

## Evaluación de la carbonatación como agente reductor de la durabilidad en estructuras de hormigón armado en la ciudad de Encarnación

Luz González Coronel <sup>a</sup>; Santiago Fleitas <sup>b</sup>; Pablo Benítez <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay. [luz.gonzalez@fiuni.edu.py](mailto:luz.gonzalez@fiuni.edu.py)

<sup>b</sup> Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay. [santiago.fleitas@fiuni.edu.py](mailto:santiago.fleitas@fiuni.edu.py)

<sup>c</sup> Universidad Nacional de Itapúa. Encarnación, Paraguay. [pablo.benitez@fiuni.edu.py](mailto:pablo.benitez@fiuni.edu.py)

### Resumen

La ciudad de Encarnación, Paraguay, ha experimentado un notable crecimiento en la construcción tras las obras de compensación de Yacyretá, impulsando el uso del hormigón armado por su alta resistencia al agua, facilidad de moldeo, bajo costo, resistencia al fuego y disponibilidad local de sus componentes. El hormigón armado es susceptible a la carbonatación, un fenómeno que afecta su durabilidad, ya que es un proceso de degradación que disminuye el pH, favoreciendo la corrosión de las armaduras y comprometiendo la integridad estructural. Como en la ciudad de Encarnación no se cuenta con una base de datos que represente la afectación por carbonatación, este trabajo, se encargó de evaluar la carbonatación en 59 elementos estructurales categorizados en losas, vigas y columnas. Se realizaron ensayos de fenolftaleína para medir la profundidad de carbonatación, analizando la capa protectora, temperatura, humedad, y concentración de CO<sub>2</sub>. Las estructuras más antiguas mostraron mayores niveles de carbonatación, sin embargo, también se encontraron casos significativos en estructuras jóvenes. Conocer el nivel de degradación por carbonatación permitirá programar las tareas de mantenimiento preventivo que garanticen la preservación de las estructuras.

**Palabras clave:** carbonatación, durabilidad, hormigón armado.

### Abstract

The city of Encarnación, Paraguay, has experienced remarkable growth in construction following the compensation works of Yacyretá, promoting the use of reinforced concrete due to its high water resistance, ease of molding, low cost, fire resistance, and the local availability of its components. Reinforced concrete is susceptible to carbonation, a phenomenon that affects its durability, as it is a degradation process that decreases the pH, favoring the corrosion of the reinforcement and compromising structural integrity. Since the city of Encarnación does not have a database representing the effects of carbonation, this study focused on evaluating carbonation in 59 structural elements categorized as slabs, beams, and columns. Phenolphthalein tests were carried out to measure carbonation depth, analyzing the protective layer, temperature, humidity, and CO<sub>2</sub> concentration. The oldest structures showed higher levels of carbonation; however, significant cases were also found in newer structures. Knowing the degree of degradation caused by carbonation will make it possible to schedule preventive maintenance tasks that ensure the preservation of the structures.

**Keywords:** carbonation, durability, reinforced concrete.

## 1. Introducción

La carbonatación es una anomalía que afecta las estructuras de hormigón, comprometiendo su durabilidad mediante una reacción ácida. Este fenómeno ocurre cuando el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera, junto con la humedad, penetra en la estructura porosa del hormigón. El  $\text{CO}_2$  se disuelve en los poros y reacciona con la cal libre y otros compuestos cálcicos del cemento, disminuyendo el pH a valores menores que 9, generando así un ambiente ácido que elimina la protección pasiva de las armaduras de acero, acelerando su corrosión.

El hormigón, puede presentar diversas anomalías, siendo la carbonatación una de las más destacadas debido a su incidencia en la corrosión del refuerzo y sus consecuencias para la seguridad estructural. La prevención es clave, asegurando recubrimientos mínimos adecuados, seguido por el mantenimiento y, en casos extremos, la reparación completa de las estructuras, lo cual es costoso y requiere equipos especializados.

Las estadísticas europeas indican que la fase de proyecto es responsable del 35% al 45% de los problemas en construcción [1]. Con relación a eso, Rostman ha introducido la llamada “Ley de los Cincos” [2], donde dice que un dólar gastado en fase de diseño y construcción elimina costos de 5 dólares en mantenimiento preventivo, 25 en labores de reparación y 125 dólares en rehabilitación.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Estudiar el efecto de la carbonatación como mecanismo de degradación en estructuras de hormigón armado, en la ciudad de Encarnación, Paraguay.

