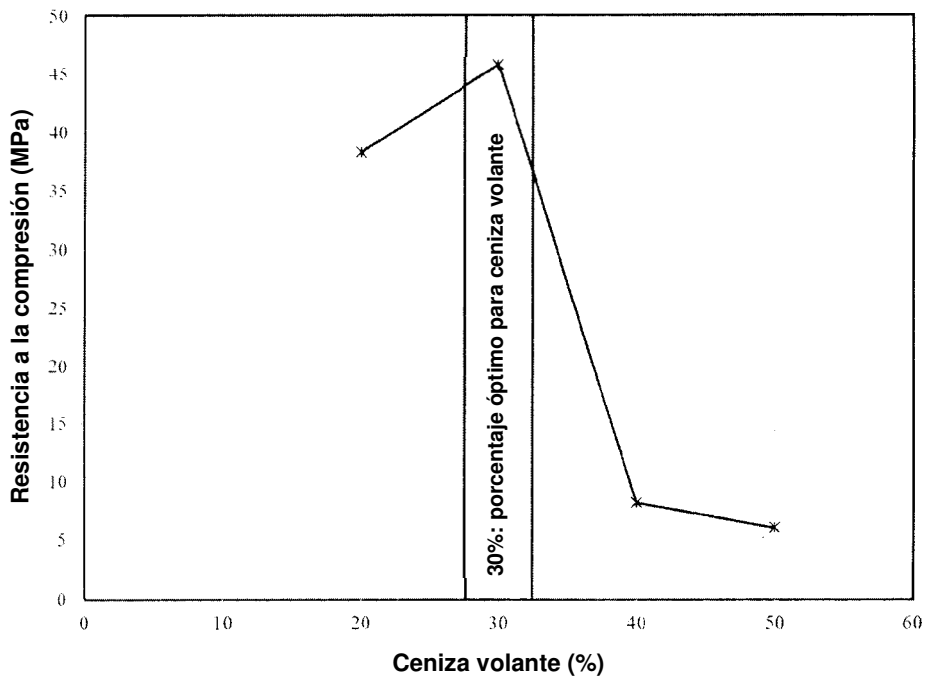
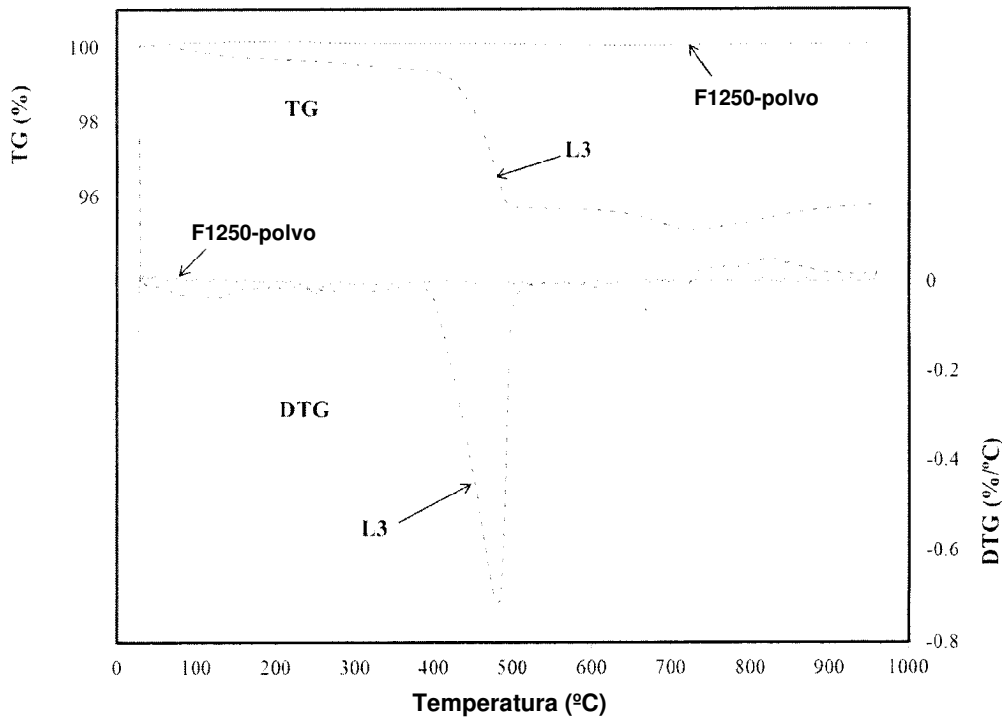
