

MÉTODO DE DISEÑO Y PREPARACIÓN DE MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS INDUSTRIALES (RI) Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

5 CAMPO DE LA INVENCIÓN

La presente invención se relaciona con la transformación de materiales provenientes de RI y RCD para desarrollar materias primas y productos para uso en la construcción. Además, la presente invención se enmarca en
10 tecnologías limpias que contribuyen con la preservación del medio ambiente y mejoramiento de la calidad de vida de los seres humanos.

RESUMEN

15 La presente invención está dirigida a la transformación de RI y RCD, previo un proceso de caracterización exhaustiva basado en la evaluación de sus propiedades microestructurales como de sus propiedades físicas y químicas. De esta manera, es posible definir la aptitud de uso del residuo estudiado y reconocer los procesos para desarrollar su transformación. Posteriormente, los
20 residuos transformados se pueden utilizar como materias primas para la fabricación de materiales de construcción o se involucran en el diseño y desarrollo de materiales compuestos soportados en el concepto de mínimos espacios vacíos. Así se garantizan las propiedades mecánicas, la estabilidad y la durabilidad de los productos elaborados. Las propiedades ofrecidas por
25 estos residuos transformados pueden resaltarse tanto utilizando matrices de

conglomeración con participación parcial de cemento portland, así como trabajando matrices cementicias que conglomeran por reacciones silico-calcáreas o por reacciones de geo polimerización.

5 ESTADO DE LA TÉCNICA

En la actualidad, se conocen varios métodos para producir materiales cementicios a partir del reciclaje de residuos industriales como, por ejemplo, residuos de la fabricación de materiales cerámicos y otros elementos de construcción y de residuos varios de demoliciones que tienen alto contenido de metales en forma de óxidos tal como, por ejemplo, silicio y aluminio. Hoy en día es un objeto de investigación básica en la mayoría de los laboratorios especializados del mundo la activación alcalina de residuos con contenidos sílico-aluminosos en general y en particular de aquellos residuos generados por los procesos industriales para transformarlos en conglomerantes hidráulicos en el sector de la construcción puesto que la mayoría de los residuos industriales tienen en su estructura elementos como silicio y aluminio. Por ejemplo, las escorias siderúrgicas de alto horno y acerías, las cenizas volantes procedentes de las centrales termoeléctricas, el humo de sílice, etc., se encuentran entre ese conjunto de materiales que, por su alto volumen de disposición, centran el interés para encontrarles aplicaciones útiles y rentables. Así, un procedimiento como la activación alcalina, que estimula las reacciones químicas permitiendo transformar al residuo seleccionado en un extensor del Clinker o en un conglomerante hidráulico (comparable al

cemento portland en términos de propiedades físicas, químicas, mecánicas, durabilidad, etc.), puede presentar muchas variantes.

En el ámbito de las patentes, se conocen metodologías para procesar residuos cementantes, tal es el caso de la solicitud de patente colombiana NC2016/0002043, la cual está relacionada con un procedimiento de tratamiento de residuos de industria ladrillera y cerámica con un ahorro significativo energético y económico de las industrias relacionadas. El proceso comprende etapas de recolección de residuos de ladrillera y cerámica, trituración de los mismos hasta una finura de mallas de 325 (45 micras a 20 micras) con una humedad menor al 5%, luego una etapa de mezcla de finos a razón de 60:40; 40:60 ó 50:50 y luego mezclar con matrices de concretos a partir de diseños de presión de 3000 psi en un rango del 0.5% hasta el 40%.

También se conoce un método para la fabricación de materiales cementantes suplementarios o puzolonas para el reemplazo del cemento Portland en la producción de morteros y concretos, como es el caso de la solicitud de patente colombiana CO14-225693 en donde los materiales cementantes comprenden puzolanas naturales en forma de rocas y cenizas de origen volcánico y de origen sedimentario como tierra diatomácea. El proceso comprende trituración y luego sometimiento de las puzolanas a procesamiento altamente energético de molienda en un equipo de molienda.

Adicionalmente, se encuentra el documento de patente KR1020040022502 que está relacionado con un método de fabricación de cemento mediante el uso de residuos como materiales de suplemento, en donde los materiales

suplementarios son entre un 45 a 55% en peso de lodo producido de purificación de agua como fuentes de arcilla, de un 25 a 35% en peso de arena de moldeo de residuos como fuentes silíceas, de un 10 a 20% en peso de polvo corto como fuentes de óxido de hierro y entre 1 a 10 % en peso de polvo de alúmina como materiales de refuerzo. Los materiales complementarios se mezclan y se utilizan en el proceso de fabricación convencional de cemento.

Por su parte, el documento WO2016/082030 enseña métodos para contactar mezclas de concreto con dióxido de carbono. En este sentido, dicha invención enseña que se pueden utilizar materiales cementicios suplementarios (SCMs) y/o reemplazos de cemento en donde los SCM pueden incluir escoria, cenizas volantes, sílica fume, pozolanas naturales como metacaolin, arcillas, cenizas volcánicas, residuos industriales, y demás residuos industriales.

En este sentido, es claro que existe aún la necesidad no satisfecha de identificar la microestructura de cualquier residuo para determinar su potencialidad de uso y a su vez, reconocer los procesos para su transformación en un material útil, tal que se resalten sus características como material activo (mediante procesos de activación térmica, mecánica o química) o como material cuya morfología y tamaño permitan cerrar los espacios libres y mejorar las propiedades reológicas de los materiales compuestos desarrollados y en consecuencia, aportar también a las propiedades mecánicas y de durabilidad de los productos diseñados con estos.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

La figura 1 ilustra una planta de procesamiento que implementa un proceso de acuerdo con la presente invención.

La figura 2 muestra una gráfica del porcentaje de espacio vacío versus proporción de agregados de un experimento con agregados comerciales.

- 5 La figura 3 muestra cómo se construye un gráfico de Relación a/c versus Peso Unitario de la Pasta (suelto, compactado).

La figura 4 muestra una gráfica de la cantidad de pasta versus el asentamiento.

