

ARTÍCULO INVITADO**CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE. EL PAPEL DE LOS MATERIALES****F. Puertas, M.M. Alonso, M. Palacios**

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC)- Madrid-Spain
Autora de correspondencia. Prof. Francisca Puertas. puertasf@ietcc.csic.es

Resumen: En este artículo se aborda, de manera resumida, la necesidad de alcanzar una construcción sostenible y el papel que juegan los materiales (cemento y hormigón) para lógralo. Se describen algunas de las investigaciones que se están realizando para la obtención de cementos más eco-eficientes (cementos con bajos contenidos en clínker y cementos alcalinos). Las materias primas de gran parte de estos cementos y hormigones eco-eficientes son residuos o subproductos industriales. Se resalta la necesidad de tener controles químicos, físicos, mineralógicos y radiológicos de estos residuos antes y después de su utilización en la preparación de los materiales de construcción. Se describen brevemente los aspectos (prestacionales y medioambientales) positivos de estos cementos y las líneas de investigación abiertas en torno a la mejora de sus propiedades y comportamiento.

Con esa misma finalidad de alcanzar el “Hormigón Verde” se presentan resultados de la reutilización de residuos de construcción y demolición en la producción de hormigón. Se hace también referencia a otros tipos de hormigones de altas prestaciones (resistentes y durables) y propiedades y características especiales (auto-sellantes, auto-limpiables, impresión 3D, etc.).

Palabras Clave: Construcción sostenible, Sostenibilidad, Cemento, Hormigón, áridos, adiciones minerales, comportamiento, durabilidad, residuos y subproductos industriales.

1. INTRODUCCIÓN.

Se entiende por “Construcción Sostenible” a ese modo de construcción basado en el respeto al entorno y al medio ambiente, que implica el uso eficiente de la energía, el agua, los recursos y de los materiales no perjudiciales para el medio ambiente. En definitiva, es una construcción más saludable y con reducción de impactos ambientales [1]. Este concepto se imbrica con el de “Sostenibilidad”, que, de una manera sencilla, se puede definir como aquellas actuaciones que permiten satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las del futuro y sus generaciones.

Las previsiones de la ONU son que en el año 2060 la población mundial se habrá multiplicado por 4 con respecto a la que había en 1950 (ver Figura 1). Esto supone que se necesitarán muchas y mejores infraestructuras, viviendas y demás construcciones para satisfacer las necesidades de esa población, lo que a su vez significa que se precisarán volúmenes elevados de materiales de construcción.

Dependiendo de donde estén situados, los edificios contruidos consumen entre un 20 y un 50% de recursos naturales (piedra, madera, agua, combustibles fósiles, etc.). Durante su construcción, su uso y su deconstrucción (cuando ya no son necesarios o están envejecidos y/o fuera de uso) son también causa de emisiones elevadas de gases de efecto invernadero, consumos de energía, agua y otros materiales, y generadores de nuevos residuos. Esto significa que hay

que ir hacia procesos constructivos más racionales que impliquen menos consumos de energía, agua y recursos naturales y también se busquen vías de reciclar, recuperar y reusar los residuos que se generen. Estas actuaciones están directamente recogidas en los Objetivos Sostenibles (OS) de la ONU, fundamentalmente con los OS 9 y 11, de la AGENDA 2030 [2] y en las políticas establecidas por la UE relacionadas con la Economía Circular [3], en la que se busca que los residuos se conviertan en recursos aprovechables e utilizables. En este proceso de cambio en el paradigma del proceso constructivo, los materiales de construcción juegan un papel fundamental, como pasaremos a describir a continuación.



Figura 1. Evolución prevista de la población mundial (1950-2100). Fuente: www.epdata.es.

2. EL HORMIGÓN, EL PRINCIPAL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.

Hay que tener en cuenta que el hormigón de cemento Portland es el principal material de construcción y el segundo material, después del agua, más utilizado por el humano. Su producción anual en el mundo supera los 3 billones de toneladas. Ha sido y es el gran material que ha permitido mejorar la calidad de vida de las personas y ha contribuido al desarrollo de las sociedades a través de las diferentes obras de ingeniería e infraestructuras que con este material se han construido (viviendas, carreteras, puentes, presas, etc.). No se entendería un mundo sin hormigón.

El hormigón de cemento Portland tiene muchas ventajas, desde la amplia disponibilidad de las materias primas que se utilizan en su preparación hasta la versatilidad que permite en el diseño de obras y edificaciones, así como a las elevadas prestaciones mecánicas y durables que exhibe en el tiempo. Sin embargo, y debido fundamentalmente a su elevada producción y consumo es también responsable de una elevada utilización de materias primas naturales, de energía, agua, generación de residuos cuando se acaba su vida útil y de emisiones de gases de efecto invernadero. Alrededor del 8,6% de las emisiones de CO₂ antropogénico en el mundo se asocian a su producción. Monteiro et al. [4] estiman que entre 2017 y 2050 las emisiones de CO₂ debidas a la producción de hormigón se incrementarán entre 85 y 105 Gt, lo que equivale a la cantidad total de gases causantes de efecto invernadero emitida (por todos los sectores industriales a nivel mundial) en 2009 y 2010.