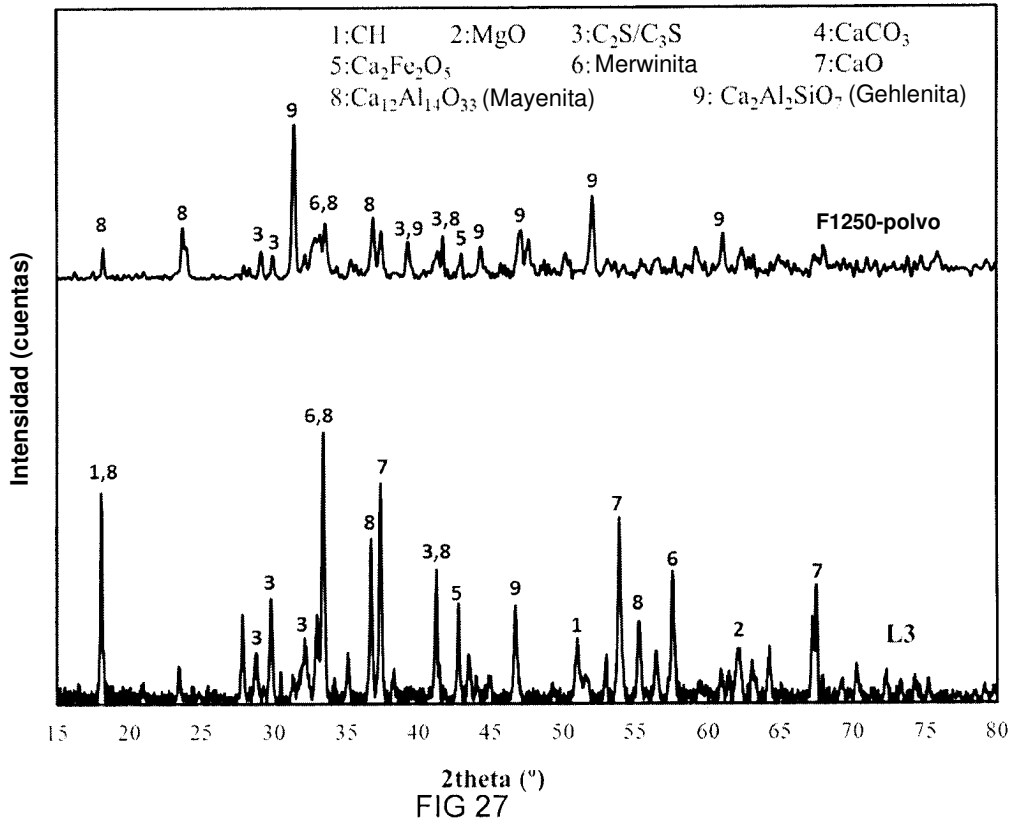