### 2.2. Objetivos Específicos

1. Determinar la profundidad media de carbonatación de las estructuras.
2. Describir los principales agentes que intervienen en el avance de la carbonatación en las estructuras.
3. Determinar una tasa de avance de carbonatación promedio para las estructuras.
4. Establecer una base de datos para el conocimiento del comportamiento de la carbonatación en estructuras de hormigón.

## 3. Materiales y Métodos

### 3.1. Materiales

La norma utilizada para los ensayos fue la RILEM CPC-18 [3], donde establece que una solución de fenolftaleína al 1% en alcohol etílico es adecuada para determinar la profundidad de carbonatación. Los elementos utilizados se describen a continuación.

- Solución de Fenolftaleína

Es un indicador de pH ampliamente utilizado en laboratorios y ensayos científicos. Su capacidad para cambiar de color en respuesta a cambios en la acidez o alcalinidad de una solución la hace especialmente valiosa para determinar los niveles de pH. En disoluciones ácidas, la fenolftaleína permanece incolora, mientras que en disoluciones básicas adquiere un tono púrpura distintivo. En la Fig.1. se observa la aplicación de la solución.



Fig. 1. Solución de fenolftaleína.

- Taladro

Se utilizó un taladro eléctrico, con una broca de 16 mm, adecuada para crear orificios circulares en las estructuras de concreto.

- Calibre o Pie de Rey

Se utilizó para medir las profundidades de perforación, revoque y carbonatación de las diversas estructuras estudiadas. La varilla de profundidad del calibre se debe alinear paralelamente con el agujero para evitar la adición de milímetros a la medida.



Fig. 2. Medición de la profundidad con un calibre.

- Cemento Expansivo

Para tapar las perforaciones realizadas durante los ensayos, se utilizó el cemento expansivo SikaGrout 340. Este es un mortero cementoso de altas prestaciones, ideal para el relleno de huecos y anclajes. La mezcla se preparó con una proporción mínima de agua, agregando lentamente el polvo al agua mientras se agitaba.

### 3.2. Ensayo de Pachometría

Se utilizó el pacómetro para identificar las armaduras en las estructuras. El procedimiento consistió en colocar la sonda del pacómetro sobre la superficie del hormigón, variando su dirección y marcando los lugares donde no se detectaron metales. El dispositivo emite una señal visual donde una luz roja indica presencia de metal y la luz verde confirma la ausencia del mismo. Esto lo convierte en una herramienta no invasiva.

### 3.2. Ensayo de Fenolftaleína

Se siguieron los siguientes pasos:

- Se preparó una solución con 95% de alcohol y polvo de fenolftaleína.
- Se seleccionaron los elementos estructurales a perforar.
- Se perforaron las estructuras con un taladro de mecha 16 mm, hasta una profundidad de 4 a 10 cm.
- Se retiró el polvo de los orificios y se aplicó la solución de fenolftaleína mediante un pulverizador sobre el hormigón.
- Se observó la reacción de la fenolftaleína que cambia de color a púrpura en presencia de un pH mayor que 9, indicando zonas no carbonatadas. La parte carbonatada permanece incolora con un pH menor que 9.
- Se midió la profundidad de los orificios en las estructuras con un calibre y se registraron los resultados.



Fig. 3. Ensayo con solución de fenolftaleína.

Este ensayo se puede realizar de dos maneras. La primera, consiste en picar con un cincel, rociar la zona picada con una solución de fenolftaleína, medir dentro del elemento la profundidad de carbonatación, y la segunda consiste en extraer testigos de al menos 2 pulgadas de diámetro, realizar el ensayo de hendimiento y aplicar la solución de fenolftaleína en la zona fracturada. Se optó por la primera, y en lugar de picar se procedió a perforar la estructura.

4. Resultados

Se evaluaron un total de 27 edificios, ubicados en la zona urbana de Encarnación y actualmente ocupados. Siguiendo las consideraciones establecidas por Mejía [4], se llevaron a cabo un total de 59 ensayos de medición de profundidad de carbonatación en las estructuras, distribuidos estratégicamente entre los distintos elementos estructurales, como columnas, vigas y losas.