Es decir, el hormigón de cemento Portland es un material de construcción con muchas cualidades técnicas (que se siguen estudiando y mejorando), pero que debido a su elevada producción tiene efectos medioambientales negativos. Entre otros factores gran parte de estos efectos negativos se asocian a la fabricación de su principal componente, que es el cemento Portland [5-6]. El objetivo básico es reducir el impacto medioambiental de la producción del hormigón sin comprometer las necesidades de la sociedad en términos de edificios e infraestructuras. Se habla de conseguir un “Hormigón Verde”, y esto solo se logrará si, a nivel internacional y nacional, se pueden desarrollar regulaciones y leyes más estrictas en el ámbito medioambiental, potenciar la concienciación por parte de usuarios, constructores y arquitectos de la necesidad de hacer construcciones y edificios más sostenibles y a través de gravar los impuestos sobre la cuota de carbono [7].

Aparte de estas medidas legales y sociales, también desde el punto de vista de la ciencia y la tecnología es posible conseguir una construcción más sostenible y alcanzar ese deseado “Hormigón Verde”. Entre las actuaciones más relevantes que se están llevando a cabo en este sentido, destacan:

- Desarrollar y utilizar cementos más eco-eficientes

- Utilizar residuos (ej. residuos de construcción o demolición) en la fabricación del hormigón
- Desarrollar hormigones más resistentes y durables
- Desarrollar hormigones con propiedades y características especiales (autocompactantes, autorrellenables, auto-limpiables, etc.)
- Nuevas tecnologías de producción (ej. como la impresión 3D)
- Desarrollar métodos de captura y almacenamiento de CO₂ en hormigones
- Mejorar los diseños constructivos y los códigos de la edificación

Como se puede apreciar, el papel de los materiales es fundamental para alcanzar una construcción sostenible. A continuación, se pasan a describir, de modo resumido, las principales líneas de investigación que se están realizando, fundamentalmente en el ámbito de los cementos más eco-eficientes y en la reutilización de residuos de construcción y demolición en la producción de hormigón, con esa finalidad de alcanzar el “Hormigón Verde”. Se hará también referencia a otros tipos de hormigones de altas prestaciones y propiedades y características especiales.

3. DESARROLLO Y UTILIZACIÓN DE CEMENTOS MÁS ECO-EFICIENTES.

Dentro de esta línea de investigación se pueden considerar dos grandes directrices en las que está implicada la comunidad científica [8]:

- Cementos con bajos contenidos en clínker de cemento Portland y mayores contenidos de adiciones minerales (*Supplementary Cementitious Materials -SCM*)
- Cementos alternativos al cemento Portland

La fabricación de clínker de cemento Portland requiere de un importante consumo energético asociado a las altas temperaturas (>1500 °C) del horno y a la molienda de materias primas y producto final; así como efectos negativos medioambientales asociados a la extracción y consumo de recursos naturales (calizas, arcillas, arena, etc., como materias primas del crudo de cemento) y a la emisión de gases a la atmósfera (CO₂, NO_x, etc.) durante su fabricación. Todo lo que suponga sustituir clínker por otro material menos costoso energéticamente y medioambientalmente tendrá un efecto positivo en la sostenibilidad. En gran parte estos materiales alternativos (conocidos como adiciones minerales o *Supplementary Cementitious Materials (SCM)*) suelen ser residuos o subproductos industriales (cenizas volantes, humo de sílice, escorias vítreas de horno alto, cenizas de cáscara de arroz y otras cenizas de biomasa, etc.; además de otros materiales de origen natural como arcillas calcinadas, esquistos, etc.). La sustitución del clínker por estas SCMs se lleva produciendo desde hace años y se recoge en las normativas europeas (EN-197-1: 2011). Hasta la fecha, el contenido de SCMs en la

preparación de cementos está limitado (ver Figuras 2), por razones de tipo técnico, tales como:

- Disminución de las resistencias mecánicas iniciales según se incrementa el contenido de SCMs en el cemento
- Limitada disponibilidad de los SCMs más adecuados
- Incertidumbre en torno al comportamiento durable a largo tiempo de los cementos con altos contenidos en SCMs

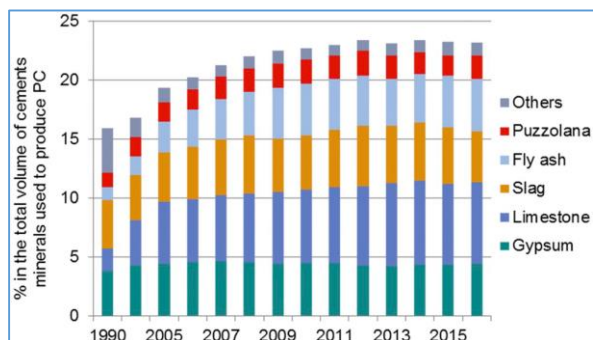


Figura 2. Porcentaje del volumen total de adiciones empleadas en la preparación de cementos. Fuente: GNR World data.

