

Modelos predictivos e impacto ambiental de la carbonatación del hormigón con agregado reciclado: Una revisión

Predictive models and environmental impact of recycled aggregate concrete carbonation: A review

Carlos Pico-Cortés^{1, 3*}  <https://orcid.org/0000-0002-7063-9753>

Yury Villagrán-Zaccardi²  <https://orcid.org/0000-0002-0259-7213>

Recibido 05 de enero de 2023, aceptado 19 de octubre de 2023

Received: January 05, 2023 Accepted: October 19, 2023

RESUMEN

Este artículo contiene una revisión de avances respecto a la predicción de carbonatación del hormigón con agregado reciclado, así como los aspectos relacionados con la sustentabilidad. La carbonatación tiene doble enfoque. En el enfoque de hormigón armado, es deseable impedir el avance del frente de carbonatación para que la caída del pH no llegue a causar corrosión del acero. El principal parámetro en este caso es el coeficiente de carbonatación. En el enfoque de hormigón no armado, se prioriza una mayor absorción y secuestro de dióxido de carbono, como aporte a la reducción del calentamiento global. En ello se recurre al parámetro grado de carbonatación. Para el caso del hormigón reciclado estos dos parámetros importan debido a su estructura porosa particular. La correlación entre carbonatación natural/acelerada y otras propiedades durables es descrita. Se mencionan distintos modelos predictivos de carbonatación, incluyendo aquellos basados en inteligencia artificial, y se introduce al cálculo de vida útil. La revisión bibliográfica muestra una tendencia creciente en la medición de propiedades de transporte para su uso dentro de la modelización. Esto porque estas predicciones presentan mayor confiabilidad con respecto a aquellas basadas en propiedades mecánicas o estado fresco. En cuanto a la verificación por desempeño, se requiere cotejar los resultados de modelos con resultados experimentales de carbonatación en condiciones ambientales de perspectiva realista. Además, comprobar relaciones de dependencia con características de los agregados reciclados determinadas experimentalmente. Finalmente, se proponen algunas consideraciones y acciones para realizar un efectivo análisis de aspectos sustentables del ciclo de vida del material.

Palabras clave: Carbonatación, hormigón con agregado reciclado, vida útil, sustentabilidad, ciclo de vida.

ABSTRACT

This article reviews the prediction of carbonation in concrete with recycled aggregate in all stages and aspects related to sustainability. Concrete carbonation has two sides. In reinforced concrete, the research approach aims to prevent the advance of the carbonation depth so that the pH drop does not lead to reinforcement corrosion. The parameter of this approach is the carbonation coefficient.

¹ Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica. Área Tecnología del Hormigón. La Plata, Argentina. E-mail: hormigones@lemit.gov.ar

² Sustainable Materials, VITO. Mol, Bélgica. E-mail: yury.villagranzaccardi@vito.be

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Centro Científico Tecnológico La Plata. La Plata, Argentina. E-mail: carlospicocortes@conicet.gov.ar

* Autor de correspondencia: carlospicocortes@conicet.gov.ar

In non-reinforced concrete, priority is given to the higher absorption and sequestration of carbon dioxide to reduce global warming. Thus, obtaining the parameter degree of carbonation is necessary. In the case of recycled concrete, these two parameters become more critical due to its particular pore structure. The correlation between natural or accelerated carbonation and other durability properties is also described. Different predictive carbonation models are mentioned, including those based on artificial intelligence, and the service life calculation is introduced. The literature review shows a growing trend in measuring transport properties to use them within predictive modeling. This modeling is based on the fact that these predictions have higher reliability than those derived from mechanical or fresh-state properties. As for performance verification, it is required to compare model results with experimental carbonation results under realistic environmental conditions. Checking a possible dependence with experimentally determined recycled aggregate characteristics is also recommended. Finally, some considerations and actions are proposed to analyze the sustainable aspects of the material life cycle effectively.

Keywords: Carbonation, recycled aggregate concrete, useful life, sustainability, life cycle.

INTRODUCCIÓN

El reciclaje constituido como agregados pretende incrementar la sustentabilidad para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD). Se han estudiado en gran medida las propiedades mecánicas y de transporte del hormigón con agregado reciclado (HAR); sin embargo, se ha resuelto en menor medida el comportamiento de diferentes tipos de HAR ante la carbonatación y otras exposiciones ambientales. El uso de HAR depende entonces de la capacidad técnica para predecir su desempeño en servicio en aspectos mecánicos, sustentables y de durabilidad.

La carbonatación del HAR armado puede en algunos casos, determinar su durabilidad, ya que su principal consecuencia es la corrosión de armaduras. De hecho, la corrosión y las deficiencias en el hormigón que la producen son causas principales de deterioro en estructuras de hormigón armado [1]. Los modelos predictivos de carbonatación pretenden establecer la vida útil de estructuras cuyas condiciones ambientales se caracterizan por la presencia de dióxido de carbono (CO_2).

La carbonatación también comprende aspectos sustentables del hormigón que se relacionan con el aprovechamiento de la capacidad de absorción y posterior almacenamiento de CO_2 [2], [3]. Este aspecto es de gran interés para la reducción directa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs). Para el cálculo de la huella de carbono del hormigón se han desarrollado metodologías que analizan el ciclo de vida del material, pero los procesos del fin de uso

de las estructuras han sido menos examinados. El estudio de la carbonatación del HAR puede contribuir a verificar las situaciones en las que representa un proceso perjudicial, y las situaciones en las que implica una oportunidad para combatir el calentamiento global. En ambos casos, es imprescindible relacionar la carbonatación con las propiedades del HAR y poder predecirla sobre esa base.

Si bien en la literatura pueden encontrarse varios compendios que analizan el estado del arte respecto a la carbonatación del HAR, no existen análisis profundos que comparen diferentes modelos predictivos. Estos modelos predictivos son en general desarrollados en paralelo, y en las siguientes secciones discutiremos su fiabilidad respecto a conjuntos de datos para los cuales no han sido necesariamente calibrados o entrenados.

RELACIÓN ENTRE CARBONATACIÓN Y OTRAS PROPIEDADES

Existen múltiples estudios de la relación entre velocidad de carbonatación y otras propiedades mecánicas y durables del HAR. El análisis de estas correlaciones permite definir la precisión de los modelos predictivos incorporando términos más directos. En general, la incorporación de agregado reciclado (AR) tiende a empeorar el comportamiento durable del HAR. Sin embargo, para el caso de la velocidad de carbonatación, la afectación puede llegar incluso, a compensarse con un incremento del recubrimiento [4]. Esto dependerá de cada uno de los factores incidentes en la carbonatación del HAR que pueden ser de carácter muy variado. La

interacción físico-química de los constituyentes del HAR y su influencia en la carbonatación del HAR han sido descritos en un trabajo anterior [5], y el presente trabajo pretende ser complementario con un enfoque más profundo en los modelos predictivos y el impacto respecto a la huella de carbono del hormigón. En esta sección se describen brevemente aquellos aspectos de mayor relevancia respecto a modelos predictivos.