El 54% de las estructuras ensayadas presentaron carbonatación y el 46% no mostraron ningún avance de carbonatación, ya que dichas estructuras, contaban con la presencia de una capa protectora adecuada y de pintura o enduido que actuaban como barrera contra los agentes carbonatantes. Los edificios considerados tenían edades comprendidas entre 3 a 51 años, por tanto, los niveles de exposición son diferentes. Algunas estructuras presentaban una capa protectora de revoque o revestimiento, que brindan protección contra la humedad y el dióxido de carbono. En la Tabla 1 se resumen las estructuras según su recubrimiento.

Tabla 1. Elementos estructurales con y sin recubrimiento.

| ESTRUCTURA | RECUBRIMIENTO |    | RECUBRIMIENTO % |     |
|------------|---------------|----|-----------------|-----|
|            | Sí            | No | Sí              | No  |
| Columna    | 16            | 8  | 27%             | 14% |
| Viga       | 12            | 9  | 20%             | 15% |
| Losa       | 4             | 10 | 7%              | 17% |
| TOTAL      | 32            | 27 | 54%             | 46% |

Los elementos con mayor porcentaje de recubrimiento fueron las columnas, lo cual es alentador, ya que desempeñan un papel crucial en la resistencia y estabilidad de las estructuras.

La temperatura puede acelerar o ralentizar el proceso de carbonatación. A medida que aumenta la temperatura, la velocidad de la reacción química entre el CO<sub>2</sub> presente en el aire y los componentes alcalinos del hormigón se incrementa. Se utilizaron registros de promedios anuales de temperatura desde el año 2015 hasta el 2023 (Tabla 2), proporcionados por la Oficina de Gestión Ambiental y Salubridad de Encarnación para analizar el posible efecto en la carbonatación.

Tabla 2. Registro de Temperatura de la Estación Meteorológica COE.

| Localidad                                                                                           | Latitud Sur | Longitud Oeste              | Elevación |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------|-----------|
| Encarnación                                                                                         | 27°20'26"   | 55°52'08"                   | 91 m      |
| Año                                                                                                 |             | Promedios de temperatura °C |           |
| 2015                                                                                                |             | 23,0                        |           |
| 2016                                                                                                |             | 22,8                        |           |
| 2017                                                                                                |             | 23,6                        |           |
| 2018                                                                                                |             | 22,9                        |           |
| 2019                                                                                                |             | 23,5                        |           |
| 2020                                                                                                |             | 23,4                        |           |
| 2021                                                                                                |             | 22,6                        |           |
| 2022                                                                                                |             | 22,8                        |           |
| 2023                                                                                                |             | 24,0*                       |           |
| *Promedio de temperatura registrado del año 2023, considerando los primeros 7 meses de ese periodo. |             |                             |           |

Fuente: Dirección de Higiene, Salubridad y Medio Ambiente.

Existe un umbral de temperatura a partir del cual la carbonatación se vuelve perjudicial para las estructuras de hormigón armado, generalmente, temperaturas superiores a los 50°C [5]. Considerando los 8 años de registro, con oscilaciones pequeñas entre 22°C a 24°C, el efecto de la temperatura será mínimo en la mayoría de los casos.

Para la humedad relativa, se obtuvieron registros diarios, mensuales y anuales promedio, proporcionados por la Dirección de Higiene, Salubridad y Medio Ambiente de la ciudad que se tienen en la Tabla 3.

Tabla 3. Registro de Humedad Relativa de la Estación Meteorológica COE.