Las líneas de investigación en este campo están orientadas a aumentar las resistencias mecánicas iniciales en cementos con altos contenidos en SCM; incrementando la reactividad de estos materiales. Esta reactividad depende de la superficie específica y de la composición química y estructural de la adición, lo que influye en su velocidad de disolución. A edades tempranas de hidratación, la disolución de SMCs es una etapa controlante del proceso y tiene una contribución vital en la composición de la fase acuosa y en la evolución de la hidratación con el tiempo. Concentraciones elevadas de iones de Al y Ca, en dicha fase acuosa, parecen tener un efecto inhibitor en la disolución de especies activas del clinker y de las propias adiciones [9]. Se está estudiando el papel de aditivos orgánicos (superplastificantes y/o aceleradores) como modificadores de las microestructuras de las pastas de cemento y su influencia en el desarrollo inicial de resistencias mecánicas a tiempos cortos con contenidos elevados de adición mineral [10-12].

Unos cementos que están siendo ahora muy estudiados y con los que ya se han preparado hormigones en India y Cuba, son los denominados LC3 (*Limestone, Calcined Clay Cement*), que tienen tan solo un 50% de clinker (ver composición en la Figura 3) y arcillas calcinadas y calizas, que son materiales de origen natural de elevada disponibilidad en el mundo.

Las investigaciones en este tipo de materiales residen en mejorar las propiedades reológicas de los mismos e incrementar las resistencias iniciales, nuevamente a través del empleo de diferentes aditivos orgánicos e inorgánicos.

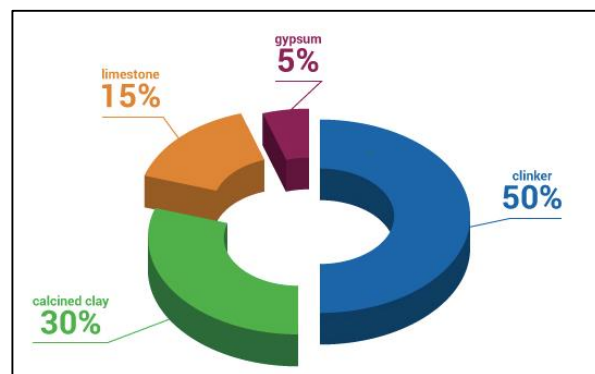


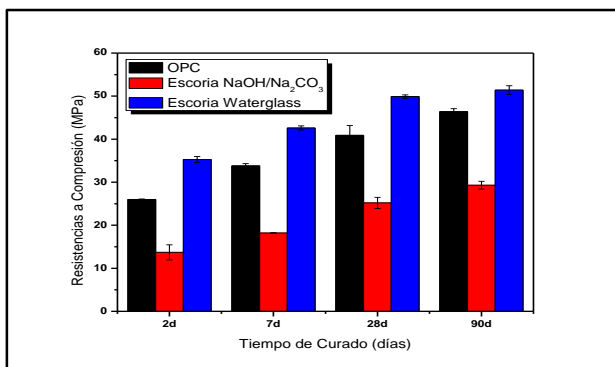
Figure 3. Composición de los cementos LC3. Fuente: <https://www.lc3.ch/the-material/>

Dentro de la segunda directriz en esta línea de investigación se encuentra el desarrollo de cementos alternativos al cemento Portland, y dentro de la amplia gama que existen de estos cementos (cementos de MgO, cementos belíticos, cementos de sulfoaluminato de calcio, cementos de fosfatos, etc.) están los denominados cementos alcalinos, cementos activados alcalinamente o geopolímeros, en los que los investigadores del Instituto Eduardo Torroja somos pioneros mundiales.

Estos cementos alcalinos o geopolímeros son aquellos conglomerantes que se obtienen por la interacción química de aluminosilicatos (denominados precursores), con altos o bajos contenidos en Ca y de origen natural (ej. arcillas calcinadas) o subproductos industriales (ej. escorias vítreas de horno alto, cenizas volantes de central térmica o mezclas de ellos u otros residuos) con disoluciones fuertemente alcalinas (denominadas activador alcalino) (ej. disoluciones de NaOH, KOH, silicatos alcalinos, etc.) de $\text{pH} > 13$ [13]. Los morteros y hormigones que se prepararan con estos cementos tienen una aplicación efectiva en prefabricados, como traviesas de ferrocarril, bloques para tabiquería, etc. y en pavimentos y pasarelas. Hay construcciones realizadas con estos hormigones alternativos en Australia, China y Rusia. Estudios recientes han demostrado cuantitativamente que estos hormigones tienen un efecto positivo en la reducción del calentamiento global del planeta [14-15].