En cuanto a propiedades mecánicas, la correlación de la carbonatación con la resistencia a la compresión es la que más se ha estudiado. Recientemente se han encontrado resultados con comportamiento variado [6]-[9]. Hasta hace unos años se consideraban aproximaciones entre estas dos propiedades para el hormigón convencional. Pero, los modelos predictivos demuestran que la desviación de los resultados puede ser alta debido a distintas condiciones experimentales. Las características particulares del HAR suponen condiciones diferentes a las del hormigón convencional.

Una correlación entre las propiedades dependientes del comportamiento de la red de poros es más esperable. Thomas, Setién, Polanco, Alaejos, and Sánchez de Juan [6], estudiaron la relación entre carbonatación y porosidad del HAR. Como es conocido, en general, el HAR tiende a presentar mayor porosidad que el hormigón convencional, por lo que puede visualizarse este efecto en las propiedades de transporte. Sin embargo, los mecanismos físico-químicos de la carbonatación y la variabilidad, con medios o altos grados de sustitución de AN por AR, no permiten que esta correlación sea obvia a largo plazo. En el HAR, la absorción de agua tiene una buena correlación con el volumen total de poros pues se relaciona con una tendencia lineal [10]. Sobre esta base, puede estimarse una correlación con la carbonatación para porcentajes de reemplazo donde predomina el factor físico. Kurda, de Brito, and Silvestre [9], por su parte, expresaron que puede existir una correlación lineal entre profundidad de carbonatación y absorción capilar a los 28, 80, 180 y 365 días para un hormigón con 100% de AR. La velocidad de transporte de agua puede considerarse como un indicador valioso para estimar la velocidad de carbonatación.

Respecto al transporte de gases, la prueba de permeabilidad al oxígeno aporta una idea sobre procesos

difusivos como el ingreso de CO_2 dentro del hormigón. Esta propiedad presenta una tendencia a acelerarse en la etapa de difusión más que la absorción de agua. En [6] se determinaron relaciones entre el coeficiente de carbonatación y la permeabilidad al oxígeno para varios reemplazos de AN por AR. Estos autores obtuvieron una curva cada vez más pronunciada a medida que se aumentaban los porcentajes de reemplazo.

En cuanto a la relación de la carbonatación con la penetración de ion cloruro, los agregados de hormigones reciclados con origen cuarcítico y la grava de río contribuyen a resistir ambos ataques [11], [12]. La capacidad de combinación de la pasta adherida con cloruros y con CO_2 puede determinar la similitud en el comportamiento. Sin embargo, ya que ambas reacciones son diferentes, es difícil correlacionar fenomenológicamente los procesos de transporte, teniendo en cuenta, además, la diversidad de ambientes de exposición.

En [13], se determinó la carbonatación natural de hormigón reciclado con múltiples ciclos de reciclaje y se encontraron correlaciones con las propiedades medidas a 28 días por durabilidad. En este trabajo se comprobó que la porosidad y la succión capilar son parámetros más adecuados que las propiedades mecánicas para predecir la profundidad de carbonatación. En la Figura 1 se

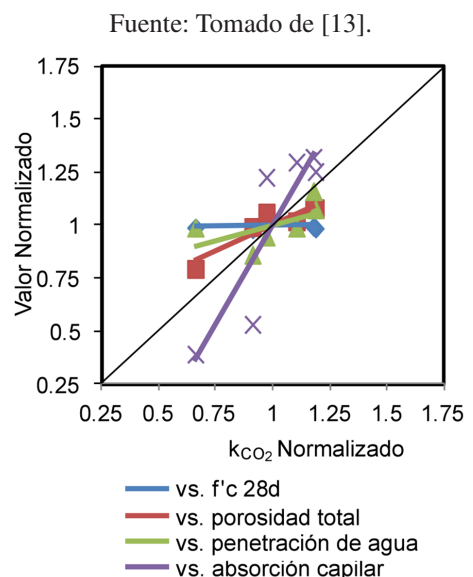


Figura 1. Resultados de Carbonatación natural vs. Propiedades durables del RAC a 28d.

observa que aquellas propiedades relacionadas con la estructura de poros se relacionan mejor con la velocidad de carbonatación que las propiedades mecánicas.

Por otra parte, se ha estudiado parcialmente la influencia de varias características de la ZTI en las propiedades de transporte de HAR, entre ellas la microdureza [9], [14], [15]. Se encontraron casos para los que la ZTI vieja fue más débil que la ZTI nueva, y otros casos en los que ocurrió el comportamiento opuesto. La medición de esta propiedad puede ser útil para verificar su influencia en la resistencia a los cloruros y a la carbonatación. No obstante, aún debe profundizarse el conocimiento de esta relación y especialmente ampliar el análisis a otras características como la microporosidad de las ZTI.

Carbonatación natural, acelerada y modelos predictivos

La validación de los modelos predictivos requiere resultados de experimentación a largo plazo. La carbonatación natural del HAN se ha estudiado ampliamente y ha servido para establecer modelos de velocidad de carbonatación [16]-[19]. Ya que la carbonatación natural de HAR se ha estudiado en menor medida, en algunos casos se han utilizado como base modelos basados en carbonatación natural de HAN para establecer predicciones en HAR [20]. Por otra parte, la investigación realizada por [21] sobre HAR con reemplazos de 0%, 50% y 100% de AN por AR contribuyó a validar los modelos realizados por [22] y [23].

En [8] se estudió la carbonatación natural de diversas mezclas de HAR para validar resultados de carbonatación acelerada en ambientes protegido y desprotegido respectivamente. En general, las condiciones protegidas presentaron mayor confiabilidad de los resultados debido a la mayor correlación con los resultados de carbonatación natural. Para el caso de HAR con AFR, se determinó la durabilidad por carbonatación natural con reemplazo de hasta 30% de agregado fino por AFR a 310 y 620 días [11]. Se encontró que la profundidad de carbonatación a estas edades es similar a la del hormigón convencional para un ambiente de moderada agresividad y relaciones agua/cemento menores de 0,43. Posteriormente, se evaluó en el HAR la relación empírica entre el coeficiente de carbonatación natural a 14 años y otras propiedades durables a 28 días

durante varios ciclos de reciclaje [13]. Se presentó un aumento de la tasa de carbonatación del hormigón con el número de ciclos de reciclaje debido al aumento de la porosidad del agregado original. La tasa de carbonatación y la succión capilar se afectaron en mayor medida para un rango delimitado de tamaños de poro con reemplazo de hasta 75% en volumen. Para los HAR de [21] se incluyeron cenizas volantes como reemplazo de cemento desde el 0% hasta el 55% y se encontró que la profundidad de carbonatación a 10 años fue favorable.

Los estudios de carbonatación natural son los más realistas, pero demandan cuantiosos períodos de ensayo y su extrapolación a otros ambientes es dificultosa. Por ello, la mayoría de estudios utilizan métodos de carbonatación acelerada. Así se obtienen coeficientes reproducibles y por lo tanto útiles para modelos de predicción. Las condiciones de ensayo aceleradas resultan aún un tema de debate.

