Durabilidad de hormigones de bajo impacto ambiental: resistencia a la carbonatación

H. Gurdíán¹, P. Garcés^{1*}, E. Zornoza¹, E. García Alcocel²

¹ Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Alicante, España.

² Dpto. de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Alicante, Alicante, España.

RESUMEN

Como estrategia contributiva en la sostenibilidad del hormigón se plantea sustituir los materiales que lo componen por otros de menor huella ecológica. Este trabajo evalúa la resistencia a la carbonatación de hormigones de bajo impacto ambiental con sustituciones de cemento por subproductos industriales (35% cenizas volantes y 15% catalizador de craqueo catalítico) y de áridos gruesos por áridos reciclados (20% y 100%). Los hormigones fueron expuestos a una atmósfera de 100% CO₂. Se tomaron medidas periódicas del avance del frente de carbonatación en probetas de hormigón en masa. Los resultados indican que el frente de carbonatación aumenta con el uso de áridos reciclados y de materiales cementantes alternativos, mientras que la velocidad de carbonatación no varía por la presencia de áridos reciclados o de adiciones en la mezcla.

ABSTRACT

This research presents a contribution to sustainability of concrete industry by replacing some of the concrete constituents by reduced ecological footprint materials. It is studied the carbonation resistance of low environmental impact concretes in which cement has been replaced by industrial

by products (35% of fly ash and 15% of wasted catalytic cracking catalyst), and natural coarse aggregates has also been substituted by recycled aggregates at two levels (20% and 100%). Concretes were subjected to an accelerated carbonation process at 100% CO₂ and 65% of relative humidity. The evolution of the carbonation depth was monitored periodically. Results indicate that the carbonation rate is increased when recycled aggregated and pozzolanic materials are included in the samples at the same time, but no significant influence was observed when each one of them was introduced individually.

RESUMO

Como estratégia contributiva na sustentabilidade do concreto, propõe-se a substituição dos materiais que o compõem por outros de menor pegada ecológica. Este trabalho avalia a resistência à carbonatação de concretos de baixo impacto ambiental com substituições do cimento por subprodutos industriais (35% cinzas volantes e 15% catalisador de craqueamento catalítico) e de agregados graúdos por agregados reciclados (20% e 100%). Os concretos foram expostos a uma atmosfera de 100% CO₂. Medições periódicas do avanço da frente de carbonatação foram feitas em corpos de prova de massa de concreto. Os resultados indicam que a frente de carbonatação aumenta com o uso de agregados reciclados e materiais cimentícios alternativos, enquanto a taxa de carbonatação não varia em função da presença de agregados reciclados ou adições na mistura.

Palabras clave: Árido reciclado; residuo de catalizador del craqueo del petróleo; ceniza volante; carbonatación; hormigón

1. INTRODUCCION

La creciente demanda de materiales para su uso en la construcción ha generado que la industria dirija sus esfuerzos hacia el reciclaje y reutilización de materiales pétreos y otros residuos derivados de la propia industria. En este sentido, el principal enfoque de esta investigación ha sido la sustitución de árido natural por árido reciclado y de cemento Portland por subproductos industriales en distintos hormigones con el fin de demostrar su viabilidad para ser utilizados en la fabricación de hormigones estructurales. Esto permitiría minimizar los impactos de las canteras y vertederos de residuos.

Con este fin, numerosos autores han investigado sobre la influencia de materiales puzolánicos en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón, demostrando que estos materiales pueden ofrecer mejoras importantes en sus propiedades (Hooton, 2015; Paris et al., 2016; Yin and Ahamed, 2018). Uno de los materiales suplementarios que más investigación ha generado en su caracterización como material puzolánico es la ceniza volante. En general, se considera viable la utilización de cenizas volantes por sus altas propiedades puzolánicas, siendo notorias sus ventajas sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón a largo plazo (Bijen, 1996; Herath et al., 2020). Otro material suplementario que ha generado un gran interés es el residuo del catalizador de craqueo de petróleo (FCC). Diferentes trabajos han mostrado que este residuo puede llevar a mejoras en la resistencia a compresión del 20-30% a corto plazo, y su influencia significativamente positiva en la durabilidad del hormigón, lo que lo sitúa como un sustituto eficaz del cemento, a un nivel equivalente a otras puzolanas más utilizadas como el metacaolín o el humo de sílice. (García de Lomas et al. 2006; Garcés et al., 2011; Borrachero et al., 2021).