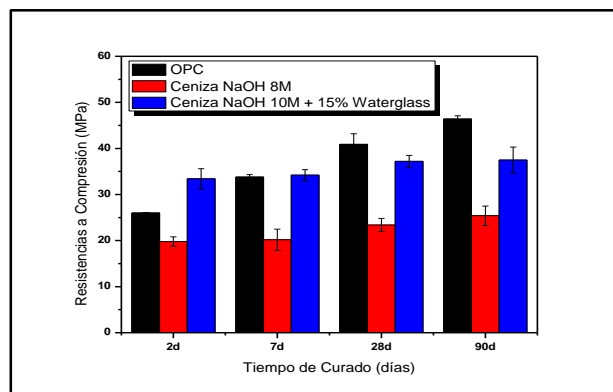
Se ha estudiado exhaustivamente la influencia del precursor y del activador alcalino (líquido y sólido) sobre los desarrollos nano y microestructurales de sus pastas y su influencia en el comportamiento en estado fresco y endurecido de sus hormigones [16]. En términos generales, estos cementos y hormigones alcalinos se caracterizan por desarrollar elevadas resistencias iniciales (>30 MPa a las 24h) [17-18] (ver Figura 4), y un mejor comportamiento frente a medios ácidos, a altas temperaturas y a ciclos hielo-deshielo que los correspondientes hormigones de cemento Portland [17-21].

a) Alkali-Activated Slag (AAS) Concrete



Mixes	Binder content (kg/m ³)	L/S	L/B
OPC	400	0.5	0.5
AASC NaOH/Na ₂ CO ₃	400	0.39	0.5
AASC Waterglass	400	0.37	0.5

b) Alkali-Activated FlyAsh (AAFA) Concrete



Mixes	Binder content (kg/m ³)	L/S	L/B
OPC	400	0.5	0.5
AAFAC NaOH 8M	465	0.32	0.5
AAFAC NaOH 10M + 15% WG	465	0.28	0.5

Figura 4. Resistencias a compresión de a) hormigones de escoria activada alcalinamente y b) de cenizas volantes activadas alcalinamente. L/S= Liquid/Solid and L/B=Liquid/Binder.

Hay varios problemas asociados a la final utilización de estos cementos y hormigones alcalinos y que son objeto de investigación actual por la comunidad científica. Entre ellos destacan la disponibilidad de nuevos precursores distintos de los basados en cenizas volantes y/o escorias vítreas de horno alto (que, debido al cierre de centrales térmicas y altos hornos, se espera que disminuyan considerablemente) y de activadores efectivos y menos costosos energéticamente diferentes de los basados en silicatos alcalinos (sódicos y potásicos, denominados waterglass-Wg), en cuya fabricación se emiten gases de efecto invernadero y elevados consumos energéticos [22]. En este sentido se está estudiando la utilización de residuos vítreos [23-24] y cenizas de biomasa de olivo como potenciales activadores alcalinos [25], con resultados muy prometedores en esta búsqueda alternativa efectiva.

Otros problemas están asociados a la durabilidad y la estabilidad de las estructuras producidas con estos hormigones a largo tiempo. Al ser materiales de construcción relativamente recientes en comparación a aquellos derivados del cemento Portland, su comportamiento a largo tiempo es bastante desconocido, aunque hay evidencias contrastadas de mejoras en los aspectos antes mencionados. También, para mejorar la seguridad de los operarios, se están dirigiendo las investigaciones a sistemas “one-part geopolimer mixes”, que consisten en mezclas sólidas (precursor + activador alcalino) que se amasarían con agua, evitando el contacto directo del operario con disoluciones altamente alcalinas y corrosivas. Otra vía de mejorar los balances energéticos y/o de comportamiento y

prestaciones es el desarrollo de los denominados “cementos y hormigones híbridos” [21], que son aquellos que pueden contener hasta un 30% de cemento Portland y el resto de geopolímero o cemento activado; lo que enlazaría con la anterior vía de investigación de cementos con bajos contenidos clínker. Nuevamente, el desarrollo y la utilización de aditivos orgánicos e inorgánico estables en los sistemas fuertemente básicos de estos materiales activados es una línea de investigación activa que podría conducir a una mejora en las propiedades finales y durabilidad de estos hormigones. Finalmente, la normalización de estos cementos a nivel europeo aseguraría un uso controlado y eficaz de los mismos, y sin lugar a dudas contribuirían a reducir las emisiones de CO₂ asociadas a la fabricación de cementos y hormigones.

Gran parte de los residuos o subproductos industriales empleados en la preparación de los cementos más ecoeficientes son residuos NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) o residuos con radioactividad natural. Esto obliga hacer estudios específicos de seguridad ambiental de estos residuos y de los cementos y hormigones que con ellos se puedan preparar. La Directiva 2013/59/EURATOM propone una herramienta de cribado selectivo de tipo conservado para el control del daño radioactivo debido a los materiales de construcción usando el “Índice de Concentración de Actividad (ACI)”, que se obtiene de la siguiente expresión:

$$ACI = \frac{A_{226Ra}}{300} + \frac{A_{232Th}}{200} + \frac{A_{40K}}{3000} \leq 1$$

donde $A_{226\text{Ra}}$, $A_{232\text{Th}}$ y $A_{40\text{K}}$ son las concentraciones de actividad en Bq/kg para el Radio (equivalente al Uranio en equilibrio secular), Torio y Potasio, respectivamente. De acuerdo con la Directiva Europea 2013/59/2013 (Anexo VIII) el índice de concentración de actividad se aplicará a materiales de construcción, mientras en el caso de materiales constituyentes se aplicará un adecuado factor de mezcla.