La figura 5 muestra una gráfica de Relación a/c versus Resistencia mecánica a compresión según edad de prueba.

- 10 La figura 6 muestra la relación de la resistencia a la compresión versus el contenido de cemento para un ejemplo de la invención.

La figura 7 muestra la relación de la resistencia a la compresión versus contenido de cemento MCS natural al 18% retenido en malla #325.

- 15 La figura 8 muestra la relación de la resistencia a la compresión versus contenido de cemento MCS base caliza al 5% retenido en malla #325.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

20

La presente invención se encuentra dirigida a un proceso o método de diseño y preparación de materiales para construcción a partir de residuos sólidos industriales (RI) y residuos de construcción y demolición (RCD), en donde el método tiene la posibilidad de transformar estos residuos con el fin de producir

- 25 material primas y/o materiales de construcción que cumplan con las exigencias

de las normas nacionales e internacionales de estos materiales. Adicionalmente, el proceso de la presente tecnología se enmarca en patentes de invención verdes, es decir, con tecnologías que contribuyen con la preservación del medio ambiente.

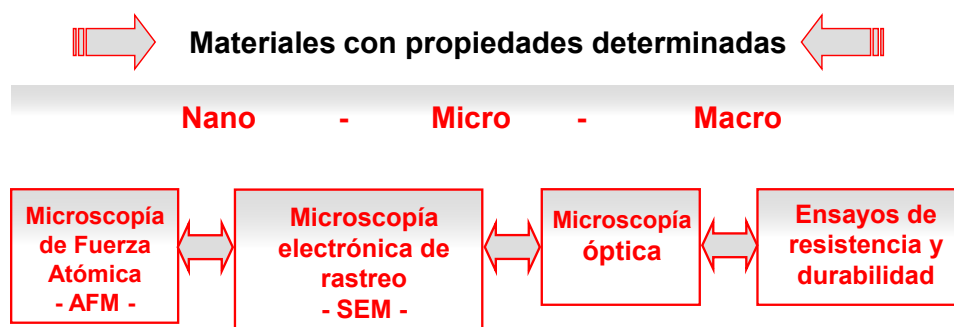
5

El proceso o método de diseño y preparación de materiales de construcción de acuerdo con la presente invención, se encuentra caracterizado porque comprende las siguientes etapas:

10 **1. ETAPA DE CARACTERIZACIÓN EXHAUSTIVA PARA DEFINIR APTITUD DE USO Y PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE LOS RI Y RCD**

Es la etapa que caracteriza a un residuo y permite reconocer su microestructura y con ello el potencial de uso. En la investigación de los
15 materiales es frecuente pasar de la escala de las moléculas y átomos (nano), a la de los poros que se producen entre los productos de reacción (micro), y de ésta a la dimensión del elemento (macro) para poder entender los cambios que se manifiestan visualmente como se enseña en el diagrama 1.

Diagrama 1: Caracterización de residuos



Dicha caracterización comprende las actividades de toma de muestra representativa, medición de gravedad específica, granulometría, desgaste, textura, difracción de rayos X, Fluorescencia de rayos X, microscopía de Fuerza Atómica (AFM), microscopia electrónica de rastreo (SEM), microscopia
5 óptica, ensayos de resistencia mecánica – durabilidad, etc. Mediante estos procedimientos se caracteriza el residuo y se reconoce su microestructura a fin de identificar su potencial de uso y se determinan los procesos para su transformación.

10 Esta actividad de caracterización exhaustiva va precedida de un diseño de experimento que desarrolla un plan de muestreo representativo obtenido mediante la aplicación de diferentes técnicas estadísticas.

Debido a las características propias de cada proyecto, se trabaja una metodología basada en los siguientes pasos:

15 **1. Fase de observación inicial:** Se lleva a cabo durante una semana con el objetivo de determinar un marco muestral, una población objeto de estudio, una metodología de muestreo probabilístico inicial.

2. Procesamiento y análisis de los datos obtenidos durante la fase de observación inicial: Consiste en digitalizar los datos obtenidos y
20 efectuar un análisis descriptivo de los mismos.

3. Diseño de un plan de muestreo piloto: Este diseño depende estrictamente de los resultados obtenidos en la fase 1 y 2. Es un procedimiento que se realiza con el ánimo de seleccionar una muestra de ensayo o muestra piloto, la cual permitirá obtener información de
25 referencia sobre la población. Este puede llevarse de manera menos

- 5 rigurosa debido al desconocimiento de las características de la población. Sin embargo, si se posee información sobre la población, y el muestreo piloto se realiza con rigurosidad, la muestra piloto obtenida podrá ser utilizada como parte de la muestra final, siempre y cuando, se determine que la metodología a aplicar es la misma. Tener los resultados de un muestreo piloto conlleva algunas ventajas como:
- La identificación de situaciones que entorpezcan la selección y/o medición y que no se hayan tenido en cuenta al momento del diseño del plan de muestreo;
 - 10 • Ayuda a estimar una proporción de referencia para definir el tamaño de muestra final;
 - Permite calcular un tamaño de muestra inferior al máximo;
 - Permite identificar y estimar costos del trabajo de campo;
 - Ayuda a decidir sobre cambios a favor de la mejora del diseño de muestreo;
 - 15 • Permite la calibración y evaluación de la idoneidad de los instrumentos de medición; y
 - Permite un mejor diseño del plan de muestreo final y obtener con este una muestra final de mayor calidad y menor costo, tanto operativo como económico.
 - 20
- 4. Ejecución del muestreo piloto:** Es una fase fundamental para diseñar un plan de muestreo general puesto que los resultados obtenidos ayudarán a definir una proporción de referencia y esta a su vez un tamaño de muestra adecuado. Sí el muestreo piloto se encuentra bien

diseñado, la muestra aquí recabada podrá ser parte de la muestra final general.