Por otra parte se han llevado a cabo numerosos trabajos de investigación con el objetivo de caracterizar el efecto de la utilización de áridos de hormigones reciclados en las características resistentes y durabilidad del hormigón (Chaofeng et al., 2021; Hoai and Quoc-Bao, 2020).

En los últimos años se han desarrollado diversas investigaciones donde se han utilizado materiales suplementarios y la sustitución parcial o total de los áridos por áridos reciclados (Corinaldesi and

Moriconi, 2009; Sim and Par, 2011; Kou et al., 2011). Así Corinaldesi y Moriconi experimentaron con hormigones elaborados en su totalidad con árido reciclado grueso y fino y sustituciones de cemento Portland por ceniza volante y humo de sílice, y encontraron que se pueden desarrollar propiedades óptimas en los hormigones si los porcentajes de sustitución se estudian y planifican correctamente.

Sin embargo, apenas se pueden encontrar estudios que combinen ceniza volante y residuo FCC como materiales puzolánicos sustituyentes del cemento Portland en la matriz cementicia de hormigones reciclados (Soriano et al., 2016).

Al considerar aspectos relativos a la durabilidad de este tipo de hormigones de bajo impacto ambiental en general, y en particular a como influye la presencia de materiales suplementarios y áridos reciclados en el proceso de carbonatación, es importante tener en cuenta diferentes aspectos. El uso conjunto de puzolanas (CV y FCC) en pastas de cemento resulta beneficioso, ya que a corto plazo las CV favorecen la hidratación del cemento, mientras que el FCC reduce la cantidad de portlandita liberada durante la hidratación. A largo plazo, las CV fijan una mayor cantidad de cal que el FCC, lo que le confiere un mejor desempeño a la pasta compuesta por ambas adiciones. Por otra parte, la sustitución parcial del cemento por adiciones produce un refinamiento en la estructura porosa de la pasta, incrementando la cantidad de meso poros y disminuyendo la cantidad de macro poros, lo que afecta de forma directa sus propiedades de durabilidad, ya que los meso poros pueden favorecer el transporte de sustancias líquidas y gaseosas hacia el seno del material. Esta investigación tiene como objetivo evaluar la cinética del proceso de carbonatación de hormigones de bajo impacto ambiental que combinan sustituciones del 20% y 100% de árido natural por árido reciclado y del 50% del cemento Portland por materiales puzolánicos (35% ceniza volante y 15% catalizador craqueo catalítico).

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

Para la elaboración de las probetas se han utilizado dos tipos de matrices cementantes: una compuesta en su totalidad por cemento Portland (CP); y una matriz alternativa (MA) compuesta por un 50% de CP, 35% de cenizas volantes (CV) y 15% de catalizador de craqueo catalítico (FCC). El cemento utilizado ha sido Portland tipo CEM I 52,5 R designado según la Normativa Europea (UNE-EN 197-1:2000). Las CV empleadas como sustitución del cemento en el hormigón provienen de Holcim España y se han utilizado según se suministraron, sin aplicarles ningún tratamiento antes de su uso. El FCC fue suministrado por BP Oil España (Castellón-España). La composición química del cemento y las puzolanas utilizadas, obtenidas por fluorescencia de Rayos X, se muestran en la Tabla 1.

Se han utilizado dos tipos de árido grueso en la fabricación del hormigón: Árido de naturaleza caliza (AN), procedente de triturado, y Árido Reciclado (AR), proveniente de la demolición y trituración de desechos de hormigón en masa, ambos suministrados por Holcim Morteros S.A. El proveedor certifica los siguientes porcentajes de impurezas presentes en los áridos reciclados: Arcillas < 5%, partículas ligeras < 1%, asfalto < 1%, otras impurezas < 1%; cumpliendo así con los límites establecidos en la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE 08) sobre las propiedades de los áridos reciclados para hormigón. La arena utilizada para la elaboración de las probetas es una arena caliza de machaqueo procedente de la cantera de Fontcalent (Alicante-España), suministrada por la empresa Holcim Morteros S.A. Las propiedades de los áridos y arena utilizados en las amasadas y las curvas granulométricas de los mismos se muestran en la Tabla 2 y Figura 1 respectivamente. Como aditivo se utilizó un superplastificante Sikament – 200R, exento de cloruros y que permite obtener hormigones muy fluidos, incluso en tiempo caluroso.