En un Proyecto estatal (BIA2016-77252-P), que se está realizando en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, se está abordando el estudio radiológico de los residuos y subproductos industriales utilizados habitualmente en la preparación de cementos eco-eficientes y en los propios cementos desarrollados. Los resultados obtenidos [26-29] (ver Tabla 1) demuestran que las cenizas volantes tipo F (bajas en CaO) son los subproductos industriales con un ACI más elevado (ACI: 1.2-0.8). Aún no siendo un cemento eco-eficiente si es reseñable que los cementos de aluminato de calcio tienen un ACI (alrededor de 0.9) superior al del cemento Portland (alrededor de 0.2). Finalmente, los cementos alcalinos o geopolímeros tienen, en términos generales, valores de ACI más elevados que los de los cementos Portland, siendo, de todos modos, los valores obtenidos de ACI inferiores a 1; exceptuando cuando el residuo es un lodo rojo (*red mud*) y forma parte del precursor. En este caso, los valores obtenidos de ACI son superiores a 1 [28]. Para la validación final de estos cementos y hormigones eco-eficientes, con altos contenidos de residuos y subproductos industriales, son necesarios también estudios de lixiviación de elementos pesados y/o radiológicamente peligrosos procedentes de dichos SCMs.

La idea es conseguir materiales de construcción más eco-eficientes y alcanzar ese ansiado “Hormigón Verde”, pero esto no debe hacer que se pierda de vista que los residuos y subproductos industriales, que se pueden utilizar en la preparación de esos cementos y hormigones, deben de cumplir todos los requisitos y controles químicos, mineralógicos y radiológicos, lo que se permitirá asegurar su uso sin problemas adicionales mediambientales y con seguridad para la salud de la población. Estos controles, obviamente, deben extenderse también a los materiales de construcción finales con ellos fabricados.

4. ARIDOS RECICLADOS EN LA PREPARACIÓN DE “HORMIGÓN VERDE”.

Los residuos de construcción y demolición (*Construction and Demolition Waste, CDW*) son una mezcla muy diversa de materiales procedentes de la demolición de obras construidas (hormigón, ladrillo, yeso, vidrio, cerámica, plástico, suelos, etc.); y que, en términos generales, son residuos inertes en más de un 98% [30]. En la UE se generan anualmente más de 800 millones de toneladas de CDW y su utilización es muy variable dependiendo del país. Por ejemplo, en los Países Bajos que reutilizan todos los CDW que se generan, mientras que en Grecia lo envían todo a

vertederos. En España se tiende a reutilizar alrededor del 70% del residuo CDW generado.

Estos áridos reciclados basados en CDW se caracterizan por tener una elevada heterogeneidad química y mineralógica, además de una mayor porosidad y absorción de agua que los áridos naturales (silíceos y/o calcáreos). Estas diferencias implican que su uso esté limitado. De acuerdo con la Instrucción Española del Hormigón Estructural (EHE-08), en su Anejo 15, se limita el empleo de áridos reciclados a sustituir solo hasta un 20% del árido grueso (tamaño mínimo de 4 mm). Con esta limitación las propiedades finales del hormigón reciclado no se ven prácticamente afectadas.

Los áridos reciclados de hormigón suelen tener adherido mortero de cemento, lo que les induce una elevada porosidad y, por tanto, una elevada absorción de agua durante el amasado. Su empleo en la preparación de hormigones, en contenidos superiores al 20% antes indicado, va a requerir de unas relaciones agua/cemento elevadas, lo que se traducen en una disminución de las resistencias mecánicas, una disminución del módulo elástico, una mayor deformación y fluencia, y en definitiva una mayor permeabilidad y durabilidad del hormigón final [31].

El empleo de este residuo CDW como árido índice directamente en la “Sostenibilidad” y en alcanzar un “Hormigón Verde”, como demuestran diferentes estudios [32-34], pero deben de tenerse en cuenta todas las consideraciones técnicas relacionadas con su uso para que las propiedades finales del hormigón no se vean negativamente afectadas.

5. HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES, PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS ESPECIALES.

De acuerdo con la *European Construction Industry Federation* en Europa, en 2016, el gasto en rehabilitación y mantenimiento de edificios y estructuras de hormigón ascendió a 358 Billones de euros. Si se mejora la durabilidad del hormigón y se consigue extender la vida útil de las estructuras, desde los 50 años, ahora estimados, a más de 100, se lograría una mayor sostenibilidad y un mejor y más largo mantenimiento de las estructuras, lo que llevaría implícito una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y una menor generación de residuos. Este alargamiento de la vida útil de las estructuras se puede conseguir mejorando los procesos de diseños estructurales y de las mezclas del propio hormigón, utilizando aditivos que permitan reducir las relaciones agua/cemento y preparar hormigones menos porosos y más durables.