FIG 26



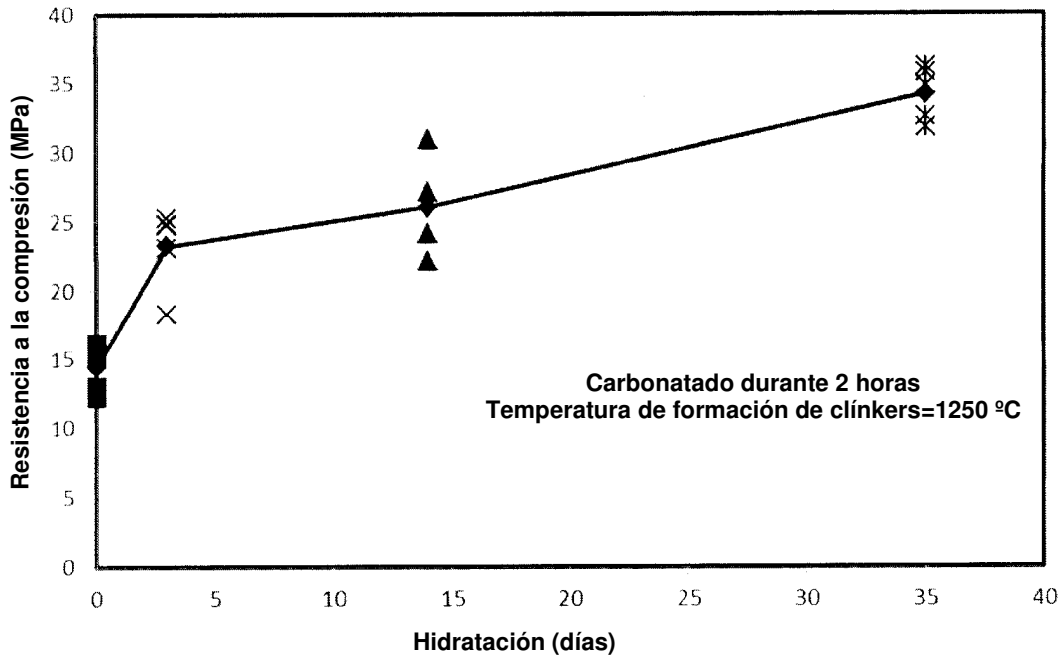


FIG 29