Tabla 1. Composición química del cemento y puzolanas.

%	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P.F.*	S.D.*	Densidad (g/cm ³)
CP	62,87	20,21	4,94	1,05	2,85	3,37	0,10	0,95	2,34	1,32	3,1
FCC	0,11	46,04	47,47	0,17	0,58	0,02	0,30	0,02	1,50	3,79	2,7
CV	9,83	40,94	24,65	1,59	13,59	1,60	0,34	1,40	2,44	3,62	2,8

*P.F.: Pérdida al fuego. S.D.: Sin determinar.

Tabla 2. Propiedades generales de los áridos.

Propiedad	Normativa	AN	AR	Arena
Módulo granulométrico	UNE-EN 933-1	8,3	8,0	3,1
Densidad aparente	UNE-EN 1097-6	2700	2490	2690
Absorción de agua	UNE-EN 1097-6	0,6	4,5	0,6
Coefficiente de Los Ángeles	UNE-EN 1097-2	21,1	30,3	-

Figura 1. Granulometría de los áridos utilizados.

2.2 Procedimiento experimental

2.2.1. Diseño y caracterización de hormigones de bajo impacto ambiental

Se estudiaron hormigones con sustituciones del 0%, 20% y 100% de árido natural por árido reciclado y dos tipos de matriz cementante: una compuesta en su totalidad por cemento Portland (CP); y una matriz alternativa (MA) compuesta por un 50% de CP, 35% de CV y 15% de FCC. Cabe señalar que en ningún caso la fracción fina es sustituida por materiales reciclados, en todo momento se utilizó arena de origen natural.

2.2.2. Dosificaciones estudiadas

Fueron diseñadas seis dosificaciones distintas con el fin de evaluar la influencia que tienen los áridos reciclados y las adiciones puzolánicas (CV y FCC) sobre las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del hormigón. En la Tabla 3 se indica la nomenclatura utilizada para identificar

cada tipo de hormigón estudiado. Las dosificaciones de los materiales para fabricar hormigón se presentan en la Tabla 4.

En las dosificaciones se tomó en cuenta la granulometría de los áridos, su densidad y las condiciones de trabajabilidad deseadas. Con la finalidad de poder comparar los distintos hormigones entre sí, las sustituciones de árido natural por árido reciclado se realizan por volumen y no por peso, debido a la menor densidad de los áridos reciclados frente a los naturales.

2.2.3. Resistencia a la carbonatación

Este ensayo se ha diseñado con el objetivo de estudiar el avance del frente de carbonatación en hormigones sometidos a una atmósfera del 100% de CO₂ y HR 65 ± 5% durante 120 días. Para ello se utilizaron probetas de hormigón en masa de Ø100 x 150 mm curadas a 28 y 365 días. A estas edades se les debe sumar el tiempo requerido para el acondicionamiento de cada una de ellas. Como método de acondicionamiento, todas las probetas fueron introducidas en un desecador con HR 65% hasta masa constante (aproximadamente 60 días). A continuación, fueron colocadas en las cámaras de carbonatación para ser atacadas durante 120 días. Se tomaron medidas del avance del frente de carbonatación dos veces por semana en los primeros 45 días de ensayo; a partir de ese momento, las medidas se espaciaron según el avance de la carbonatación en cada tipo de hormigón. Al finalizar el ensayo las probetas se rompieron a tracción indirecta para medir la profundidad total alcanzada por el frente de carbonatación.

La cámara de carbonatación empleada consistió en tres desecadores conectados a una bala de CO₂ (riqueza > 99.9%, seco). El flujo de CO₂ empleado fue discontinuo, de 5 horas por día, y con caudal aproximado de 10 ml / min. La temperatura se mantuvo entre 18° y 20° C. Se controló la humedad relativa en el interior de la cámara utilizando gel de sílice, manteniéndola en un intervalo comprendido entre el 60 y 70% con el fin de acelerar al máximo la velocidad de carbonatación (Lange et al., 1996; Zornoza et al., 2009)

Por cada tipo de hormigón y edad de ensayo se utilizaron dos probetas: una de ellas se dispuso para realizar controles periódicos del avance del frente de carbonatación y la otra se reservó para confirmar el resultado obtenido al finalizar el ensayo. Ambas probetas estuvieron sometidas a las mismas condiciones de ataque.