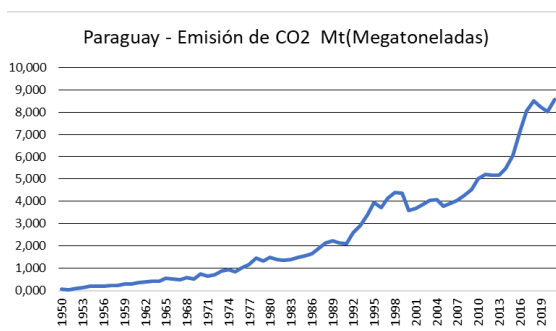
| Localidad   | Latitud Sur            | Longitud Oeste | Elevación |
|-------------|------------------------|----------------|-----------|
| Encarnación | 27°20'26"              | 55°52'08"      | 91 m      |
| Año         | Promedios de humedad % |                |           |
| 2015        | 73,0                   |                |           |
| 2016        | 67,7                   |                |           |
| 2017        | 66,2                   |                |           |
| 2018        | 66,6                   |                |           |
| 2019        | 64,7                   |                |           |
| 2020        | 61,6                   |                |           |
| 2021        | 62,6                   |                |           |
| 2022        | 61,8                   |                |           |
| 2023        | 64,6*                  |                |           |

\*Promedio de humedad registrado del año 2023, considerando los primeros 7 meses de ese periodo

Fuente: Dirección de Higiene, Salubridad y Medio Ambiente.

El mayor porcentaje de humedad relativa corresponde al año 2015 con un 73%, y el menor en el año 2020 con 61,6%. En general, niveles altos de humedad relativa facilitan la difusión del CO<sub>2</sub> en el hormigón, acelerando la carbonatación. La máxima velocidad de carbonatación ocurre en ciclos de humectación y secado, con un grado de saturación moderado (50-60%). Humedades relativas superiores al 80% dificultan la difusión del CO<sub>2</sub>, ya que los poros del hormigón se llenan de agua, limitando la penetración del CO<sub>2</sub> y reduciendo la tasa de carbonatación [6].

Para estimar la concentración de CO<sub>2</sub> se ha recurrido a los datos disponibles sobre las emisiones en Paraguay. Los valores pueden observarse en la Fig. 4.



Fuente: Annual CO<sub>2</sub> emissions– [OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions](https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions)

Fig. 4. Emisión de CO<sub>2</sub> en Paraguay.

En los análisis posteriores, las profundidades de carbonatación se denominarán “X”. Se promediaron los valores entre dos perforaciones, y en casos donde existía una gran diferencia entre ellas, se consideraron tres perforaciones.

Para determinar la velocidad o tasa de carbonatación, se aplicó la fórmula que deriva de la ecuación de difusión de la ley de Fick, la cual establece que la "profundidad" de carbonatación es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. La ley de Fick describe el proceso de difusión, en este caso, de CO<sub>2</sub> en el hormigón, y su relación con la profundidad de carbonatación a lo largo del tiempo.

$$X = k \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

Donde:

X: profundidad de penetración, CO<sub>2</sub> (mm).

k: velocidad de avance (mm/año<sup>1/2</sup>).

t: tiempo (años).

En este caso, se despejó la variable “k” para determinar la velocidad, utilizando la profundidad promedio obtenida de los elementos estructurales.

#### 4.1. Columnas en exteriores

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las mediciones obtenidas en columnas. Se encontró que la mayor profundidad de carbonatación en el ambiente externo se dio en una estructura de 21 años de edad (Fig. 5), alcanzando los 90 mm de profundidad; este valor podría ser resultado de varios factores, como, una mayor exposición a agentes agresivos presentes en la intemperie, capa protectora insuficiente de 10 mm y la humedad relativa ligeramente alta (61 a 73% según registros) en la localidad.



Tabla 4. Profundidad promedio y velocidad de carbonatación de columnas en ambiente externo.

| Elemento Estructural | Edad (años) | X Prof. Prom. (mm) | Velocidad [mm/(año) <sup>0.5</sup> ] |
|----------------------|-------------|--------------------|--------------------------------------|
| Ambiente Externo     |             |                    |                                      |
| Columna 1            | 3           | 64,00              | 36,95                                |
| Columna 2            | 4           | 15,40              | 7,70                                 |
| Columna 3            |             | 4,10               | 2,05                                 |
| Columna 4            | 5           | 22,75              | 10,17                                |
| Columna 5            | 6           | 22,50              | 9,19                                 |
| Columna 6            | 7           | 7,00               | 2,65                                 |
| Columna 7            | 9           | 0,00               | 0,00                                 |
| Columna 8            |             | 5,50               | 1,83                                 |
| Columna 9            |             | 15,80              | 5,27                                 |
| Columna 10           |             | 28,33              | 9,44                                 |
| Columna 11           | 13          | 24,00              | 6,66                                 |
| Columna 12           | 16          | 18,27              | 4,57                                 |
| Columna 13           | 18          | 24,80              | 5,85                                 |
| Columna 14           | 21          | 41,55              | 9,07                                 |
| Columna 15           |             | 90,00              | 19,64                                |
| Columna 16           | 24          | 23,30              | 4,76                                 |
| Columna 17           | 51          | 39,21              | 5,55                                 |

Fuente propia.