La consideración de los parámetros ambientales no guarda particularidades especiales para el HAR. La mayoría de los procedimientos de carbonatación consideran valores de humedad relativa en este rango, siendo el más común el 60%. Para el hormigón, en general se acepta que el rango de afectación determinante por humedad relativa para que se produzca la carbonatación máxima se encuentra entre 50% y 60% [24]. En el estudio de [25] para HAR, se identificó la formación de polimorfos de carbonato de calcio entre 50% y 75%. No hay razones para pensar que la carbonatación óptima varíe en el HAR respecto al hormigón convencional. Con respecto a la influencia de la temperatura, la difusión de CO_2 sufre un incremento con el aumento de la temperatura. En [26] se realizó un estudio para verificar estas condiciones en el hormigón convencional. Para el caso de HAR estas verificaciones no han sido desarrolladas con profundidad, pero no hay razón para pensar que pudieran cambiar. El principal parámetro a observar es la influencia de la temperatura sobre la química del líquido de poro. Los ensayos acelerados se realizan generalmente a temperaturas de 20 a 25 °C. Los coeficientes de carbonatación acelerada requieren entonces correcciones de los coeficientes con factores de humedad y térmico para su aplicación en modelos de predicción.

La influencia de la concentración de CO_2 en los resultados de ensayos acelerados se ha discutido

en gran medida, y actualmente el consenso tiende a concentraciones no muy altas. Alrededor del mundo se utilizan diversas metodologías con distinta concentración de CO₂ sin llegar a un consenso generalizado, pero cuanto mayor es la concentración de CO₂, mayores son las diferencias fenomenológicas con la carbonatación natural. Algunas recomendaciones publicadas han sido recopiladas en [27], donde se sugiere no superar el 4% para obtener resultados suficientemente realistas. En [28] se estableció la microestructura, cambios químicos y formación de fases en pastas cementíceas sometidas a varias concentraciones de CO₂. Estos autores encontraron que de 0,03% a 3% resulta una microestructura similar a la derivada de carbonatación natural que para mayores concentraciones. Las características microestructurales generadas a partir de la reacción de carbonatación pueden ser distintas para el caso del HAR y deben ser verificadas en futuras investigaciones.

Entre una metodología de carbonatación acelerada y otra pueden variar no solo la concentración y los rangos de humedad y temperatura, sino también: la duración, las condiciones previas de curado de muestras, las dimensiones de las mismas, el cierre o apertura del sistema de control, las restricciones, la validez del tiempo de predicción, etcétera [27].

Los diversos modelos predictivos disponibles para la carbonatación del hormigón definen al proceso como controlado por la difusión, y por lo tanto están basados en la segunda ley de Fick [29], descrita en la ecuación (1).

$$e(t) = kc \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

Donde: $e(t)$ es la profundidad de carbonatación [mm], kc [mm años^{0,5}] es el coeficiente de carbonatación y t es el tiempo [años].

Otros modelos clásicos basados en esta premisa han procurado implementar mayor cantidad de variables para el cálculo [30]-[32], y recientemente [33], dividiendo el coeficiente kc en múltiples componentes.

De manera simplificada, la constante de carbonatación natural, necesaria para la estimación de la profundidad en la ecuación (2) se puede calcular con base en la diferencia de concentraciones de CO₂ en ensayos acelerados y la concentración ambiental según la ecuación (3) [34], [35].

$$e(t) = e_0 + k_n \sqrt{t} \quad (2)$$

$$k_n = \frac{k_{ac} \sqrt{C_n}}{\sqrt{C_{ac}}} \quad (3)$$

Donde: e_0 es la profundidad de carbonatación inicial [mm], k_n [mm años^{0,5}] es el coeficiente de carbonatación natural, C_n es la concentración ambiental de CO₂ y C_{ac} la concentración de CO₂ acelerada.

Las limitaciones de este modelo no consideran que tanto los productos de la reacción como el grado de carbonatación se ven modificados a altas concentraciones respecto a las concentraciones ambientales. En general, se carbonata más silicato de calcio hidratado, lo que puede provocar cambios en la microestructura y mayor captura de CO₂, pero también mayor microfisuración y contracción por carbonatación.

Faleschini, Zanini and Hofer [36], por su parte, compararon entre sí algunas formulaciones originalmente calibradas para carbonatación de hormigones convencionales como [30], [37] y [38], con el fin de aplicarse en HAR. Las dos primeras con enfoque determinístico y el Boletín 34 de fib con enfoque probabilístico. A través de ensayos experimentales, los autores encontraron que la relación agua/cemento fue la variable más influyente en la velocidad de carbonatación para los HAR estudiados. La inclusión de AR genera diferentes comportamientos principalmente debido a las condiciones especiales de la solución de poro y pH. La influencia de las demás cualidades de los AR (diferente composición, densidad, contenido de mortero adherido, etc.) no fue considerada en este caso.

Los modelos predictivos para HAR que consideran la influencia de los AR directamente prometen ser más eficientes. Algunos investigadores como [20],[22], [23] y [39] han propuesto modelos que incluyen variables características de los AR o porcentaje de reemplazo para predecir profundidad de carbonatación. El modelo base de Xiao y Lei se describe en a través de la ecuación (4) [22]:

$$e(t) = 839 g_{RC} (1 - R)^{1,1} \sqrt{\frac{W / (\gamma_c C_e) - 0,34}{\gamma_{HD} \gamma_c * 8,03 C_e}} n_0 t \quad (4)$$

Donde $e(t)$ es la profundidad de carbonatación del HAR; R es humedad relativa medida en el rango de 0 a 1 siendo 1 el 100%; W es contenido unitario de agua del HAR; Ce es contenido unitario de cemento del HAR; γ_c el coeficiente de corrección por tipo de cemento; γ_{HD} el coeficiente por corrección del grado de hidratación; n_0 la concentración en volumen de CO_2 ; t es tiempo de exposición y g_{RC} el coeficiente de influencia de los AR.

El coeficiente de influencia g_{RC} depende directamente del porcentaje de reemplazo de AN por AR. Es 1,0 para 100% de AN y 1,5 para el 100% de reemplazo. Esta concepción es quizás demasiado simplificada, pero permite una aceptable aproximación. La interpolación lineal entre estos valores permite calcular g_{RC} para porcentajes intermedios. Sin embargo este modelo inicial, al no considerar características de los agregados reemplazados, vería afectada su fiabilidad.