Tabla 3. Nomenclatura utilizada en hormigones

Nomenclatura	Tipo de hormigón
0% AR-CP	Hormigón sin sustitución por árido reciclado, con matriz de CP.
20% AR-CP	Hormigón con 20% de sustitución por árido reciclado, con matriz de CP.
100% AR-CP	Hormigón con 100% de sustitución por árido reciclado, con matriz de CP.
0% AR-MA	Hormigón sin sustitución por árido reciclado, con matriz alternativa (MA)
20% AR-MA	Hormigón con 20% de sustitución por árido reciclado, con matriz alternativa (MA)
100% AR-MA	Hormigón con 100% de sustitución por árido reciclado, con matriz alternativa (MA)

Tabla 4. Dosificaciones empleadas en este trabajo.

ID	CP (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	FCC (kg/m ³)	a _{ef} (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	AN (kg/m ³)	AR (kg/m ³)	Aditivo* (%)	a _{ef} /mc
0% AR- CP	380	-	-	171	934	981	-	0,45	0,45
20% AR- CP	380	-	-	171	934	785	173	0,50	0,45
100% AR- CP	380	-	-	171	934	-	865	0,45	0,45
0% AR- MA	190	133	57	171	934	981	-	0,85	0,45
20% AR- MA	190	133	57	171	934	785	173	0,50	0,45
100% AR- MA	190	133	57	171	934	-	865	0,85	0,45

* La cantidad de aditivo se toma como un porcentaje sobre la cantidad de material cementante. a_{ef}: es la diferencia entre el agua total presente en el hormigón fresco y el agua absorbida por los áridos. Interviene en la reacción de hidratación del cemento y la trabajabilidad del hormigón.

El método propuesto para medir la profundidad de carbonatación en una probeta de hormigón se basa en realizar perforaciones progresivas sobre su superficie a lo largo del proceso de ataque (Figura 2). Debido a que el frente de carbonatación avanza con el tiempo de exposición al CO₂, se hace necesario tomar muestras cada vez más profundas. La profundidad de carbonatación se mide a intervalos de 10 ± 5 mm en al menos dos puntos diametralmente opuestos de la probeta. Se utiliza un taladro vertical equipado con una broca de 4 mm (Figura 3). Se recoge el polvo de hormigón resultante de la perforación y se rocía con una disolución de fenolftaleína para observar si se encuentra carbonatado. De ser así, se continúa perforando hasta alcanzar la profundidad donde no haya indicios de carbonatación. Los huecos resultantes en la probeta se sellan con pegamento de silicona para evitar el paso de CO₂ a través de ellos. Las probetas se vuelven a colocar en la cámara de carbonatación hasta la próxima toma de muestras.

Figura 2. Ensayo para medir la velocidad de carbonatación.

Figura 3. Método propuesto para la obtención de muestras en probetas de hormigón sometidas a una atmósfera de CO_2 .

Cuando la probeta se considera carbonatada, o cuando ha alcanzado el tiempo máximo de ensayo de 120 días, es sometida a rotura por tracción indirecta. Las dos secciones resultantes se rocían con fenolftaleína y se mide el frente de carbonatación (Figura 4). Inmediatamente se procede a romper la probeta homóloga, reservada hasta este momento, y se comparan los valores obtenidos.

Figura 4. Medida del frente de carbonatación en probetas después de rotura.

Los resultados arrojados por este método están afectados por una menor precisión que el método comúnmente utilizado, que consiste en la rotura de probetas a distintas edades. Sin embargo, por tratarse un método no destructivo es posible registrar el avance del frente de carbonatación en una misma probeta durante todo el proceso de ataque, lo que se traduce en una reducción de las muestras a utilizar en este tipo de ensayos.

3. RESULTADOS

Para la valoración de la resistencia a la carbonatación de los hormigones las probetas se mantuvieron durante 120 días en cámara de carbonatación acelerada, como se explica en el apartado 2.2.3.

Los resultados que aquí se presentan se obtuvieron mediante la carbonatación acelerada de probetas, por lo tanto, no pueden ser extrapolados a condiciones de carbonatación natural, aunque algunos autores hacen uso de un factor de extrapolación que depende de las condiciones de exposición ambiental a las que se quiera trasladar el resultado (Khunthongkeaw et al., 2006).