De acuerdo con Mindess [7] el mayor competidor del hormigón no es el acero ni la madera, es el hormigón mal preparado. Diseños y dosificaciones precisas del hormigón, con distribuciones granulométricas del árido muy controladas que permitan obtener unos densos empaquetamientos, el uso adecuado de aditivos (superplastificantes y/ dispersantes), junto con curados

Tabla 1. Concentración de actividad de los radionucleidos naturales en SCMs, cementos y geopolímeros (en Bq·kg⁻¹) e ACI (Índice de concentración de actividad) en Bq·kg⁻¹.

SCMs	Serie ²³⁸ U (²²⁶ Ra)		Serie ²³² Th			⁴⁰ K	ACI
	²³⁴ Th	²¹⁴ Pb	²²⁸ Ac	²¹² Pb	²⁰⁸ Tl		
FA	130 ± 7	127.4 ± 1	130.3 ± 1	133.8 ± 1	41.33 ± 0.6	316.4 ± 7	1.1 ± 0.01
BFS	156.4 ± 7	147.2 ± 1	45.7 ± 0.9	42.9 ± 1	14.71 ± 0.3	76.3 ± 3	0.8 ± 0.01
SF	<3.0	1.4 ± 0.2	< 1.5	0.8 ± 0.2	<0.5	95.8 ± 3	<0.1
L	18 ± 2	16.98 ± 0.5	<1.4	<0.5	<0.4	<2.5	<0.1
RM	113 ± 2	100.5 ± 4	321.3 ± 8	287 ± 10	92.1 ± 3	55.1 ± 9	1.8 ± 0.05
CEMENTOS							
Cemento Anhidro (OPC)	<3.7	15.8 ± 1	18.6 ± 1.6	17.06 ± 0.9	5.47 ± 0.5	262 ± 13	0.2 ± 0.01
Pasta hidratada OPC+50% FA	66.7 ± 7	49.1 ± 1.3	55.1 ± 1.7	62.2 ± 1.1	18.5 ± 0.6	211.6 ± 8	0.51 ± 0.01
Pasta hidratada OPC+50% BFS	71.2 ± 6	41.5 ± 1.1	23.0 ± 1.1	22.8 ± 0.7	7.5 ± 0.4	114.1 ± 5	0.29 ± 0.01
GEOPOLÍMEROS							
WG-AAS	91.5 ± 6	48.7 ± 1	22.9 ± 1	23.3 ± 0.69	7.7 ± 0.39	77.0 ± 5	0.30 ± 0.01
N15Wg-AAFA	56.4 ± 6	36.44 ± 1	67.8 ± 2	75.1 ± 1.8	21.57 ± 0.59	578 ± 15	0.65 ± 0.01
WG-BFS/RM/OPC	76 ± 11	75.9 ± 3	164.9 ± 5	148.9 ± 5	47.6 ± 1.6	74.1 ± 8	1.0 ± 0.03

FA. Cenizas volantes; BFS: escorias vítreas de horno alto; SF: Humo de sílice; L: caliza; RM: Lodo rojo; OPC: CEM I; WOPC: Cemento Blanco tipo I; WG-AAS: Escoria activada alcalinamente con silicato sódico hidratado (WG); N15Wg-AAFA: Ceniza volante activada con NaOH y WG15%: WG-BFS/RM/OPC: 30%wtBFS + 60%wt RM + 10%wt OPC activado con WG.

correctos, permiten fabricar hormigones, con contenidos reducidos en cemento y agua, sin disminuir sus prestaciones mecánicas y durables. Se dispone de la tecnología adecuada para fabricar estos hormigones más sostenibles, resistentes y durables [35].

Entre los hormigones de características especiales, destacan, entre otros: hormigón autocompactante, hormigón auto-limpiante, auto-sellante, hormigón con características funcionales, hormigón traslúcido; etc. La presencia de aditivos orgánicos y/o inorgánicos, así como fibras o nanopartículas, les confieren a estos hormigones esas propiedades y/o características especiales. En los hormigones autocompactantes se usan aditivos superplastificantes y distribuciones granulométricas definidas que permiten mejorar las propiedades reológicas del mismo, controlando y alargando la trabajabilidad sin problemas de segregación, ni mermas en sus prestaciones mecánicas y durables. [36]. Las propiedades reológicas y reactividad inicial de la hidratación del cemento son también muy importantes en lo que se denomina “*Digital Concrete*” o impresión 3D. Las investigaciones en este campo son muy recientes y hay muchas incógnitas por resolver

entorno a su preparación y utilización final. En cualquier caso, la impresión 3D de hormigón tiene un futuro claro en la industrialización y prefabricación, y puede ser un revulsivo en la tecnología del hormigón, con importantes beneficios relacionados con la sostenibilidad y el incremento de la competitividad en el sector de la construcción [37].