Recientemente, se propuso un modelo basado en la combinación entre una concepción teórica de variables e iteración de datos en [23]. Se incluyeron factores adicionales propios de los AR que afectan a la carbonatación del HAR. Asimismo, se tiene en cuenta la resistencia a la compresión del hormigón. De manera simplificada, el modelo se puede expresar por medio de las ecuaciones (5)-(7):

$$e(t) = m k_A \sqrt[4]{T} k_e \sqrt{\frac{k_c W}{f_c^3 C e}} k_c \sqrt{t} \quad (5)$$

$$k_e = R^{1.5} (1 - R) \quad (6)$$

$$k_A = e^{-0.07 A_{wa}} \quad (7)$$

Donde m y k_A son parámetros que reflejan la capacidad de absorción ponderada de los agregados; A_{wa} refleja la influencia de la porosidad del mortero adherido; k_e es el parámetro de humedad relativa; k_c es el coeficiente de carbonatación; R es la humedad relativa; W es el contenido unitario de agua en el HAR; Ce es el contenido unitario de cemento en el HAR; T es la temperatura; f_c es la resistencia a la compresión y t es el tiempo de carbonatación.

La influencia de la humedad relativa en la predicción de profundidad de carbonatación es distinta para varios de los modelos mencionados. En algunas

ecuaciones, como ecuación (4), esta consideración es inexacta debido a una concepción experimental. Una mejor aproximación al comportamiento real esperado se puede ver reflejada con el factor ke calculado con la ecuación (6). Se puede esperar una mayor aproximación para aquellas ecuaciones que incluyen una mayor concepción teórica [23].

En la Figura 2 se puede observar la influencia de las características de los AR, consideradas en la fiabilidad de los modelos predictivos. Resultados de diversos modelos aplicados a los mismos grupos de hormigones fueron cotejados en [23]. La profundidad de carbonatación determinada con cada modelo se validó con mediciones de largo plazo seleccionadas de [21]. En este estudio, varios HAR con relación agua/cemento de 0,55 y contenido de cemento de 410 Kg/m³ fueron sometidos a carbonatación natural durante 10 años. En comparación con el modelo de [22], el cual considera solo el porcentaje de reemplazo, el modelo de [23] se acerca más a los resultados naturales debido a la inclusión de estas características. Este comportamiento se observa para varias edades de carbonatación entre 28 días y 10 años con porcentajes de reemplazo de 0%, 50% y 100%.

El coeficiente de carbonatación k_c y su relación con la tasa de reemplazo del agregado grueso y relación agua/cemento es el fundamento de la mayoría de los modelos de carbonatación para conectar a la velocidad de carbonatación con los principales factores que determinan la porosidad. Una relación de este tipo fue determinada experimentalmente por [6] según la ecuación (8).

$$k_c = \alpha_1 e^{\beta_1 (w/c)} \quad (8)$$

Donde los parámetros empíricos α_1 y β_1 dependen de la tasa de reemplazo de AN por AR grueso. Así para 0%, α_1 es 0,15 y β_1 es 3,3; para el 100% α_1 es 0,088 y β_1 es 4,6. Los coeficientes para porcentajes intermedios se pueden calcular mediante interpolación lineal.

R.V. Silva, A. Silva, Neves, and de Brito Silva [20] establecieron un modelo estadístico considerando variables del HAR para predecir el coeficiente de carbonatación. Los autores consideraron características de diseño de mezcla, condiciones ambientales y del agregado reciclado. En el modelo

Fuente: Datos tomados de [21]-[23]

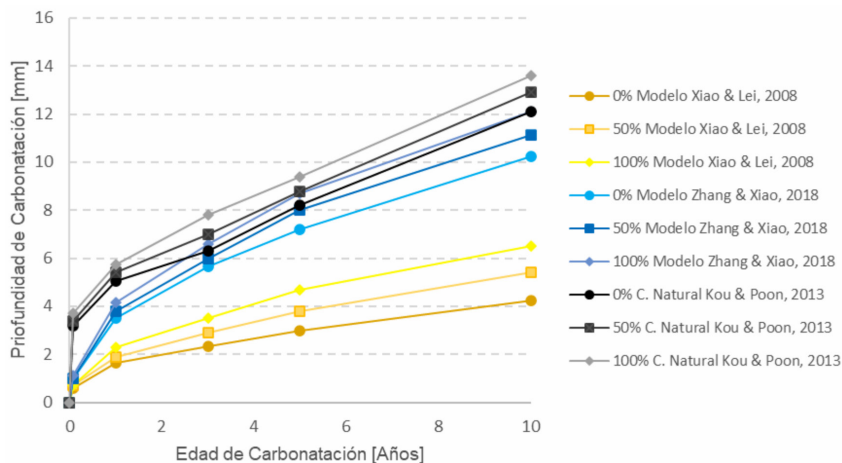


Figura 2. Profundidades de carbonatación predichas por los modelos: Xiao & Lei, 2008 y Zhang & Xiao, 2018 versus profundidades de carbonatación natural a diversas edades y tres porcentajes de reemplazo.

descrito en las ecuaciones (9)-(10), ellos plantearon que la carbonatación en el hormigón depende de la resistencia especificada, del contenido de clínker, de la concentración ambiental de CO_2 y de la absorción de agua equivalente de los agregados.

$$k_{ac} = 75.159 - 0,758f_c - 0,12Ce + 4.553c + 0,457EWA \quad (9)$$

Donde k_{ac} es el coeficiente de carbonatación acelerada, f_c es resistencia a la compresión a 28 días en MPa, Ce es contenido de cemento [kg/m³], y c es la concentración de CO_2 (%). EWA es la absorción de agua equivalente (%) de la mezcla agregado, que puede calcularse mediante la ecuación (10).

$$EWA = 33.384 + 0,007RAF - 0,012EODD \quad (10)$$

Donde RAF es el porcentaje de agregado reciclado y $EODD$ la densidad seca absoluta del agregado mezclado.

Las tensiones por carga existentes también pueden ser tenidas en cuenta en la modelización de la carbonatación del HAR debido a que microfisuras se pueden generar o aumentar las existentes. Tang, Wu, Zou, Yue, and Mueller [39] utilizaron como base el modelo teórico de [22] para experimentar y determinar la carbonatación de HAR ante cargas actuantes. Los autores trabajaron con AR triturados

locales bien graduados con densidad similar a la del agregado natural. Los resultados encontrados derivaron en una formulación expresada en las ecuaciones (11)-(13), que atiende la presencia de carga axial:

$$x_{RAC} = K_f * x_{o RAC} \quad (11)$$

$$x_{o RAC} = \gamma_s * [Ec(11)] \quad (12)$$

$$\gamma_s = -0,087t + 3,807 \quad (13)$$

Donde, K_f es un factor de carga axial, para compresión y tensión, a determinarse por medio de la ecuación (14). S_c y S_t son las relaciones de esfuerzo a compresión y tensión. Respectivamente:

$$K_f = \begin{cases} -2.3423S_c^3 + 4.7047S_c^2 - 0,776S_c + 1 & (c) \\ 1.6921S_t^2 + 0,0574S_t + 1 & (t) \end{cases} \quad (14)$$

Otro de los modelos que considera el factor por carga mecánica está basado en el estudio previo de [40] y ha sido propuesto por [41]. Para este caso, la profundidad de carbonatación fue en aumento con el esfuerzo a compresión de las probetas cuando éste se ubicó entre 0,20 y 0,70. Para un rango entre 0 y 0,20, la profundidad de carbonatación disminuyó linealmente. Por esta razón, el coeficiente K_f se definió con respecto a ambos rangos de S_c .