Este estudio evalúa la influencia de la sustitución de los áridos naturales por reciclados y del cemento por CV+FCC en la velocidad de carbonatación de los hormigones. Para ello se ha seguido el modelo que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo mediante una constante, denominada velocidad de carbonatación, la cual se expresa en (1) (Khunthongkeaw et al., 2006; Castro et al., 2000).

$$x = V_{CO_2} \sqrt{t} \quad (1)$$

Donde, x es la profundidad de carbonatación en mm, t es el tiempo en años y V_{CO_2} es la velocidad de carbonatación en $\text{mm} \cdot \text{año}^{-0.5}$.

La evolución de la profundidad de carbonatación en los hormigones durante el proceso de carbonatación acelerada se presenta en la Figura 5. Se observa una clara tendencia de los hormigones con matriz MA a ofrecer una menor resistencia a la carbonatación, ya que estos presentan menor cantidad de cemento debido a la sustitución del mismo por adiciones y la portlandita es consumida por adiciones; esto se traduce en una disminución del pH y, por consiguiente, en una mayor profundidad de carbonatación del hormigón.

Por otro lado, es evidente que a medida que se incrementa el porcentaje de árido reciclado en el hormigón, la velocidad de carbonatación aumenta, sin importar el tipo de matriz utilizada. Este comportamiento era esperable debido a que la porosidad de los hormigones aumenta al aumentar la sustitución de los áridos, por lo que el CO_2 encuentra el camino más despejado para penetrar hacia el interior del material. El incremento observado en la profundidad de carbonatación debido al uso de áridos reciclados está en sintonía con lo obtenido por otros autores (Arredondo-Rea et al., 2012), en cuyo trabajo, los hormigones 100% reciclado alcanzaron una profundidad de carbonatación de más 10 mm a los 120 días de exposición, mientras que en el hormigón de referencia dicha profundidad se ubicó por debajo de 7 mm. Además, se han encontrado estudios de carbonatación natural a diez años, en los que el frente de carbonatación ha penetrado sólo un 10% más en hormigones 100% reciclados, en comparación con el hormigón de referencia (Kou et al., 2013).

Figura 5. Evolución de la profundidad de carbonatación en hormigones durante el ensayo de carbonatación acelerada.

En los hormigones con matriz MA, el frente de carbonatación alcanza la totalidad de la probeta antes de los 120 días fijados para el ensayo; mientras que, en los hormigones fabricados con CP, el frente de carbonatación alcanza una profundidad inferior a la mitad del radio de la probeta. Esto significa que las pérdidas en la reserva alcalina, debido a la sustitución del 50% del cemento por adiciones, afecta de forma significativa a la velocidad de carbonatación, ya que la portlandita juega un papel importante a la hora de frenar el avance del frente. El comportamiento registrado por esta matriz coincide con lo expuesto por otros autores sobre la influencia negativa que conlleva la sustitución del cemento por adiciones, entre las que se encuentran las CV y el FCC, en la resistencia a la carbonatación (Glinicki et al., 2016; Papadakis et al., 2000; Zornoza et al., 2009).

Hormigones con 100% AR y un 30% de CV como sustituto del cemento, han demostrado que la combinación de ambas sustituciones incrementa la profundidad de carbonatación entre un 63% y un 65% (Kou et al., 2013), por lo tanto, es de esperarse que al sustituir un 50% del cemento la velocidad de carbonatación se vea afectada. Algunos investigadores citan que la sustitución de un 50% de cemento por CV conduce a coeficientes de carbonatación entre 2 y 3 veces mayores que los del hormigón patrón (Papadakis et al., 2000).

Si se observa la evolución de la masa de los hormigones durante el proceso de carbonatación (Figura 6), se aprecia una relación directa con los datos anteriores. En el caso de los hormigones

con matriz alternativa, el incremento de sus respectivas masas es menos significativo, ya que existe una menor cantidad de sustancias carbonatables; este incremento se frena en el intervalo 65-85 días debido a la total carbonatación de los hormigones.

Figura 6. Evolución de la masa de los hormigones durante el ensayo de carbonatación acelerada.