También incorporando al hormigón nanopartículas de TiO₂, que actúa como un potente autocatalítico, es posible inducir a este material de construcción propiedades descontaminantes y autolimpiantes [38]. Los hormigones auto-sellantes tienen la capacidad de rellenar y cerrar las fisuras que aparecen a lo largo de su vida de servicio. Esta capacidad se consigue empleando polímeros súper absorbentes (SAP - *Super Absorbent Polymers*), también denominados hidrogeles que aportan agua de forma continuada en la vida del hormigón o también incorporando unas resinas epoxy, cianoacrilatos (CA), metacrilato de metilo (MMA) o soluciones bacterianas. Cuando el hormigón se fisura, las cápsulas se rompen liberando el agente, que rellena y sella la fisura formada, por diferentes procedimientos [39]. La incorporación de nanofibras y nanotubos de

carbono puede transformar al hormigón en un material sensible a la deformación y permitir su uso para radiaciones electromagnéticas [40].

6. CONSIDERACIONES FINALES.

La construcción es básica para el desarrollo y bienestar de las sociedades, y al igual que otros sectores industriales, es consciente que debe redefinirse en busca de mejorar sus procesos constructivos y hacerlos más eficientes y sostenibles. En este empeño y necesidad deberían de estar implicados las industrias, los constructores, los usuarios, y tener siempre en mente la necesidad de la ciencia y la tecnología para lograr esas metas.

El hormigón es un material versátil y con grandes vías de mejora en prestaciones y sostenibilidad. Requiere la implicación multidisciplinar de ingenieros, químicos y físicos de materiales, arquitectos, etc. para lograr esos objetivos marcados, y en ese empeño se debe seguir trabajando.

Agradecimientos: Las autoras agradecen a la Agencia Estatal de Investigación y al Ministerio de Ciencia e Innovación la subvención del Proyecto BIA2016-77252-P y y RTI2018-099326-A-I00. Así mismo, las autoras agradecen a la Consejería de Educación e Investigación de la Comunidad de Madrid por la concesión de las ayudas de atracción de talento investigador 2016-T1/AMB-1434.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Ramírez. Construcción Sostenible. Física y Sociedad, nº 13, 30-33 (2002).
- [2] United Nations Climate Change Conference. Paris, 2015. <https://www.agenda2030.gob.es/>.
- [3] Economía Circular (UE, 2016). https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_es.
- [4] P.J.M. Monteiro, S.A. Miller, A. Horvath. Towards Sustainable Concrete. Nature Materials, Vol. 16, 698-699 (2017).
- [5] M. Schneider. The Cement Industry on the Way to a Low Carbon Future. Cement and Concrete Research, Vol 124, 105792 (2019).
- [6] Cembureau, Ecofys Report Shows Potential for Further Uptake of Alternative Fuels in the Cement Industry, Available at <https://cembureau.eu/news-views/blog/ecofys-report-shows-potential-for-further-uptake-of-alternative-fuels-in-the-cement-industry/> (2017).
- [7] S. Mindess. Sustainability of concrete. Chapter 1. Sustainability of Concrete. Ed. Pierre-Claude Aïtcin, Sidney Mindess, Modern Concrete Technology 17 (2019).
- [8] K. L. Scrivener, V. M. John, E. M. Gartner. Eco-efficient cements: Potential, economically viable solutions for a low-CO₂, cementbased materials industry. United Nations & Environment Programm (2016).
- [9] J. Skibsted, R. Snellings. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. Cement and Concrete Research, 124, 105799 (2019).
- [10] V. Kanchanason, J. Plank, Effectiveness of a calcium silicate hydrate – Polycarboxylate ether (C-S-H-PCE) nanocomposite on early strength development of fly ash cement, Construction and Building Materials. 169, 20–27 (2018).
- [11] K. Riding, et al., Early age strength enhancement of blended cement systems by CaCl₂ and diethanol-isopropanolamine, Cement and Concrete Research. 40, 935–946 (2010).
- [12] J. Cheung, et al., Impact of alkanolamines on hydration of Portland and Fly Ash cements, in: 14th International Congress on the Chemistry of Cement, Beijing, 2015.
- [13] F. Puertas, S. Martínez-Ramírez, S. Alonso, T. Vázquez. Alkali-activated Fly ash/Slag cement. Strength behavior and Hydration products. Cement and Concrete Research, 30, 1625- 1632, (2000).
- [14] G. Habert, C. Ouellet-Plamondon. Recent update on the environmental impact of geopolymers. RILEM Technical Letters 1: 17 – 23 (2016).
- [15] D. Feng, J.L. Provis, J.S.J. van Deventer. Thermal Activation of albite for the synthesis of on-part-geopolymer. Journal of the American Ceramic Society, 95(2), 565-572 (2012).
- [16] F. Puertas, B. Gonzalez-Fonteboa, I. Gonzalez-Taboada, M.M. Alonso, M. Torres-Carrasco, G. Rojo, F. Martínez-Abella. Alkali-activated slag concrete: Fresh and hardened behaviour. Cement and Concrete Composites, 85, 22-31 (2018).
- [17] M. Torres-Carrasco, M.M. Alonso, P. Guarner, A. Zamora, F. Puertas. Hormigones de escorias activadas alcalinamente. Comportamiento mecánico y durable. Hormigón y Acero, 69 (285), 163-168 (2018).
- [18] J.L. Provis, S.A. Bernal, D. Bondar, A. Buchwald, A. Castel, S. Chithiraputhiran, M. Cyr, K. Dombrowski-Daube, A. Dubey, V. Ducman, A. Dunster, G.J.G. Gluth, S. Nanukuttan, K. Peterson, F. Puertas, A. van Riessen, M. Torres-Carrasco, G. Ye, Y. Zuo. RILEM TC 247-DTA Round Robin Test: Mix design and reproducibility of compressive strength of alkali-activated concretes. Materials and Structures 52:99 (2019).
- [19] M.M. Alonso, A. Rodríguez, F. Puertas. Use of construction and demolition waste aggregates in alkali-activated mortars. Mechanical strength and performance. Materiales de Construcción. Vol. 68, Issue 331, July–September, e164 (2018).
- [20] M. Torres-Carrasco A. Tagnit-Hamou M. T. Tognonvi, F. Puertas. Mechanical and durability behaviour of alkal-activated slag concretes prepared using waste glass as alternative activator. ACI Materials Journal, Nº 112-M75, 791-800 (2015).
- [21] A. Palomo, P. Monteiro, P. Martauz, V. Bilek, A. Fernandez-Jimenez. Hybrid binders: A journey from the