$$K_f = \begin{cases} -0,776S_c + 1,009 & S_c \in [0,0,2] \\ 2,000S_c + 0,470 & S_c \in [0,2;0,7] \end{cases} \quad (15)$$

La ecuación (15) se planteó en el contexto del modelo predictivo de [40] descrito en la ecuación (16):

$$e(t) = \left[\frac{K_f K_{CO2} K_{ld} K_{ks} T^{0,25} RH^{1,5}}{(1 - RH) \left(\frac{230}{f_{cu}^{RC}} + 2,5 \right)} \right] \sqrt{t} \quad (16)$$

Donde, K_{CO2} es el coeficiente de concentración, K_{ld} es coeficiente de posición, K_{ks} es coeficiente de esfuerzo de trabajo, T es la temperatura ambiental en °C, RH es la humedad relativa, f_{cu}^{RC} es el valor medio de resistencia a la compresión y t el tiempo de carbonatación.

AVANCES MÁS RECIENTES DE MODELOS PREDICTIVOS BASADOS EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En los últimos años, se ha incrementado el desarrollo de técnicas de predicción de carbonatación de HAR basadas en métodos numéricos, programación e inteligencia artificial (IA).

En [42], se utilizó la programación de tipo “*artificial bee colony*” como una alternativa a la técnica de regresión automática. Los autores encontraron que esta alternativa pudo predecir la profundidad de carbonatación del HAR con un error cuadrático medio de 3,33 mm. Esta aproximación se considera bastante cercana al compararla con otros modelos predictivos, incluso con mayor cantidad de muestras para su validación. No obstante, hay variables propias del conjunto de datos evaluados que trascienden al modelo.

Otra de las alternativas de programación es la técnica híbrida entre “*artificial neural networks*” (ANN) y algoritmos de “*swarm intelligence*” [43] en la que el concepto de IA es inherente debido al “*machine learning*” utilizado en la estimación. Este modelo presenta mayor expectativa que los modelos de programación básica, ya que promete una mayor precisión si se consideran las variables de entrada más adecuadas. Para este caso, se utilizaron nueve características del HAR, entre las

cuales se destacó el contenido de cemento como el factor más determinante. Factores propios del AR, como la absorción de agua y la tasa de reemplazo, presentaron un efecto relativamente bajo. Una propuesta similar, presentada por [44] destaca el modelo “*particle swarm optimization*” utilizando el software MATLAB. Los autores encontraron que para un 50% de reemplazo de AN por AR, existe una correlación entre el aumento de la carbonatación y la caída de la resistencia a la compresión. Si bien esta correlación cualitativa es válida, el margen de error para la calibración de estos modelos parece aún demasiado significativo.

Por otra parte, [45] propusieron un modelo de “*gradient boosting regression tree*” (GBRT) para estimar la profundidad de carbonatación del HAR que incluía distintos materiales cementíceos suplementarios (MCS). Para validar dicho modelo se recopilaban 713 registros de datos experimentales y demostraron que, al comparar con la mayoría de modelos disponibles, la confiabilidad del método GBRT fue mayor. Incluso, la presencia de MCS no fue el factor más determinante, sino, la relación agua/cementante y la resistencia a la compresión. Sin embargo, se advirtió sobre la escasez de estudios de HAR con MCS, con el fin de tener un criterio basado en una mayor cantidad de datos. Los modelos predictivos en general presentan gran potencial, pero se ven limitados aún por la dificultosa minería de datos (*data mining*).

Otro estudio, con gran cantidad de muestras (827) para validación y combinación de dos técnicas fue el desarrollado por [46]. Estos autores combinaron las ANN y la técnica de “*genetic programming*” para predecir la velocidad de carbonatación, en función de condicionantes estadísticamente significativos. Los autores destacaron la capacidad de este modelo para lidiar con la influencia no lineal de la humedad relativa en la carbonatación del HAR.

Las principales limitaciones de los modelos basados en IA están relacionadas con el conjunto de datos para los cuales son entrenados. En general, cada modelo ha sido entrenado con datos de hormigones locales, considerando condiciones locales de exposición (o aceleradas de acuerdo a la norma nacional correspondiente). Cuando estos modelos son aplicados a nuevos conjuntos de datos, presentan alienaciones que se reflejan en los resultados

predichos. Es necesario construir bases de datos masivas mediante mayores esfuerzos con *data mining* para el entrenamiento de IA que genere herramientas adaptativas a una amplia gama de aplicaciones. Esto no está limitado a la carbonatación de HAR, pero es un aspecto que aún dificulta el éxito en la aplicación de IA en muchas áreas de la ingeniería.

RECARBONATACIÓN COMO APORTE CUANTITATIVO AL IMPACTO AMBIENTAL DEL HORMIGÓN

El reemplazo de AN por AR conduce a la disminución del impacto ambiental del hormigón a través de la preservación de recursos naturales y la minimización de la disposición de residuos. Otro potencial aporte es la recarbonatación del hormigón, que se acelera con la trituración del hormigón de desecho al exponerse mayor superficie específica al medio. En la actualidad se plantea el reto de dimensionar esta disminución a través de una metodología que involucre todo el ciclo de vida del material [47], y esta metodología bien debe incluir la contribución de la recarbonatación.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología para valoración ambiental descrita en ISO, 14040 [48], que permitiría la consideración de la recarbonatación respecto al parámetro “potencial de calentamiento global”. El método consta de cuatro pasos: 1. Definición de objetivos y alcance. 2. Creación del inventario de ciclo de vida (LCI). 3. Evaluación de los impactos ambientales (LCIA). 4. Interpretación de los resultados. En el primer paso, se debe prestar especial atención a la elección de la unidad funcional y en el caso del hormigón analizar sus aspectos funcionales. Principalmente: trabajabilidad, resistencia y durabilidad [49]. En el segundo paso, se deben seguir reglas de asignación para reciclaje y la forma como se realiza. Para evaluar el LCIA en el tercer paso, se debe tomar como base métodos enfocados en los problemas ambientales que se generan. El cuarto paso extrae las conclusiones del proceso, limitaciones y recomendaciones.

El CO₂ está presente en todos los pasos del análisis ACV. En la fase de diseño por durabilidad, la consecución de materias primas, el posible tratamiento previo de agregados, el desempeño durante la etapa de servicio y los problemas ambientales derivados de corrosión del acero. También en los beneficios

ambientales si hay absorción de emisiones por parte del material.