En la Tabla 5 se presentan las constantes de velocidad de carbonatación (V_{CO_2}) de cada hormigón obtenidas mediante (1). Se aprecia claramente que la resistencia que ofrece la matriz alternativa es mucho menor que la proporcionada por la matriz de cemento, como se ha indicado anteriormente; y que cuanto mayor es la cantidad de árido reciclado en la mezcla, mayor es la velocidad de carbonatación de los hormigones. Sin embargo, se considera que el ensayo de carbonatación acelerada subestima la resistencia que podrían presentar los hormigones con matriz MA en condiciones de carbonatación natural, ya que existen registros de hormigones con sustituciones del 55% de cemento por CV que después de haber estado expuestos durante 10 años a condiciones atmosféricas mostraron una profundidad de carbonatación entre 0,7 y 2 veces mayor que la del hormigón de referencia, siendo la mayor profundidad de carbonatación la correspondiente a un hormigón elaborado en su totalidad con árido reciclado (Ajdukiewicz et al., 2002).

Tabla 5. Velocidad de carbonatación de los hormigones en el ensayo de carbonatación acelerada.

ID	V_{CO_2} (mm/año ^{-0,5})
0% AR-CP	9
20% AR-CP	17
100% AR-CP	26
0% AR-MA	104
20% AR-MA	113
100% AR-MA	118

En la Figura 7 se representa la velocidad de carbonatación de los hormigones en función de su resistencia a compresión a 28 días de curado. En ella se puede apreciar que existe una clara relación

entre estos parámetros, ya que ambos se encuentran fuertemente afectados por la porosidad de la matriz cementante. Cuanto menor es la porosidad del hormigón, mayor es su resistencia a compresión ya que el material es más denso. Asimismo, cuanto menor es la porosidad del hormigón, menor es la capacidad de difusión del CO₂ a través de la red de poros.

Figura 7. Relación entre la resistencia a compresión de los hormigones (R_c) a 28 días de curado y la velocidad de carbonatación obtenida mediante el ensayo de carbonatación acelerada (V_{CO_2}).

Las fotografías del revelado de las probetas con fenolftaleína una vez finalizado el ensayo de carbonatación acelerada (120 días) se muestran en la Figura 8. En dichas fotografías puede apreciarse que los resultados obtenidos con el método de perforación son coherentes con los registrados en las probetas que han permanecido intactas a lo largo del proceso, es decir, las que no fueron empleadas para la toma continua de muestras.

Se comprueba que las probetas con matriz MA están totalmente carbonatadas a 120 días de ensayo, mientras que las de CP aún no se encuentran carbonatadas en su totalidad. En estos últimos, la profundidad de carbonatación registrada aumenta con la cantidad de árido reciclado empleada en su fabricación.

Figura 8. Fotografías de las probetas de hormigón sometidas a carbonatación acelerada después de 120 días de ensayo.

4. CONCLUSIONES

Una vez evaluada la influencia de la sustitución parcial del cemento por adiciones (CV y FCC) y de los áridos naturales por áridos reciclados en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del hormigón, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

Tanto la sustitución de los áridos, como la sustitución parcial del cemento por adiciones, conducen a una reducción en la resistencia a la carbonatación de los hormigones. Las variaciones debidas a la sustitución de los áridos calizos por áridos reciclados son menores que las asociadas al uso de la matriz alternativa, como consecuencia de la disminución en la reserva alcalina por la alta sustitución del cemento.

Los beneficios medioambientales que conlleva el uso de áridos reciclados y de residuos industriales como materiales puzolánicos incitan a pensar que en un futuro su aplicación será obligatoria. Los resultados obtenidos en esta investigación defienden la posibilidad de alcanzar hormigones con árido reciclado y adiciones puzolánicas que presenten propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad óptimas, capaces de proteger de forma eficaz a las armaduras ante los distintos agentes agresivos que causan su deterioro.

5. REFERENCIAS

Ajdkiewicz, A., Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24(2): 269–279. doi:10.1016/S0958-9465(01)00012-9

Arredondo-Rea, S.P., Corral-Higuera, R., J.M. Gomez-Soberon, J.H. Castorena-Gonzalez, V. Orozco-Carmona, V., Almaral-Sanchez, J. L. (2012). Carbonation rate and reinforcing steel corrosion of concretes with recycled concrete aggregates and supplementary cementing materials. *International Journal of Electrochemical Science*, 7(2), 1602–1610.