- 5
- 5. Análisis de datos del muestreo piloto:** En esta fase se digitarán y analizarán los datos obtenidos en la ejecución del muestreo piloto. La finalidad principal es entregar un tamaño de muestra óptimo que garantice un nivel de confianza y un error definido.
- 10
- 6. Diseño del plan de muestreo final:** Esta fase tiene la finalidad de generar un formulario y proporcionar un listado de acciones que garanticen la toma de una muestra representativa para asegurar la estimación de la proporción de materiales cerámicos dentro de la población definida, con un nivel de confianza y error determinados. La realización de esta fase depende estrictamente de las fases 4 y 5, puesto que sin estas no se podría llevar a cabo de manera correcta.
- 15
- 7. Ejecución del plan de muestreo final – balance de masa:** En esta fase se obtendrán los datos que permitirán estimar la proporción de cerámicos y realizar el balance de masa.
- 20
- 8. Análisis de datos del muestreo final:** Aquí se digitarán y analizarán los datos obtenidos en la ejecución del muestreo final. El objetivo principal es generar la estimación de la proporción de cerámicos presentes, la cual estará generalizada a toda la población gracias a las propiedades del muestreo probabilístico.
- 25
- 9. Toma de muestras con fines de caracterización:** Será el momento de la toma de muestras para llevarlas a los laboratorios de caracterización física, química y micro estructural. Todo lo anterior estará precedido de un proceso de adecuación y preparación de las

muestras recolectadas, para luego proceder al proceso de cuarteo, conformación y embalaje de las muestras y contra muestras que se enviarán a laboratorios. Además, se tomarán las muestras para iniciar el diseño de productos y dar pie al pre diseño del (os) proceso (s).

5

Con todos los pasos anteriores, se garantiza que los resultados representen al todo de los residuos en análisis. Es una etapa crucial y esencial en cualquier estudio sobre valorización de residuos. Dentro de la caracterización exhaustiva caben mediciones de: gravedad específica, masa unitaria, granulometrías, tamaño de partículas (granulometro láser) desgaste o abrasión, textura, fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X, microscopia de Fuerza Atómica (AFM), microscopia electrónica de rastreo (SEM), microscopia óptica y ensayos de resistencia-durabilidad de acuerdo con estándares determinados, entre otros.

10

15

Maneras de transformar residuos en SCM R/I.

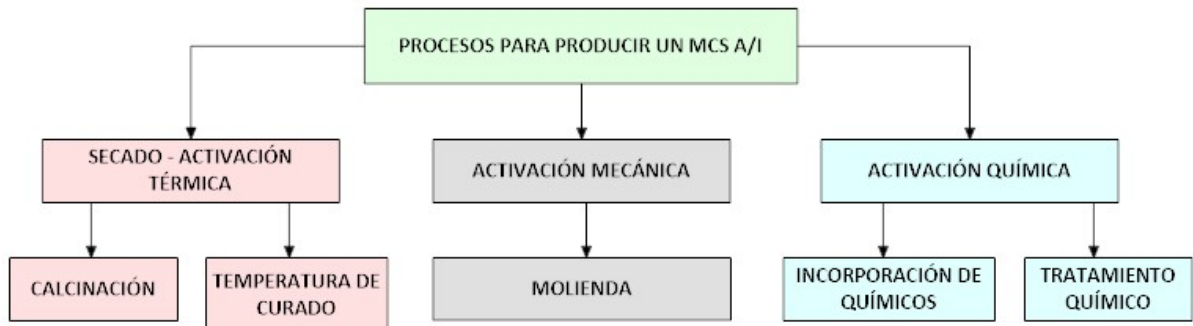


Diagrama 2: Procesos para desarrollar los MCS

Las tres maneras reconocidas para activar o manejar residuos como SCM, son:

- 5 ✓ Sí se utilizan residuos industriales, RCD, lodos de PTAR inertes o pseudo-activados térmicamente (con algún grado de amorficidad o reactividad química), estos deben pasar por un proceso de secado, para luego, sí hace falta, mejorar a los que poseen potencial reactivo mediante una calcinación controlada, *activación térmica* a la temperatura de activación definida previamente en estudios de ingeniería de las reacciones químicas, ésta fluctúa entre 450 y 650 °C.
- 10 ✓ Tanto el producto seco cristalino y el amorfo tratado térmicamente serán totalmente inertes si no se llevan a la finura de activación o de micro fillerización, la cual es propia de cada material. El proceso consiste en reducir mecánicamente el tamaño de las partículas hasta definir la mejor eficiencia de respuesta activa con el menor consumo de energía posible.
- 15 En general las partículas mayores a 12 µm, no aportan mucho a la reactividad química, aunque mejoraran las propiedades mecánicas y de durabilidad de los productos que las contengan, sí se dosifican mediante el método de espacios libres.
- 20 ✓ Cuando los resultados alcanzados con los dos procedimientos descritos no son óptimos, es posible emplear la activación química como alternativa. En general se pueden emplear diversos tipos de catalizadores cuya efectividad dependerá de la característica microestructural del residuo. Esta fase busca que estos nuevos materiales cementicios no solo actúen en presencia del cemento portland sino que también “per se” consigan

conglomerar utilizando reacciones de geo-polimerización o silico-calcáreas a bajas temperaturas o temperatura ambiente.

2. ETAPA DESCRIPTORA DEL PROCESO TIPICO PARA LA 5 TRANSFORMACIÓN DE RI Y RCD

La figura 1 ilustra una planta de procesamiento que implementa un proceso de acuerdo con la presente invención, en donde se procesan residuos industriales (RI), residuos de construcción y demolición (RCD), lodos provenientes de
10 plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales (PTAR).