Fig. 5. Imagen de la Columna 15.

Por otro lado, se identificó ausencia de carbonatación en una estructura de 9 años, con capa protectora de 10 mm, con enduído, con efecto protector adicional.

Se encontró otra estructura con tan solo 3 años, con alta profundidad de carbonatación de 64 mm, que carecía de capa protectora, presentaba coqueras y fisuras. Una causa posible podría ser que las estructuras más jóvenes suelen tener una mayor proporción de portlanditas, compuesto susceptible a la carbonatación, otro aspecto podría ser la falta de tiempo para que la capa protectora de carbonato de calcio se forme completamente.

En la Fig. 6 se puede observar cómo la profundidad de carbonatación tiende a aumentar a medida que pasan los años de edad de las estructuras. Es consistente con el proceso natural de carbonatación, donde la exposición prolongada a los agentes carbonatantes en el ambiente provoca una penetración más profunda. En cuanto a la velocidad de carbonatación, disminuye con el tiempo, ya que a medida que aumenta la profundidad de carbonatación en el concreto, se forma una capa de carbonato de calcio. Esta capa densa y compacta actúa como una barrera, dificultando la entrada de agentes carbonatantes.

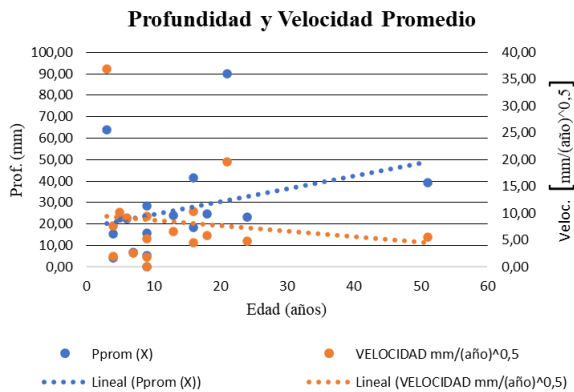


Fig. 6. Profundidad y velocidad de carbonatación en columnas externas.

4.2. Columnas en interiores

La mayor profundidad se registró también en una estructura con 21 años, alcanzando los 71,25 mm. En contraste, se identificó que la menor profundidad de carbonatación se tuvo en una estructura de 7 años de edad, con una profundidad de 10,10 mm. Esto indica una menor exposición a agentes carbonatantes en comparación con las demás columnas. Aun así, la profundidad de 10,10 mm en la Columna 4, dado su tiempo de exposición, podría considerarse alta. Esto podría deberse

a variaciones en la calidad del hormigón o a un bajo recubrimiento (12 mm) en diferentes partes de la estructura, lo que podría influir en la velocidad de carbonatación.

Tabla 5. Profundidad promedio y velocidad de carbonatación de columnas en ambiente interno.

| Elemento Estructural | Edad (Años) | X (Prof. Prom en mm) | Velocidad mm/(año)^0.5 |
|----------------------|-------------|----------------------|------------------------|
| Ambiente Interno     |             |                      |                        |
| Columna 1            | 5           | 23,45                | 10,49                  |
| Columna 2            | 6           | 14,70                | 6,00                   |
| Columna 3            |             | 32,00                | 13,06                  |
| Columna 4            | 7           | 10,10                | 3,82                   |
| Columna 5            | 9           | 39,15                | 13,05                  |
| Columna 6            | 21          | 71,25                | 15,55                  |
| Columna 7            | 28          | 11,40                | 1,98                   |

Fuente propia.

A continuación, se presenta la Fig. 7 que muestra que las líneas siguen la misma tendencia que la Fig. 6.