past to a sustainable future (opus caementicium futurum). *Cement and Concrete Research*, 124, 105829 (2019).

[22] L.K. Turner, F.G. Collins. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125-130 (2013).

[23] F. Puertas, M. Torres-Carrasco. Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag cements. Mechanical strength and paste characterisation. *Cement and Concrete Research*, 57, 95-104 (2014).

[24] M. Torres-Carrasco, F. Puertas. Glass waste in geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterization. *Journal of Cleaner Production*, 90, 397-408 (2015).

[25] M.M. Alonso, C. Gascó, M. Martín Morales, J.A. Suárez-Navarro, M. Zamorano, F. Puertas. Olive Biomass ash as an alternative activator in geopolymer formation. Strength, radiological and leaching behaviour. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103384 (2019).

[26] J. Labrincha, F. Puertas (as coordinators), et al. From NORM by-products to building materials. Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction. Integrating Radiation Protection in Reuse (COST Action Tu1301 NORM4BUILDING). Ed. W. Schroyers. Ed. Woodhead Publishing (ELSEVIER) (2017).

[27] F. Puertas, M.M. Alonso, M. Torres-Carrasco, P. Rivilla, C. Gascó, J.L. Yagüe, J.A. Suárez, N. Navarro. Radiological determination in anhydrous and hydrated cements. *Construction and Building Materials*, 101, 1105-112 (2015).

[28] M.M. Alonso, A. Pasko, C. Gascó, J.A. Suárez, O. Kovalchuk, P. Krivenko, F. Puertas. Radioactivity and Pb and Ni immobilization in SCM-bearing alkali-activated matrices. *Construction and Building Materials*, 159, 20, 745-754 (2018).

[29] J.A. Suárez-Navarro, A.M. Moreno-Reyes, C. Gascó, M.M. Alonso, F. Puertas. Gamma spectrometry and LabSOCS-simulated efficiency in the radiological characterisation of quadrangular and cubic specimens of hardened portland cement paste. *Radiation Physics and Chemistry*, 171, 108709 (2020).

[30] Deloitte (2017) Study on Resource Efficient Use of Mixed Wastes, Improving of construction and demolition waste – Final Report. Prepared for the 631 European Commission, DG ENV [31] DWC.

[31] C. Pellegrino, F. Faleschini, C. Meyer. Recycled Materials in Concrete, Chapter 2. Sustainability of Concrete. Ed. Pierre-Claude Aïtcin, Sidney Mindess, *Modern Concrete Technology* 17 (2019).

[32] L.W. Zhang, A.O. Sojobi, V.K.R. Kodur, K.M. Liew. Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment. *Journal Cleaner Production*, 236, 117600 (2019).

[33] A. Coelho, J. de Brito. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant

in Portugal - part I: location, materials, technology and economic analysis. *Journal of Cleaned Production*, 39, 338-352 (2013).

[34] A. Coelho, J. de Brito. Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal e part II: economic sensitivity analysis. *Journal of Cleaned Production*, 39, 329-337 (2013).

[35] E.D. Hooton. Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 105827 (2019).

[36] RILEM State-of-The-Art. Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. Ed. K. Khayat, G. De Shutter. (2014).

[37] T. Wangler, N. Roussel, F. P. Bos, T.A.M. Salet, R.J. Flatt. Digital Concrete: A Review. *Cement and Concrete Research*, 123, 105780 (2019).

[38] RILEM State-of-The-Art. Self-Healing Phenomena in Cement Based Materials. Ed. M. de Rooij, K.V. Tittelboom, Nele de Belie, E. Schlangen (2013).

[39] F. Puertas, J. Payá, M. A. Díaz Bautista, R. Martínez, P. Alaejos. Retos en la Industria del Cemento. Colección ACHE (2017).

[40] O. Galao, F.J. Baeza, E. Zornoza, P. Garcés. Strain and damage sensing properties on multifunctional cement composites with CNF admixture. *Cement and Concrete Composites*, 46 (2014) 90–98.