El papel de la carbonatación en la sustentabilidad del HAR puede analizarse desde dos enfoques: 1) Resistencia a la carbonatación y 2) Absorción y secuestro de CO₂. En el primer enfoque, la carbonatación del HAR armado puede disminuir la expectativa de vida útil debido a la corrosión potencial del acero de refuerzo. En el segundo, la absorción y secuestro de CO₂ por parte del HAR no armado puede contribuir en conjunto con el reciclaje a la reducción de emisiones de GEIs en su etapa de servicio. En ambos enfoques la velocidad de carbonatación juega un papel fundamental a través del coeficiente k_c . En el enfoque de absorción además importa el concepto de grado de carbonatación, el cual se define como la tasa de CO₂ incorporado que reacciona (CO₂ en la zona carbonatada) en relación al máximo posible. Este máximo se deriva del CaO que contiene el cemento utilizado, alrededor del 65% según el tipo de cemento [2], [50].

Leemann [51] resalta la importancia de realizar el ACV basado la determinación de la absorción de CO₂ a través del coeficiente de carbonatación, k_c . Este parámetro es determinante durante la vida útil del hormigón teniendo en cuenta las condiciones de exposición de las estructuras. El k_c también debe tenerse en cuenta en las fases de demolición y reciclaje para finalmente evaluar el impacto de la producción de cemento en la concentración de CO₂ atmosférico. Leeman destaca la aproximación prácticamente lineal existente entre k_c y la relación agua/CaO disponible para carbonatación. Sin embargo, no hay una relación directa entre k_c y grado de carbonatación [50].

Pade y Guimaraes [2] evaluaron la viabilidad del HAR como material que maximiza la absorción de CO₂. Para estos autores, entre el 58% y 86% del hormigón producido en tres países nórdicos será carbonatado después de 100 años dependiendo de las condiciones locales, 70 de ellos en servicio y 30 en segundo uso. La razón para estos altos porcentajes se debe al impacto positivo que generan la trituración y el reciclaje del hormigón de desecho en estos países. En Dinamarca se esperan los mejores resultados debido a su tasa de demolición del 90% desde 2007. Estos cálculos son algo optimistas ya que consideran una capacidad de fijación de

CO₂ total del hormigón, es decir, el total de CaO en el hormigón reacciona para transformarse en carbonato de calcio. Sin embargo, los resultados deben ser aún corregidos de acuerdo al grado de carbonatación supuesto.

Kikuchi y Kuroda [52] también determinaron que la trituración posterior a la demolición aumenta la cantidad de CO₂ absorbido significativamente. También [53] mostraron que la absorción de CO₂ está directamente relacionada con el área superficial de hormigón expuesta a CO₂, lo que implica las ventajas de la trituración del hormigón de desecho. Otros parámetros importantes son el tipo de cemento y la resistencia del hormigón. En relación a ello, en [3] se verificó que la cantidad de CO₂ absorbido aumenta con el contenido de CaO disponible, lo que es predecible debido a que el principal agente de captura es la portlandita. Esto es importante en el caso de cementos adicionados, donde la reacción puzolánica hace disminuir el contenido de portlandita libre [50]. El efecto neto de los materiales cementíceos suplementarios es sin embargo siempre positivo. Para predecir el grado de carbonatación se debe tener en cuenta el tipo de cemento, cantidad y proporción de CaO. Para cementos con filler calizo, la distinción entre material carbonatable (CaO en forma de portlandita) y no carbonatable es aún más definitoria [54].

DISCUSIÓN

La revisión del estado del arte evidencia, en general, una mayor velocidad de carbonatación en el HAR que en un hormigón con agregado natural. Desde el enfoque armado, esto es negativo para la durabilidad. Al mismo tiempo, desde el enfoque no armado, el HAR puede tener mayor velocidad de absorción de CO₂, lo que favorecería a una reducción de emisiones totales en el ACV. Lo anterior supone mayor aprovechamiento de las características del material en elementos no armados o estructurales con tecnologías de refuerzo a tracción distintas al acero. Con todo, su utilización en hormigón armado no puede descartarse si se verifican riesgos bajos de corrosión en función de bajo acceso de humedad. El mantenimiento de la solución de poro por medio de la reserva alcalina que proveen los AR debe determinarse. De cualquier modo, la capacidad de secuestro de CO₂ en el tiempo es una propiedad inherente al material, que depende tanto de la difusión como de la reactividad químicas.

La modelización de la carbonatación de HAR con características propias como variables, puede aportar fiabilidad a la estimación de vida útil de estructuras de hormigón armado sometidas a carbonatación. Los modelos predictivos actuales consideran a la relación agua/cementante y el contenido de agregado reciclado como principales parámetros. Pero estos pueden resultar insuficientes para describir al hormigón. En lugar de introducir las propiedades y contenidos de constituyentes, los modelos pueden basarse en propiedades del hormigón endurecido. En ese caso también se considerarían otros posibles factores incidentes como la compactación y el curado. Algunas propiedades de transporte presentan una mejor correlación con k_c , como permeabilidad al oxígeno y absorción capilar. Resulta interesante ahondar en las posibilidades de estos índices de durabilidad para predecir la carbonatación del HAR mediante modelos adaptados. En todo caso, los modelos deben validarse midiendo directamente la velocidad de carbonatación del hormigón en cuestión.

En cuanto a los avances más recientes de los modelos, es importante seguir avanzando en la calibración de los mismos para aumentar su confiabilidad. Los algoritmos y los métodos basados en IA configuran una ventaja en la actual década para este fin, pero existen aún grandes limitaciones para el *data mining*. En principio, es posible llegar a reducir el error hasta niveles mucho menores a los obtenidos hasta hace unos pocos años. Esto debido a las nuevas posibilidades desde el punto de vista matemático. Sin embargo, es necesario tener siempre en cuenta la heterogeneidad del hormigón como material, y más si incluye agregados reciclados. Las propiedades físicas y químicas de los constituyentes juegan un rol fundamental en esta heterogeneidad, que a su vez, puede ampliarse entre distintas regiones y países. Posiblemente la mayor limitación de todas es el hecho que el volumen de datos es producido en un 99% mediante ensayos de laboratorio. La limitación de datos de campo de carbonatación de HAR hace que los modelos se vean viciados al momento de aplicarlos a estructuras reales. En cualquier caso, la escogencia de las variables más influyentes es determinante en cada modelo. La misma recomendación de verificar correlaciones por desempeño, sugerida para modelos tradicionales, puede aplicarse entonces para los modelos más recientes basados en IA.

Con respecto al ACV del HAR, se sugieren las siguientes consideraciones a tener en cuenta:

- * En la fase de diseño del HAR, la mezcla propuesta no debe incrementar el contenido de cemento (ya que este es el principal contribuyente a la huella de carbono del hormigón). El aprovechamiento de residuos está relacionado con el máximo contenido posible de AR y AFR como componentes del hormigón nuevo, siempre y cuando no se incremente el contenido de cemento ni disminuya la durabilidad de la estructura.
- * También los tratamientos previos de los agregados para mejorar sus propiedades deben procurar evitar el aumento neto de la huella de carbono.
- * La vida útil de una estructura de HAR está determinada por el cumplimiento de las prestaciones de diseño, evaluadas a partir de propiedades resistentes y durables. Pero resulta conveniente además, considerar los procesos al fin de vida del hormigón, ya que la captura de CO₂ se ve acelerada con el aumento de la superficie específica y por lo tanto constituye una contribución no despreciable.
- * Por último, resulta conveniente considerar la sustentabilidad con un enfoque holístico de todos los sistemas que componen la estructura y no solo enfocarse en la huella de carbono.