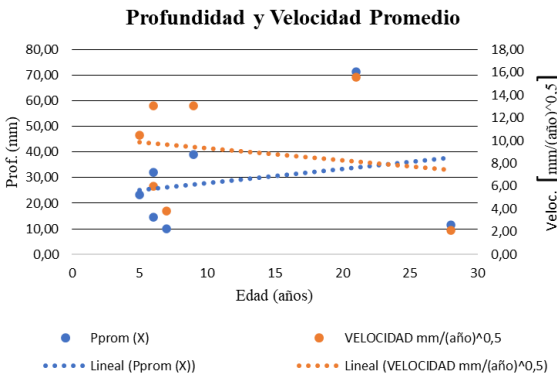


Fig. 7. Profundidad y velocidad de carbonatación en columnas internas.

4.3. Vigas en exteriores

En la Tabla 6 se tienen los resultados de las vigas exteriores. La mayor profundidad de carbonatación se tuvo en la Viga 12, de 28 años, que alcanzó una profundidad de carbonatación de 90 mm. Los posibles factores que podrían haber contribuido, son las condiciones climáticas y la capa protectora de 10 mm de espesor, insuficiente para una protección adecuada.

Tabla 6. Profundidad promedio y velocidad de carbonatación de vigas en ambiente externo.

| Elemento Estructural | Edad (Años) | X (Prof. Prom) | Velocidad mm/(año)^0.5 |
|----------------------|-------------|----------------|------------------------|
| Ambiente Externo     |             |                |                        |
| Viga 1               | 3           | 67,00          | 38,68                  |
| Viga 2               | 4           | 17,35          | 8,68                   |
| Viga 3               |             | 5,70           | 2,85                   |
| Viga 4               |             | 11,55          | 5,78                   |
| Viga 5               | 5           | 14,10          | 6,31                   |
| Viga 6               | 6           | 0,00           | 0,00                   |
| Viga 7               | 7           | 0,00           | 0,00                   |
| Viga 8               | 9           | 40,90          | 13,63                  |
| Viga 9               |             | 15,55          | 5,18                   |
| Viga 10              | 18          | 27,00          | 6,36                   |
| Viga 11              | 24          | 60,45          | 12,34                  |
| Viga 12              | 28          | 90,00          | 17,01                  |
| Viga 13              | 51          | 24,57          | 3,44                   |

Fuente propia.

Se encontró que las vigas de 6 y 7 años de edad no presentaron ninguna carbonatación. No obstante, la mayor velocidad de carbonatación, en comparación con la edad, se dio en una estructura de tan solo 3 años, con una profundidad de 67 mm, siendo la segunda más alta en el análisis. También se encontró una estructura de 51 años que presentó una profundidad de carbonatación de 24,57 mm. La diferencia en la profundidad de carbonatación entre la estructura de 51 años y las demás puede ser atribuida al proceso de curado y calidad del concreto. Durante la construcción de estructuras más antiguas, es posible que se haya utilizado un proceso de curado más eficiente o concretos de mayor calidad.

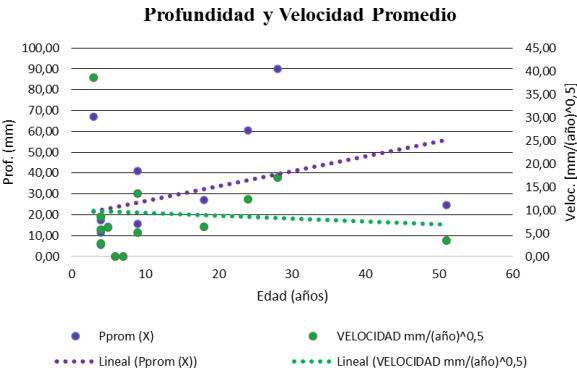


Fig. 8. Profundidad y velocidad de carbonatación en vigas externas.

4.4. Vigas en interiores

Se analizaron ocho vigas de diferentes edades, cuyos valores están en la Tabla 7. Entre ellas, la Viga 8, con 50 años de edad, presenta una profundidad de carbonatación de 9,75 mm, registrando una velocidad de  $1,38 \frac{mm}{año^{0.5}}$  que se podría considerar baja con relación a la edad y con respecto a las demás estructuras. Una velocidad de carbonatación más lenta podría estar influenciada por la edad, podría ser que la carbonatación avanzó en las capas superficiales del hormigón, volviéndolo menos permeable y bajando la velocidad de penetración del CO<sub>2</sub>.