Como las materias primas para procesar, diseñar y preparar materiales para construcción de la presente invención, son residuos de construcción y demolición (RCD), residuos industriales (RI), lodos inorgánicos de plantas de
15 tratamiento de agua potable o de aguas residuales, etc, la etapa inicial consiste en un proceso de clasificación de materiales, donde se separan de los residuos a tratar, los materiales orgánicos e inorgánicos no aptos para producir materiales de construcción, por ejemplo: se retiran metales (hierro, estaño, aluminio, cobre, etc), materia orgánica, papel, plásticos, madera, etc.). Esta
20 etapa se puede llevar a cabo, por ejemplo, con una banda transportadora de longitud determinada y velocidad controlada, también se puede incluir un separador magnético para retirar los metales ferrosos, se podría emplear un proceso de separación por densidad, separación por tamaño, etc., o mezcla de cualquiera de estas técnicas de separación. Estos materiales se
25 almacenarán en un depósito (4). En el caso de residuos tales como lodos

inertes o estabilizados de Plantas de Tratamiento de aguas residuales (PTAR), estos ingresan a un invernadero de secado representado por el número (11).

Cumplida esta etapa preliminar, los materiales en los depósitos (1 y 11) se transportan a un horno de secado – calcinación (105 hasta 650 °C) (8) previo proceso de reducción y clasificación de tamaño (2, 3, 5, 6). El recinto (11) es un invernadero de pre-secado (temperatura entre 35 y 60 °C generada por energía solar) que permite reducir el consumo de energía cuando las humedades de los residuos son superiores al 25%, en estos invernaderos hay equipos para el control de humedad. Cuando algún residuo tiene un tamaño superior a 25 mm, se envía a un proceso de trituración (5) clasificación (6), antes de ingresar al horno (8). A la salida del horno (8) hay varias corrientes de materiales, una de gases y depuración de material particulado (9, 10, 12), una de clasificación de material grueso y finos que permiten separar materiales diferentes que se almacenan en silos que alimentan procesos de molienda. Una vez los residuos se encuentran secos, se transportan a silos (14, 15, 16) y de ahí, a un sistema de reducción de tamaño (17, 18), sea con molinos micro-pulverizadores ($< 12 \mu\text{m}$) o a molinos para producción de micro fillers (> 45 hasta $75 \mu\text{m}$). Estos últimos equipos aportan la adaptación de la morfología de las partículas del material, por ejemplo, a formas ovoides o circulares con tamaños de partícula determinados.

Después de esta etapa de reducción de tamaños (gruesos a finos), se introducen a procesos de dosificación (21), mezclado (22), transporte a silos (23, 24) para llegar a procesos de conformado, p.e.: ladrillos, tabletas, bloques,

adoquines, etc. (25) o a procesos de ensacado o ensilado para distribución de productos a granel (26, 27).

ALGUNOS ASPECTOS COMPLEMENTARIOS BÁSICOS

5

Adicionalmente, con base en el análisis ejecutado en la etapa de caracterización, se pueden realizar otra clase de activaciones diferentes a la activación térmica. Esto dependerá de su carácter activo o inerte. De acuerdo con la presente invención, en esta etapa, además de la calcinación, se puede
10 realizar la activación alcalina, cuando en los materiales de partida se ha encontrado un contenido de sílice amorfa significativo. Dicha sílice puede ser atacada por el medio básico en el que se va a introducir. Sin embargo, los diferentes residuos potencialmente catalizables alcalinamente, independientemente de su procedencia, contienen además de la sílice amorfa
15 otros componentes que hay que considerar para optimizar el proceso de la activación alcalina. Por ello se distingue como mínimo dos tipos de materiales:

- ✓ Tipo I. Cuando el material posee una cierta cantidad de Al_2O_3 amorfo con cierta capacidad reactiva, de manera que la proporción $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ del material constituya el esqueleto básico de su composición
20 (la suma de esos dos óxidos está por encima del 60% respecto de la composición química total), entonces dicho material es susceptible de fraguar y endurecer en medios fuertemente básicos formando estructuras tridimensionales similares a las de las zeolitas cuando se estén empleando dichos materiales como materiales cementantes o
25 materiales cementicios suplementarios; y

- ✓ Tipo II. Si el material además de poseer una cantidad baja de Al_2O_3 , contiene elevados porcentajes de CaO (proporciones de $\text{SiO}_2 + \text{CaO}$ superiores al 70 %), entonces la presencia de álcalis en el sistema puede estimular la activación de reacciones que generen fundamentalmente silicatos cálcicos hidratados (del tipo del gel de tobermorita), similar al que se produce en la hidratación del cemento portland, cuando se estén empleando dichos materiales como materiales cementantes o materiales cementicios suplementarios (MCS).
- 10 En esta forma de activación química, otro aspecto importante es la proporción de material alcalino que incluya la dosificación. Cuando la concentración alcalina de la disolución activadora es inferior al valor de una disolución 5M de NaOH , la reacción de formación de gel CSH se ve considerablemente favorecida en el caso de los materiales que contienen elevados porcentajes de CaO (materiales del tipo II). Ocurre también, que la reacción de formación del silicio-aluminato alcalino de estructura tridimensional tipo zeolita, apenas se produce en la activación de residuos correspondientes al tipo II y sí lo hace es muy lentamente. Cuando el medio básico supera el valor de una disolución 5M de NaOH , entonces la reacción de formación del silico-aluminato alcalino de estructura tridimensional, precursor zeolítico, se produce con intensidad en los materiales del tipo I. La velocidad de formación de dicho producto se ve notablemente incrementada con la temperatura. Concentraciones alcalinas del orden de una disolución 8M de NaOH , por ejemplo, entre 5M y 10M de NaOH , se consideran óptimas

por no aportar más álcalis que los estrictamente necesarios para que se produzca la reacción.

En este sentido, el método de diseño y preparación de materiales para construcción a partir de residuos sólidos industriales y residuos de construcción y demolición comprenda las etapas de:

- a) caracterización exhaustiva de los residuos industriales y residuos de construcción y demolición; y
 - b) transformación de residuos industriales y residuos de construcción y demolición,
- en donde, en la etapa a) mediante los análisis de técnicas como medición de gravedad específica, granulometría, desgaste, textura, difracción de rayos X, Fluorescencia de rayos X, microscopía de Fuerza Atómica (AFM), microscopia electrónica de rastreo (SEM), microscopia óptica y ensayos de resistencia mecánica–durabilidad, se reconoce la microestructura en una muestra representativa del material que se va a transformar. En donde dicha muestra se toma de manera estadística.