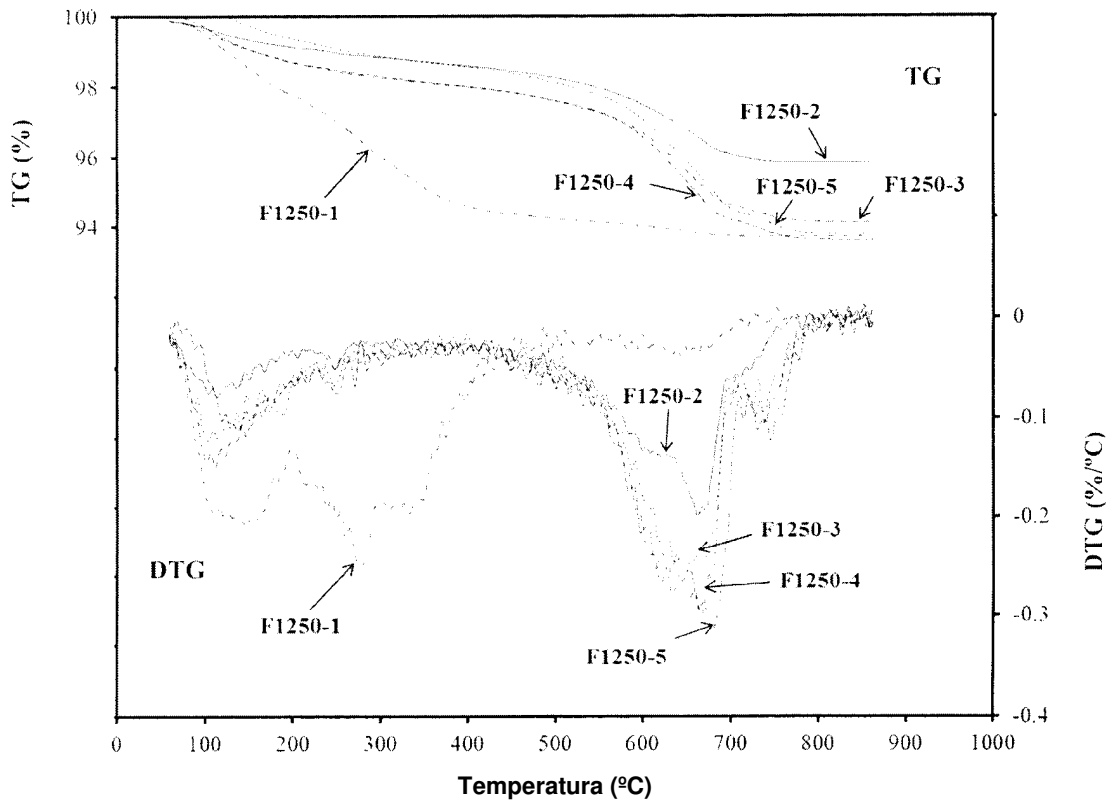


FIG 30

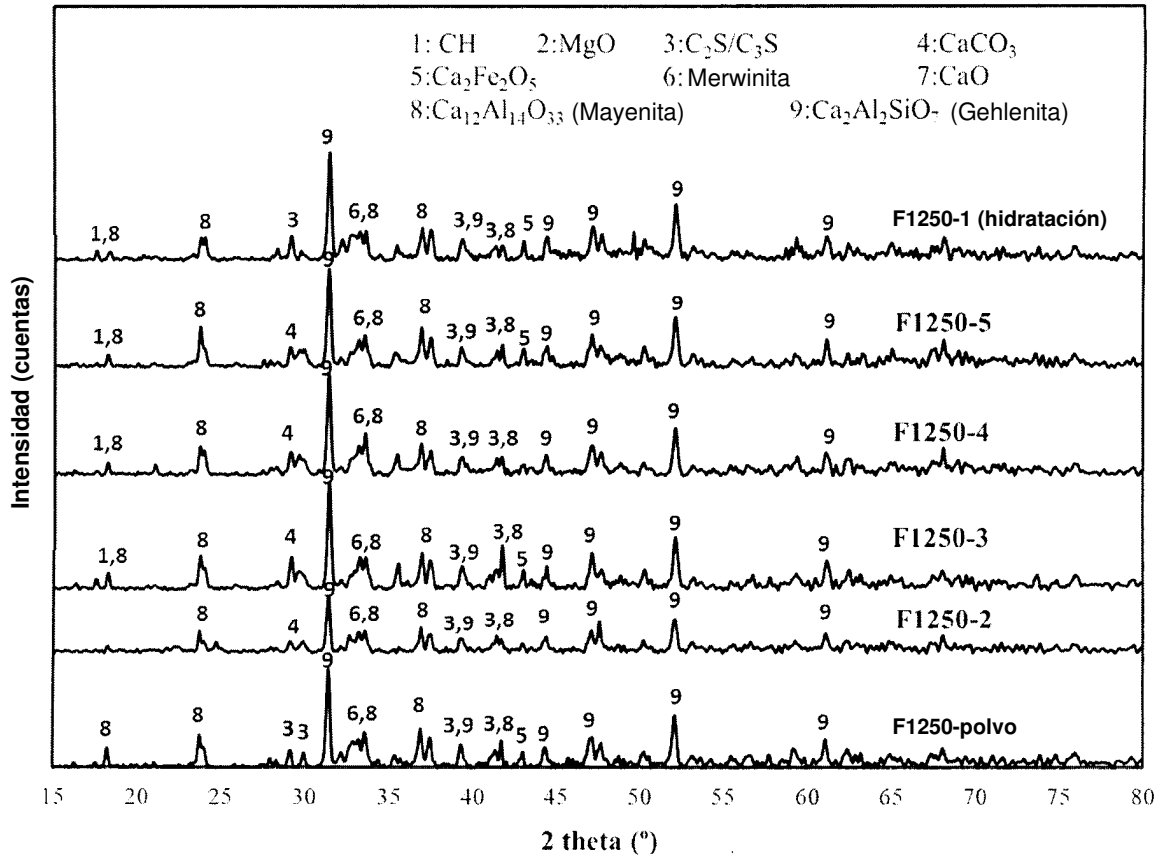


FIG 31