Tabla 7. Profundidad promedio y velocidad de carbonatación de vigas en ambiente interno.

| Elemento Estructural | Edad (Años) | X (Prof. Prom en mm) | Velocidad mm/(año) <sup>0.5</sup> |
|----------------------|-------------|----------------------|-----------------------------------|
| Ambiente Interno     |             |                      |                                   |
| Viga 1               | 4           | 0,00                 | 0,00                              |
| Viga 2               | 5           | 22,20                | 6,38                              |
| Viga 3               | 6           | 5,35                 | 2,18                              |
| Viga 4               | 7           | 25,90                | 9,79                              |
| Viga 5               | 9           | 0,00                 | 0,00                              |
| Viga 6               | 28          | 9,30                 | 1,76                              |
| Viga 7               | 35          | 37,73                | 6,38                              |
| Viga 8               | 50          | 9,75                 | 1,38                              |

Fuente propia.

La Viga 2 (Fig. 9), de 5 años, presentó una profundidad de carbonatación de 22,20 mm, considerable a pesar de su corto tiempo de exposición, lo que podría deberse al nulo recubrimiento o capa protectora.



Fig. 9. Viga 2 con armaduras en espera.

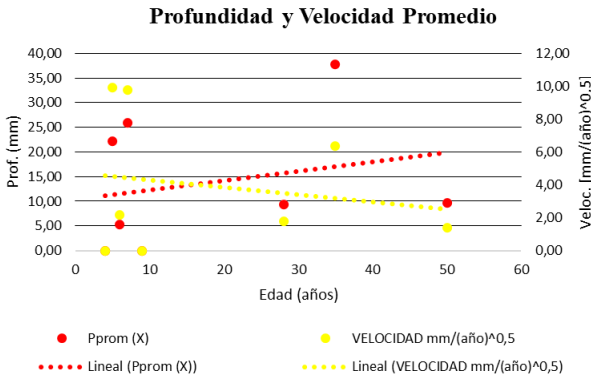


Fig. 10. Profundidad y velocidad de carbonatación en vigas internas.

4.5. Losas en exteriores

En la Tabla 8 se observa que la Losa 7 (Fig. 11) de mayor edad (30 años), presenta la mayor profundidad de carbonatación, con 20,67 mm, con una velocidad de  $3,77 \frac{mm}{año^{0.5}}$ . Sin embargo, la mayor velocidad de carbonatación se presenta en la Losa 2, con  $7,50 \frac{mm}{año^{0.5}}$  con solo 4 años de antigüedad.



Fig.11. Imagen de la Losa 7.

Tabla 8. Profundidad promedio y velocidad de carbonatación de losas en ambiente externo.

| Elemento Estructural | Edad (Años) | X (Prof. Prom en mm) | Velocidad mm/(año) <sup>0.5</sup> |
|----------------------|-------------|----------------------|-----------------------------------|
| Ambiente Externo     |             |                      |                                   |
| Losa 1               | 4           | 6,00                 | 3,00                              |
| Losa 2               |             | 15,00                | 7,50                              |
| Losa 3               | 5           | 6,95                 | 3,11                              |
| Losa 4               | 6           | 0,00                 | 0,00                              |
| Losa 5               | 9           | 13,25                | 4,42                              |
| Losa 6               |             | 13,00                | 4,33                              |
| Losa 7               | 30          | 20,67                | 3,77                              |

Fuente propia.

Ahora bien, entre la Losa 1 y 2, ambas de 4 años, presentaron una notable diferencia



entre la profundidad de carbonatación y la velocidad de las mismas. Probablemente, la Losa 1 (Fig. 12) tiene una capa protectora, mientras que la Losa 2 (Fig. 13) carece de esta protección lo que permite una mayor permeabilidad al dióxido de carbono. Además, la acumulación de agua en la Losa 2, debido a las precipitaciones, junto con las posibles temperaturas elevadas, puede generar ciclos de humectación y secado, lo que aumentaría la tasa de carbonatación y explicaría la diferencia en la velocidad de carbonatación con condiciones climáticas similares.