Adicionalmente, el método de diseño y preparación de materiales para construcción a partir de residuos sólidos industriales y residuos de construcción y en la etapa b) de transformación de residuos se lleva a cabo a través de secado – activación térmica; activación mecánica; activación química y combinaciones de las mismas.

En otra modalidad de la invención, en el método de diseño y preparación de materiales para construcción a partir de residuos sólidos industriales y

residuos de construcción y demolición, el secado y activación se hace por calcinación; la activación mecánica se hace por molienda; y la activación química se realiza por la incorporación de químicos y tratamiento químico.

- 5 Aún más, en el método de diseño y preparación de materiales para construcción a partir de residuos sólidos industriales y residuos de construcción y demolición, se realiza la separación de metales, materia orgánica y materiales orgánicos e inorgánicos no aptos para producir materiales de construcción, mediante clasificación manual o mecánica, en
10 donde la separación mecánica puede ser por medio de bandas transportadoras, mallas de separación por tamaño, etc.

- El método de diseño y preparación de materiales para construcción a partir de residuos sólidos industriales y residuos de construcción y demolición de
15 acuerdo con la invención puede realizar la transformación adicional de lodos inertes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que son almacenados en un invernadero de secado (11).

- Además, en el método de diseño y preparación de materiales para
20 construcción a partir de residuos sólidos industriales y residuos de construcción y demolición, en la etapa b) se reduce mecánicamente el tamaño de las partículas entre 5 y 75 μm y la humedad se maneja desde 25% hasta 0%.

En el método de diseño y preparación de materiales para construcción a partir de residuos sólidos industriales y residuos de construcción y demolición, el material analizado en la etapa a) ingresa al horno (8).

- 5 En el método de diseño y preparación de materiales para construcción a partir de residuos sólidos industriales y residuos de construcción y demolición, a la salida del horno (8) hay varias corrientes de materiales, una de gases y depuración de material particulado (9, 10, 12), una de clasificación de material grueso y finos que permiten separar materiales diferentes que se almacenan
- 10 en silos que alimentan procesos de molienda.

- En el método de diseño y preparación de materiales para construcción a partir de residuos sólidos industriales y residuos de construcción y demolición, en una etapa final, una vez los residuos se encuentran secos, se transportan a
- 15 silos (14, 15, 16) y de ahí a un sistema de reducción de tamaño (17, 18), sea con molinos micro-pulverizadores ($< 12 \mu\text{m}$) o a molinos de martillos para producción de materiales gruesos ($>75 \mu\text{m}$).

DESARROLLO DE UN DISEÑO DE MEZCLAS DE UN MATERIAL

20 **COMPUESTO**

Todo material compuesto está integrado mínimo por una matriz cementante y otra matriz de relleno o agregados. La matriz conglomerante es minoritaria en su participación en el volumen del producto a elaborar o diseñar.

Los **matrices cementantes**, denominadas generalmente pastas, se conforman por lo general, con materiales tales como: cemento portland y agua; un MCS (material cementicio suplementario), cemento portland, agua; un MCS, cemento portland, agua, aditivos y un catalizador; un MCS, cal, agua; 5 un MCS, cal, agua, aditivos y un catalizador; un MCS, uno o dos productos geo-polimerizantes y aditivos. En todos los casos el MCS provienen de residuos industriales (RI) o escombros de construcción y demolición (RCD). La diferencia entre un MCS y una puzolana radica en que el MCS puede estar conformado por uno o más residuos adecuadamente tratados mientras la 10 puzolana proviene de una sola fuente natural o artificial.

Las matrices de relleno o de agregados corresponden a la fracción que más volumen ocupa en un material compuesto. Se conforman con materiales de uso convencional o con agregados elaborados con RI y RCD. Sí con cualquier 15 material base para elaborar agregados se producen micro fillers, se integran a la matriz de relleno tamaños que cierran los espacios entre agregados permitiendo que, la matriz cementante se reduzca (en peso) y pueda contribuir a mejorar las propiedades de: estabilidad volumétrica, durabilidad, las propiedades mecánicas

20

Determinación del espacio libre mínimo (% espacio vacío): Es necesario conocer previamente de cada agregado o relleno a utilizar, el peso unitario o volumétrico, suelto y compactado, la absorción y la gravedad específica. También se determinará la humedad del agregado. Se siguen las normas 25 respectivas.

- **Determinación de la velocidad inicial de absorción de la matriz de relleno o de agregados.**

5 El procedimiento es el siguiente:

En una probeta graduada (mínimo 1000 cm³ de capacidad), se introduce una muestra representativa del agregado en prueba, (el cual puede ser un RI o un RCD o una mezcla de ambos materiales previamente tratados), siempre y cuando éste se encuentre en estado de absorción libre. El agregado se cubre totalmente con agua, buscando enrasar el menisco con alguna marca de graduación de la probeta, siempre por encima de la superficie del agregado superior. (Ver diagrama 3). Se mide el cambio de volumen presentado en los primeros 10 minutos de la prueba. Si éste es imperceptible o mínimo, se considera como constante la absorción y se procede a la determinación de los espacios libres utilizando el método con agua. Caso contrario, será necesario trabajar con los agregados en estado de superficie seca saturada.

Nivel Original = 1000 cc

Nivel final = 998 cc

Diferencia = 2 cc

% = 0.2

Valor no significativo.

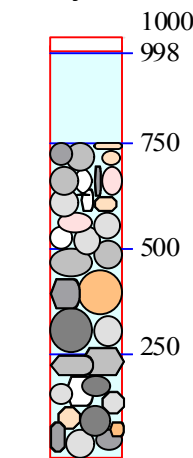


Diagrama 3: Medición de la Velocidad de Absorción

- **Determinación de la proporción óptima de la matriz de agregados por el método de espacios libres o porcentaje de vacíos.**

Consiste en ensayar las mezclas de los agregados en diferentes proporciones del peso de finos y gruesos. Como ejemplo se pueden seguir las siguientes dosis en porcentajes (%):

0:100, 30:70, 50:50, 70:30, 100:0

Realizada la mezcla, se determina el peso unitario compactado de cada una de las mezclas de agregados. Los agregados deberán estar en el estado en que se encuentran en el depósito y así se deberán probar. Si el resultado de la prueba de velocidad inicial de absorción del agregado no es significativo, se continúa el experimento. Si la velocidad de absorción inicial es significativa, los agregados deberán llevarse al estado de superficie seca saturada.