El ACV del HAR permite evidenciar la concordancia de las estrategias planteadas y su efectividad para reducir pasivos ambientales. La reabsorción y secuestro de CO₂ por parte del HAR son aspectos sobre los cuales no se tiene aún suficiente conocimiento respecto a sus alcances reales. Ya que este análisis tiene un papel fundamental para el cómputo neto de emisiones, es importante avanzar con investigaciones al respecto. Existe variabilidad en los resultados que otorgan distintas metodologías para cuantificar el grado de carbonatación del hormigón. Investigaciones recientes han procurado una estandarización a nivel mundial para establecer puntos de comparación de resultados [55]. No se ha establecido la influencia de HAR con dos o más reutilizaciones en el parámetro, por lo cual hay un largo camino por recorrer en este aspecto.

CONCLUSIONES

Los modelos predictivos de carbonatación de HAR son necesarios para la estimación de vida útil de las estructuras. Modelos establecidos a partir de características de la mezcla o componentes tienen en

cuenta gran cantidad de variables, lo que puede ser una limitante para su aplicación global. La estimación por desempeño a través de ensayos acelerados de carbonatación extrapolables a carbonatación natural y la medición de propiedades de transporte relacionadas puede contribuir a la fiabilidad y reducción del número de variables, pero debe avanzarse aún hacia un consenso sobre los parámetros de ensayo. La modelización predictiva basada en IA es un paso importante para dicha aumentar dicha fiabilidad. Sin embargo, las recomendaciones que se mencionan en este trabajo en cuanto a la estimación por desempeño, es aplicable tanto para los modelos matemáticos tradicionales como para los modelos tipo “*machine learning*” de tendencia actual. Las herramientas de IA ven aún grandes limitaciones en su confiabilidad debido al escaso desarrollo del *data mining*, sobretodo en cuanto a HAR en estructuras reales.

Desde el enfoque para durabilidad del hormigón armado, se procura reducir al máximo la velocidad de carbonatación a través del parámetro coeficiente de carbonatación. Desde el enfoque eco-eficiente, en hormigón no armado es deseable una mayor capacidad y velocidad de captura de CO₂. En este sentido, la cuantificación confiable requiere mayores conocimientos acerca del grado de carbonatación. Ninguno de los dos enfoques es necesariamente absoluto, por lo que debe abordarse la carbonatación del hormigón de manera holística a largo plazo y considerando el abanico diverso de tipos de estructuras de hormigón.

Para el caso del HAR, la importancia de determinar los parámetros de carbonatación tiene un carácter singular, debido a la naturaleza porosa del material y su potencial reserva alcalina. La potencialidad de los AR no ha sido aún explorada en suficiente profundidad, y esta información es necesaria para fomentar el desarrollo sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica de la República Argentina a través del PICT-2017 0091.

REFERENCIAS

- [1] L.P. Traversa y Y.A. Villagrán-Zaccardi, “Introducción a la durabilidad y patología

- de las estructuras de hormigón armado”, en IX Jornada “Técnicas de restauración y conservación del patrimonio”. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICPBA), La Plata, Argentina, pp. 1-20, 2010. [En línea]. Disponible: <http://digital.cic.gba.gov.ar/handle/11746/428>
- [2] C. Pade y M. Guimaraes, “The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective,” *Cem. Concr. Res.*, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.009.
- [3] I. Galan, C. Andrade, P. Mora, and M.A. Sanjuan, “Sequestration of CO₂ by concrete carbonation,” *Environ. Sci. Technol.*, 2010, doi: 10.1021/es903581d.
- [4] A. Albuquerque, J. Pacheco, and J. de Brito, “Reliability-based recommendations for EN1992 carbonation cover design of concrete with coarse recycled concrete aggregates,” *Struct. Concr.*, vol. 23, no. 3, pp. 1873-1889, Jun. 2022, doi: 10.1002/suco.202100406.
- [5] C. Pico-Cortés and Y. Villagrán-Zaccardi, “Unraveling the Interplay of Physical-Chemical Factors Impacting the Carbonation Performance of Recycled Aggregate Concrete,” *Materials*, vol. 16, no. 16. 2023. doi: 10.3390/ma16165692.
- [6] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, P. Alaejos, and M. Sánchez De Juan, “Durability of recycled aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.
- [7] R.V. Silva, R. Neves, J. De Brito, and R.K. Dhir, “Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.017.
- [8] A. Leemann and R. Loser, “Carbonation resistance of recycled aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.162.
- [9] R. Kurda, J. De Brito, and J.D. Silvestre, “Carbonation of concrete made with high amount of fly ash and recycled concrete aggregates for utilization of CO₂,” *J. CO₂ Util.*, 2019, doi: 10.1016/j.jcou.2018.11.004.
- [10] D. Xuan, B. Zhan, and C.S. Poon, “Durability of recycled aggregate concrete prepared with carbonated recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.09.015.
- [11] C.J. Zega and Á.A. Di Maio, “Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements,” *Waste Manag.*, 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.06.011.
- [12] C.J. Zega, Á.A. di Maio, and R.L. Zerbino, “Influence of natural coarse aggregate type on the transport properties of recycled concrete,” *J. Mater. Civ. Eng.*, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000910.
- [13] C.J. Zega, J.M. Etcheverry, and Y.A. Villagrán-Zaccardi, “Natural Carbonation of Multiply Recycled Aggregate Concrete,” in *Proceedings of the International Workshop CO₂ Storage in Concrete CO2STO2019*, A. Djerbi, O. Omikrine-Metalssi, and T. Fen-Chong, Eds., 2019, pp. 109-115.
- [14] N. Otsuki, S.I. Miyazato, and W. Yodsudjai, “Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete,” *J. Mater. Civ. Eng.*, 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(443).
- [15] J. Xiao, D. Lu, and J. Ying, “Durability of recycled aggregate concrete: An overview,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2013, doi: 10.3151/jact.11.347.
- [16] D.W.S. Ho and R.K. Lewis, “Carbonation of concrete and its prediction,” *Cem. Concr. Res.*, 1987, doi: 10.1016/0008-8846(87)90012-3.
- [17] L.J. Parrott and D.C. Killoh, “Carbonation in a 36 year old, in-situ concrete,” *Cem. Concr. Res.*, 1989, doi: 10.1016/0008-8846(89)90017-3.
- [18] R. Neves, F.A. Branco, and J. De Brito, “A method for the use of accelerated carbonation tests in durability design,” *Constr. Build. Mater.*, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.028.
- [19] V.G. Papadakis, C.G. Vayenas, and M.N. Fardis, “Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation,” *ACI Mater. J.*, 1991, doi: 10.14359/1863.
- [20] R.V. Silva, A. Silva, R. Neves, and J. de Brito, “Statistical modeling of carbonation in concrete incorporating recycled aggregates,” *J. Mater. Civ. Eng.*, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001366.
- [21] S.C. Kou and C.S. Poon, “Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash,” *Cem.*