Bijen, J. (1996) Benefits of slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, 1996, vol. 10-5, pp. 309-314.

- Borrachero, M.V., Payá, J., Monzó, J., Soriano, L., Tashima, M.M. (2021). “*Inorganic binders from petrochemical industry waste: The case of fluid catalytic cracking catalyst residue*”. Capítulo de libro: Chapter 10 (pp 283-334). *Waste and Byproducts in Cement-Based Materials*. Eds: Jorge de Brito, Carlos Thomas, César Medina, Francisco Agrela. Editorial: Elsevier. eISBN: 978-0-12-820895-3; ISBN: 978-0-12-820549-5 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820549-5.00003-6>
- Castro, P., Sanjuan, < J. Genesca, J. (2000)“Carbonation of concretes in the Mexican Gulf”. *Building and Environment*, 35(2), 145–149. doi:10.1016/S0360-1323(99)00009-8.
- Chaofeng, L., Zhedong, C., Huixia, W., Jianzhuang, X., Yuming, Z., Zhiming, M. “Chloride transport and induced steel corrosion in recycled aggregate concrete: A review”. *Construction and Building Materials*, 2021, vol, 282, 122547. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122547.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G. (2009). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23: 2869-2876.
- Garcés, P., Glasser, F.P., Brew, D.R.M., Zornoza, E., Payá, J. (2011), Pozzolanic Activity of a Spent Fluid Catalytic Cracking Catalyst Residue. *Advances in Cement Research*, 23(1):1-7.
- García de Lomas, M., Sánchez de Rojas, M.I. Frías, M., Mújika, R. (2006). *Comportamiento científico-técnico de los cementos portland elaborados con catalizadores FCC. Aplicación de la norma vigente*. Monografía Materiales nº. 412 Editado por el CSIC, Madrid: p. 46.
- Glinicki, M. A., Józwiak-Niedźwiedzka, D., Gibas, K., Dabrowski, M. (2016). Influence of blended cements with calcareous fly ash on chloride ion migration and carbonation resistance of concrete for durable structures. *Materials*, 9(1). doi:10.3390/ma9010018
- Herath, C., Gunasekara, C., Law, D., Setunge. S. (2020). Performance of high-volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review. *Construction and Building Materials*. 258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120606>.
- Hoai-Bao, L., Quoc-Bao, B. (2020) Recycled aggregate concretes - A state-of-the-art from the microstructure to the structural performance”. *Construction and Building Materials*, 2020, Vol., 119522.
- Hooton, R. D. (2015). Current developments and future needs in standards for cementitious materials”. *Cement and Concrete Research*, 78: 165–177.
- Khunthongkeaw, J., Tangtermsirikul, S., Leelawat, T. (2006). A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 20(9), 744–753. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.052
- Kou, S *et al.* (2011) Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 33(8): 788-795.
- Kou, S. C., Poon, C. S. (2013). Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 37(1), 12–19. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011.

Lange, L. C., Hills, C. D., Poole, A. B.. (1996). The influence of mix parameters and binder choice on the carbonation of cement solidified wastes. *Waste Management*, 16(8): 749–756. doi:10.1016/S0956-053X(97)00021-4

Papadakis, V. G. (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30(2):, 291–299. doi:10.1016/S0008-8846(99)00249-5

Paris, J.M., Roessler, J.G., Ferraro, C., De Ford, H. (2016). A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 121:1-18.

Sim, J., Park, C. (2011). Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste Manage*, 31 (11): 2352-2360.

Soriano, L., Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Tashima, M.M. (2016) High strength mortars using ordinary Portland cement–fly ash–fluid catalytic cracking catalyst residue ternary system (OPC/FA/FCC). *Construction and Building Materials*, 106 (1): 228-235. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.111>.

Yin, K., Ahamed, A., Lisak, G. (2018). “Environmental perspectives of recycling various combustion ashes in cement production – A review”. *Waste Management*, 78: 401–416.

Zornoza, E., Garcés, P., Monzó, J., Borrachero, M. V., Payá, J. (2009). Accelerated carbonation of cement pastes partially substituted with fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). *Cement and Concrete Composites*, 31(2): 134–138. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.12.008

Zornoza, E., Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., Garces, P. (2009). The carbonation of OPC mortars partially substituted with spent fluid catalytic catalyst (FC3R) and its influence on their mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 23(3): 1323–1328. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.024