En el mismo recipiente de la prueba de peso unitario y con el material compactado, se procede a incorporar agua hasta que ella se rebose. Se determina la cantidad de agua adicionada. Este valor corresponde al espacio vacío en volumen. Como se conoce el volumen inicial del recipiente, se puede determinar cuál es el porcentaje de espacio vacío resultante. Se construye una gráfica de % de espacio vacío versus proporción de agregados. Se encuentra por interpolación cuál es el mínimo valor de porcentaje y ese identifica la proporción de agregados. En la tabla 1 y la figura 2, se observan los resultados de un experimento con agregados comerciales.

Tabla 1: Resultados experimentales de mezclas de una arena y una grava comercial

%G	%A	Puc (Kg/cm³)	EL * (cm³)	%EL **
0,0	100,0	1.54	995,0	34,9%
10,0	90,0	1.77	900,0	32,0%
20,0	80,0	1.68	810,0	28,4%
30,0	70,0	1.70	800,0	28,1%
40,0	60,0	1.76	710,0	24,2%
50,0	50,0	1.86	660,0	23,2%
60,0	40,0	1.86	690,0	24,2%
70,0	30,0	1.77	810,0	28,4%
80,0	20,0	1.72	875,0	30,7%
90,0	10,0	1.57	1.090,0	38,2%
100,0	0,0	1.46	1.230,0	43,2%

*EL: espacio libre

**% EL: porcentaje de espacios libres

5

El comportamiento de los resultados se puede observar en la figura 2

- **Determinación del peso unitario compactado (PUC) de la pasta de cementantes de distintas relaciones a/cementante**

10 Se preparan diferentes pastas, entendiéndose por pasta la mezcla de todos los materiales cementantes empleados en un diseño, incluyendo el agua,

con relaciones a/c (agua/cementantes) definidas dentro de los valores típicos de trabajo en el medio. Por ejemplo, relaciones a/c:

0.40, 0.50, 0.60, 0.70

5 Se construye un gráfico de Relación a/c versus. Peso Unitario de la Pasta (suelto, compactado). Ver figura 3. Se toma un valor relativo, uno de los más utilizados por la experiencia, 0.6 por ejemplo. Se interpola y se encuentra el peso unitario de la pasta.

10 Con este valor y el valor del espacio vacío, es posible determinar la cantidad de pasta óptima para llenar dichos espacios. Por ejemplo, si el espacio vacío es del 23% y el peso unitario de la pasta es de 1730 kg/m^3 , en 1 m^3 de concreto habrá 230 litros de espacios vacíos, en los cuales se ubican 398 kg de pasta de relación agua cemento 0.6. Ello significa utilizar 249 kg de cemento y 149 lt de agua.

15 Como esta cantidad de pasta es exactamente la necesaria para llenar los espacios vacíos, la mezcla que se prepare con ella no será plástica. Ello significa que el paso siguiente será encontrar la cantidad de pasta que consigue la trabajabilidad o consistencia buscada.

20 Sí la relación óptima de agregados encontrada corresponde al 50% de Arena y 50% de Grava, la relación agua cemento es de 0.6 y se estima que el peso del concreto es de 2350 kg/m^3 , es posible diseñar mezclas que tengan un incremento de la participación de la cantidad de pasta

conservando la relación agua cemento. Por ejemplo, en la Tabla N° 4 se presentan varias cantidades de pasta.

TABLA 2: Variación de la cantidad de pasta conservando la relación a/c constante

Cantidad de cemento (kg)	Cantidad de agua (kg)	Cantidad de Pasta (kg)	Asentamiento (cm)
243,75	146,25	390,00	3,30
278,75	167,25	446,00	4,32
337,50	202,50	540,00	6,35
357,50	214,50	572,00	7,11
393,75	236,25	630,00	8,64
Para	a/c =	0,60	

Es necesario hacer una corrección a la dosificación original, puesto que, al incrementarse la cantidad de pasta, el incremento de volumen que ella ocasiona debe restarse del volumen de agregados. Como se conoce el peso unitario de la pasta, por ejemplo, para este caso es de 1730 kg/m³, y el peso unitario de la mezcla de agregados establecida como óptima, por ejemplo 1860 kg/m³, será fácil establecer cuál es la corrección. Así, al calcular el incremento del peso de la pasta entre las mezclas 2 y la 1 de la Tabla 4, este es de 56 kg. Ello significa un volumen de 0.03236 m³, que en peso de agregados significa restar 60,2 kg. Así el volumen del concreto permanece fijo, aunque su peso cambia ligeramente, pero se está

conservando la relación de vacíos original del 23%. Evidentemente al elaborar esta mezcla su trabajabilidad será mayor que la primera. De esta forma se continúa trabajando para construir un gráfico de Cantidad de Pasta v.s. Asentamiento (fluidez). Ver figura 4.

5

Se hace la interpolación y se define cual es la cantidad de pasta óptima para conseguir la fluidez definida. Con ello se tiene la dosificación y por ende un resultado de resistencia.

10

Cuando se tiene experiencia con los materiales locales, esta aproximación se realiza partiendo de la información del agua requerida comúnmente para conseguir el asentamiento solicitado. Hay que recordar que el agua es la única variable independiente en el diseño de mezclas.

15

Se procede a variar el valor de la relación a/c, por encima o por debajo de 0.6, y se repite el procedimiento descrito anteriormente hasta disponer de datos que permitan elaborar la gráfica de relación a/c v.s. resistencia a diferentes edades. Ver tabla 3 y figura 5.