- Concr. Compos.*, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011.
- [22] J.Z. Xiao and B. Lei, "Carbonation model and structural durability design for recycled concrete," *J. Archit. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 3, pp. 66-72, 2008.
- [23] K. Zhang and J. Xiao, "Prediction model of carbonation depth for recycled aggregate concrete," *Cem. Concr. Compos.*, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.01.013.
- [24] I. Galán, "Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH", Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2011. [Disponible]. En línea: <https://docta.ucm.es/entities/publication/12ced745-3a8c-4b39-b6d2-6b4b8c1020d8>
- [25] I.F. Sáez del Bosque, P. Van den Heede, N. De Belie, M.I. Sánchez de Rojas, and C. Medina, "Carbonation of concrete with construction and demolition waste based recycled aggregates and cement with recycled content," *Constr. Build. Mater.*, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117336.
- [26] Y. Chen, P. Liu, and Z. Yu, "Effects of environmental factors on concrete carbonation depth and compressive strength," *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 2167, pp. 1-11, 2018, doi: 10.3390/ma11112167.
- [27] A.M. Dunster, *Accelerated carbonation testing of concrete*, Bracknell, UK: Building Research Establishment, 2000.
- [28] M. Castellote, L. Fernandez, C. Andrade, and C. Alonso, "Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations," *Mater. Struct. Constr.*, 2009, doi: 10.1617/s11527-008-9399-1.
- [29] K. Tuutti, Corrosion of steel in concrete, Tesis Doctoral, University Dum Stockholm, Swedish, 1982.
- [30] V.G. Papadakis, C.G. Vayenas, and M.N. Fardis, "Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem," *Chem. Eng. Sci.*, 1991, doi: 10.1016/0009-2509(91)85060-B.
- [31] S. Nagataki, M.A. Mansur, and H. Ohga, "Carbonation of Mortar in Relation to Ferrocement Construction," *ACI Mater. J.*, 1988, doi: 10.14359/2475.
- [32] P.K.M. Mehta and P.J.M. Monteiro, *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- [33] E. Possan, J.J.O. Andrade, D.C.C. Dal Molin, and J.L.D. Ribeiro, "Model to Estimate Concrete Carbonation Depth and Service Life Prediction," in *Hygrothermal Behaviour and Building Pathologies*, J. Delgado ed., vol. 14, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-50998-9_4.
- [34] E.I. Moreno, "Carbonation coefficients from concrete made with high-absorption limestone aggregate," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2013, doi: 10.1155/2013/734031.
- [35] P. Van Den Heede and N. De Belie, "A service life based global warming potential for high-volume fly ash concrete exposed to carbonation," *Constr. Build. Mater.*, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.033.
- [36] F. Faleschini, M.A. Zanini, and L. Hofer, "Reliability-based analysis of recycled aggregate concrete under carbonation," *Adv. Civ. Eng.*, 2018, doi: 10.1155/2018/4742372.
- [37] I. Monteiro, F.A. Branco, J. De Brito, and R. Neves, "Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures," *Constr. Build. Mater.*, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.028.
- [38] P. Schiessl, S. Helland, C. Gehlen, L.O. Nilsson, and S. Rostam, fib bulletin 34 - Model code for service life design (MC-SLD). 2005.
- [39] J. Tang, J. Wu, Z. Zou, A. Yue, and A. Mueller, "Influence of axial loading and carbonation age on the carbonation resistance of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.269.
- [40] J.Z. Xiao, "Recycled Concrete," China Build. Ind. Press (in Chinese), pp. 87-94, 2008.
- [41] Z. Zou and G. Yang, "A model of carbonation depth of recycled coarse aggregate concrete under axial compressive stress," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 11, pp. 5196-5203, Aug. 2022, doi: 10.1080/19648189.2021.1886178.
- [42] S.A. Moghaddas, M. Nekoei, E. Mohammadi Golafshani, M. Nehdi, and M. Arashpour, "Modeling carbonation depth of recycled aggregate concrete using novel automatic regression technique," *J. Clean. Prod.*, vol. 371, p. 133522, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133522.

- [43] K. Liu, M.S. Alam, J. Zhu, J. Zheng, and L. Chi, "Prediction of carbonation depth for recycled aggregate concrete using ANN hybridized with swarm intelligence algorithms," *Constr. Build. Mater.*, vol. 301, p. 124382, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124382.
- [44] L.M. Agustin and D.L. Silva, "Hybrid Neuro-Particle Swarm Model For Carbonation Depth Forecasting In Recycled Aggregate Concrete," in *2023 6th International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD)*, 2023, pp. 492-500. doi: 10.1109/ICAIBD57115.2023.10206192.
- [45] I. Nunez and M.L. Nehdi, "Machine learning prediction of carbonation depth in recycled aggregate concrete incorporating SCMs," *Constr. Build. Mater.*, vol. 287, p. 123027, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123027.
- [46] S. N. Londhe, P.S. Kulkarni, P.R. Dixit, A. Silva, R. Neves, and J. de Brito, "Predicting carbonation coefficient using Artificial neural networks and genetic programming," *J. Build. Eng.*, vol. 39, p. 102258, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102258.
- [47] S.B. Marinković, M. Malešev, and I. Ignjatović, "Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates," in *Eco-Efficient Construction and Building Materials*, F. Pacheco-Torgal, L. F. Cabeza, J. Labrincha and A. de Magalhães, Eds., 2013, doi: 10.1533/9780857097729.2.239.
- [48] *An international standard for disclosure of clinical trial information*, SO 14040: 2006, TheInternational Standards Organisation, 2006, doi: 10.1136/bmj.332.7550.1107.
- [49] P. Van Den Heede and N. De Belie, "Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations," *Cem. Concr. Compos.*, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004.
- [50] C. Andrade, "Evaluation of the degree of carbonation of concretes in three environments," *Constr. Build. Mater.*, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116804.
- [51] A. Leemann, "CO₂ adsorption of concrete based on the boundary conditions of Switzerland," in *Proceedings of the International Workshop CO₂ Storage in Concrete CO₂STO2019*, 2019, pp. 27-38.
- [52] T. Kikuchi and Y. Kuroda, "Carbon dioxide uptake in demolished and crushed concrete," *J. Adv. Concr. Technol.*, 2011, doi: 10.3151/jact.9.115.
- [53] E. Possan, E.F. Felix, and W.A. Thomaz, "CO₂ uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures," *J. Build. Pathol. Rehabil.*, 2016, doi: 10.1007/s41024-016-0010-9.
- [54] S.-J. Kwon and X.-Y. Wang, "CO₂ uptake model of limestone-powder-blended concrete due to carbonation," *J. Build. Eng.*, vol. 38, p. 102176, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102176.
- [55] F. Xi *et al.*, "Substantial global carbon uptake by cement carbonation," *Nat. Geosci.*, 2016, doi: 10.1038/ngeo2840.