Tabla 3: Resistencias a compresión v.s. la edad de prueba en función de la relación a/c

	RESISTENCIA (MPa)			
	a/c			
	0,5	0,6	0,7	0,8
edad				
3	20,2	13,5	11,0	5,1
7	23,1	18,6	15,7	9,1
28	33,4	26,3	21,4	11,4

Todo lo anterior permite reconocer un método de diseño basado en una deducción permanente y segura que garantiza la reproducibilidad de las mezclas. Este principio de diseño está basado en las propiedades reales de los materiales y las mezclas y su certeza dependerá fundamentalmente de atender los requerimientos que la tecnología de diseño de materiales compuestos le asigna al clima, al medio ambiente, a satisfacer las condiciones del proceso de elaboración, transporte, colocación y curado del producto elaborado. Con este método se consigue la optimización de la dosis de materiales cementantes, lo cual redundará en mayor durabilidad y estabilidad de las obras y además, permite alcanzar economías en el costo final del producto. Los datos suministrados son de un diseño real.

DESARROLLO DE RESISTENCIAS MECÁNICAS ENTRE 1 Y 45 DÍAS, PARA CONCRETOS ADICIONADOS CON UN MCS® DE ORIGEN NATURAL Y UN MCS (I) DE ORIGEN CALCAREO

En este punto se presenta, cómo evaluar los efectos que tienen una adición de un MCS ® de origen natural y otro MCS (I) de origen calcáreo en las propiedades del concreto. Ambas adiciones fueron molidas independientemente. El MCS ® de origen puzolana natural se trabajó con una finura del 18 y el 5 % retenido sobre la malla # 325 (44 μ m) y el MCS (I) de origen calcáreo se preparó con una finura del 5% R#325. Con estas adiciones se pretende definir el valor de la constante de equivalencia de cemento portland de cada una. Para dosificar los agregados se utilizó el método de los

mínimos vacíos y para dosificar el cemento portland, el MCS ® de origen natural y el MCS (I) de origen calcáreo, se empleó el método modificado de reemplazo.

Las proporciones de mezcla de las adiciones al concreto siguieron la expresión:

$$C_{equivalente} = C_{pp} + k \times a$$

donde:

C_{equivalente}	cemento equivalente (kg)
C_{pp}	cemento portland puro (kg)
k	constante de equivalencia de la adición o el MCS
a	participación de la adición MCS (kg)

La relación agua cemento (w/c) se calcula como: **w/c_{equivalente}**, donde w = agua de mezcla

Se plantea, que toda mezcla cuyo contenido de material cementante este controlada por esta ecuación tendrá siempre la misma resistencia a cualquier edad. Sin embargo, hay un contenido mínimo de cemento portland puro por debajo del cual las resistencias decrecen. En esta experimentación se realizaron pruebas mecánicas a compresión.

Los resultados muestran que la constante de equivalencia de la adición de caliza es del orden de 0.3. La adición de puzolana natural tiene una constante de equivalencia del orden de 0.4.

1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS Y ANÁLISIS

En las tablas 4, 5, 6, 7 y en las gráficas N° 5, 6, 7, se presentan los resultados de los ensayos. Las mezclas se prepararon buscando una plasticidad constante, con un asentamiento comprendido entre 7.5 ± 1.25 cm. Las mezclas que contenían **MCS Natural** y que fueron dosificadas para una k de 0.4, tuvieron el siguiente comportamiento estadístico:

MCS Natural, k = 0.4	5% R#325	18% R#325
Promedio: $w/(c+ka)$	0.61	0.60
Desviación Standard	0.04	0.03
Coeficiente de Variación (%)	6.71	4.79

Las mezclas preparadas con **MCS base caliza** y que fueron dosificadas para una k de 0.3, tuvieron el siguiente comportamiento:

MCS base caliza, k = 0.3	5% R#325
Promedio: $w/(c+ka)$	0.66
Desviación Standard	0.07
Coeficiente de Variación (%)	10.08

Respecto a la reología de las mezclas, el **MCS base caliza** con finura del 5 % R#325 (44 μm) poseía un tamaño medio de partículas de 6.17 μm , y presentó una mayor demanda de agua. La adición de **MCS Natural**, que fue molida al 5 % R#325 (44 μm) tuvo un tamaño medio de 6.85 μm , pero como posee partículas de mayor coeficiente de forma y menos porosas, redujeron el

consumo de agua para similar comportamiento reológico a la mezcla con caliza. Sin embargo, a mayor finura de **MCS Natural** se observó un incremento del coeficiente de variación de la relación agua:cementante.

- 5 En cuanto a las resistencias mecánicas, el procesamiento estadístico de todas las resistencias obtenidas, a una edad definida, variando el contenido de cemento puro desde 320 kg/m³ (mezcla de referencia) hasta 240 kg/m³, se muestra en la Tabla N° 8.
- 10 Se concluyó que la constante de equivalencia de cemento de las adiciones ensayadas está alrededor de 0.4 para el **MCS Natural** y de 0.3 para el **MCS base caliza**. Al analizar las gráficas N° 5, 6, 7, se observa que las resistencias mecánicas a compresión se encuentran en un rango cercano, aunque se reduzca el contenido de cemento portland puro.
- 15 También, de estas figuras, se deduce que el mínimo contenido de cemento portland puro aceptable para conservarse en el rango de la resistencia de la mezcla de referencia, es de 280 kg/m³. Esto se cumple tanto para la adición de MCS Natural y el MCS base caliza.
- 20 De los resultados anteriores, se puede concluir que:
- La constante de equivalencia de cemento del MCS natural se estima en un valor de 0.4
 - La constante de equivalencia de cemento de la adición de MCS base caliza se estima en un valor de 0.3
- 25

- El mínimo contenido de cemento apto para mantener la resistencia de la mezcla de referencia es de 280 kg/m^3 , independiente de que se adicione cualquiera de los dos MCS probados.
 - El MCS natural que se adicione al concreto debe tener como mínimo una finura del 18% R#325.
 - La adición al concreto de MCS base caliza, molida a alta finura, genera un mayor consumo de agua para mantener la plasticidad de la mezcla, afectando las resistencias mecánicas.
- 10 En este caso se está presentando un ejemplo de trabajo donde se pretende mostrar que este material activo (que corresponde a un MCS(R) procesado de origen natural) e igualmente la caliza (que corresponde a un MCS(I) procesado), también contribuye a mejorar las propiedades mecánicas a compresión. La mezcla de ambos MCS, generaron una mejora notable en las propiedades del material compuesto fabricado.

Por consiguiente, el método de diseño y preparación de materiales para construcción a partir de residuos sólidos industriales y residuos de construcción y demolición (RCD) de acuerdo con la presente invención con base en el método de mínimos vacíos y las constantes de equivalencia de cemento obtenidas para cada residuo procesado, producen materiales compuestos que emplean como conglomerantes materiales cementicios suplementarios (MCS) que pueden utilizar o no cemento portland, para conformar ladrillos para divisiones y estructurales; bloques para divisiones y estructurales; adoquines para vías y senderos; fachaletas; pavimentos para

andenes, ciclovías, senderos y vías terciarias; morteros de mampostería; elementos prefabricados como mobiliario urbano.

TABLA N° 4: DOSIFICACIONES DE CONCRETO

[illegible]

TABLA N° 5: CONCRETO ADICIONADO CON MCS Natural, AL 5% RM#325

	Curado Térmico kg/cm²	R1día kg/cm²	R3días kg/cm²	R7 días kg/cm²	R28 días kg/cm²	R45 días kg/cm²	w/(c+ka)	k	Cemento (kg.)
D3P1	161	105	180	230	275	306	0.609	0.2	310
D3P2	155	105	200	194	276	296	0.595	0.3	310
D3P3	143	99	171	209	241	332	0.617	0.4	310
D3P4	156	95	150	241	259	296	0.576	0.2	300
D3P5	141	90	189	213	276	315	0.553	0.3	300
D3P6	130	94	174	223	283	323	0.557	0.4	300
D3P7	153	85	146	200	273	300	0.674	0.2	280
D3P8	117	68	116	170	266	284	0.471	0.3	280
D3P9	131	86	142	201	252	269	0.594	0.4	280
D3P10	134	64	136	172	212	241	0.716	0.2	260
D3P11	123	93	150	198	222	232	0.536	0.3	260
D3P12	132	108	145	205	230	243	0.663	0.4	260
D3P13	115	82	134	175	197	233	0.802	0.2	240
D3P14	119	85	133	183	214	231	0.758	0.3	240
D3P15	120	88	137	187	210	228	0.641	0.4	240
D3	153	120	174	230	276	325	-	-	320

TABLA N° 6: CONCRETO ADICIONADO CON MCS Natural, AL 18% RM#325

	Curado Térmico kg/cm²	R1día kg/cm²	R3días kg/cm²	R7días kg/cm²	R28días kg/cm²	R45días kg/cm²	w/(c+ka)	k	Cemento (kg.)
D3P1	149	105	167	197	272	245	0.594	0.2	310
D3P2	166	111	174	221	259	293	0.595	0.3	310
D3P3	160	98	160	206	190	293	0.547	0.4	310
D3P4	0	106	139	206	295	286	0.616	0.2	300
D3P5	143	91	160	244	305	314	0.576	0.3	300
D3P6	-	90	166	212	303	303	0.595	0.4	300
D3P7	160	81	144	189	250	290	0.704	0.2	280
D3P8	137	86	151	174	272	287	0.637	0.3	280
D3P9	143	94	139	194	262	293	0.608	0.4	280
D3P10	123	82	139	173	213	220	0.711	0.2	260
D3P11	138	94	151	206	227	237	0.641	0.3	260
D3P12	138	92	159	199	225	231	0.617	0.4	260
D3P13	93	62	114	143	179	208	0.795	0.2	240
D3P14	106	72	125	148	232	234	0.641	0.3	240
D3P15	118	82	133	164	239	243	0.613	0.4	240

TABLA N° 7: CONCRETO ADICIONADO CON MCS base Caliza AL 5% RM#325

	Curado Térmico kg/cm²	R1 día kg/cm²	R3 días kg/cm²	R7 días kg/cm²	R28 días kg/cm²	R45 días kg/cm²	(w/(c+ka))	k	Cemento (kg.)
D3CA1	180	128	216	262	286	320	0.538	0.2	310
D3CA2	163	127	166	198	274	319	0.609	0.3	310
D3CA3	-	121	181	218	293	294	0.614	0.2	300
D3CA4	157	117	165	217	322	332	0.595	0.3	300
D3CA5	133	121	204	182	199	-	0.819	0.2	260
D3CA6	149	135	198	231	235	-	0.688	0.3	260
D3CA7	111	87	157	143	167	-	0.866	0.2	240
D3CA8	124	105	171	155	185	-	0.734	0.3	240

Tabla N° 8: Procesamiento estadístico de las resistencias mecánicas

	1 día	3 días	7 días	28 días	45 días
Mezcla referencia D3 (kg/cm²)	12.0	17.4	23.0	27.6	32.5
Para el MCS natural 5% R#325 (k= 0.4)					
Promedio (kg/cm²)	9.50	15.38	21.12	24.72	27.90
Desv. Stand.	0.89	1.73	2.06	2.82	4.67
Coef. variac. (%)	9.36	11.27	9.75	11.40	16.76
Para el MCS natural 18% R#325 (k = 0.4)					
Promedio (kg/cm²)	9.12	15.14	19.50	24.82	27.26
Desv. Stand.	0.59	1.45	1.86	1.80	3.30
Coef. variac. (%)	6.51	9.56	9.55	7.26	12.12
MCS base Caliza al 5% R325 (k = 0.3)					
Promedio (kg/cm²)	12.1	18.3	20.4	25.5	32.6
Desv. Stand.	1.3	3.2	3.5	5.8	0.9
Coef. variac. (%)	10.7	17.4	16.9	22.6	2.8