Fig. 12. Imagen de la Losa 1.



Fig. 13. Imagen de la Losa 2.

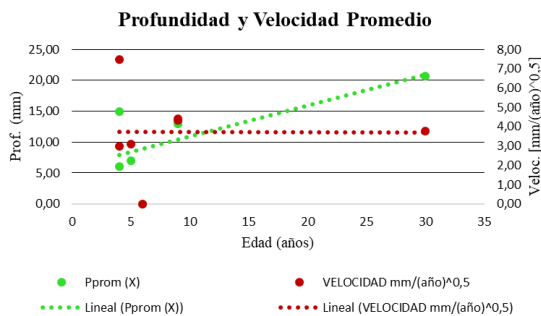


Fig. 14. Profundidad y velocidad de carbonatación en losas externas.

En general, la profundidad de carbonatación aumenta con el paso del tiempo, y en el caso de la velocidad, no varía de manera significativa a lo largo de las diferentes edades de las estructuras.

#### 4.6. Losas en interiores

Tabla 9. Profundidad promedio y velocidad de carbonatación de losas en ambiente interno.

| Elemento Estructural | Edad (Años) | X (Prof. Prom en mm) | Velocidad mm/(año) <sup>0.5</sup> |
|----------------------|-------------|----------------------|-----------------------------------|
| Ambiente Interno     |             |                      |                                   |
| Losa 1               | 4           | 0,00                 | 0,00                              |
| Losa 2               | 7           | 14,95                | 5,65                              |
| Losa 3               |             | 14,10                | 5,33                              |
| Losa 4               |             | 33,00                | 12,47                             |
| Losa 5               | 28          | 0,00                 | 0,00                              |
| Losa 6               | 35          | 48,13                | 8,14                              |
| Losa 7               | 50          | 4,75                 | 0,67                              |

Fuente propia.

En la Tabla 9 se destaca que la Losa 5, de 28 años (Fig. 14), no presentó carbonatación. Esto podría deberse al uso de materiales con propiedades que inhiben la carbonatación, limitación de la exposición a la humedad y el dióxido de carbono, un recubrimiento de 20 mm y pintura que actúan como barrera protectora, y un buen mantenimiento.



Fig. 14. Estructura analizada de 28 años.

La Losa 6 (Fig. 15), con 35 años de edad, se destacó por exhibir la mayor profundidad de carbonatación registrada, de 48,13 mm. La carbonatación avanzó significativamente.



Fig. 15. Imagen de la Losa 6.

Con relación a la profundidad, la línea de tendencia ascendente es coherente con el comportamiento típico del proceso de carbonatación en estructuras de concreto, y los resultados se resumieron en la Fig. 16.

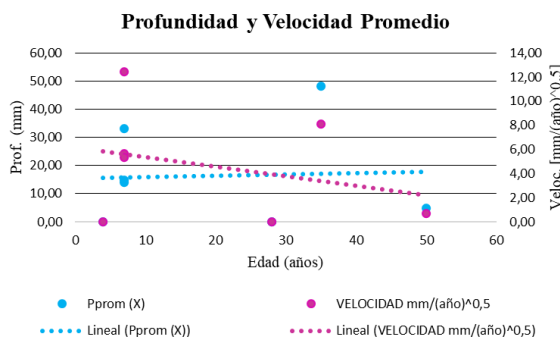


Fig. 16. Profundidad y velocidad de carbonatación en losas en interiores.

#### 4.7. Análisis de la influencia del mantenimiento en estructuras, con relación a la carbonatación.

Se observó un espesor medio de la capa protectora de 6,17 mm y una profundidad media de carbonatación de 21,22 mm. La carbonatación supera el espesor del recubrimiento, exponiendo así las armaduras al riesgo de corrosión.

Se estimó un tiempo promedio de 14 años para la intervención de mantenimiento, donde la carbonatación podría alcanzar las armaduras de refuerzo, poniendo en riesgo la durabilidad estructural.

Es crucial señalar que el período de inicio de

la corrosión depende del espesor del recubrimiento, siendo el mínimo recomendado de 20 mm para prevenir riesgos. La mayoría de los puntos evaluados en las estructuras presentaba un valor de recubrimiento por debajo del mínimo establecido por las normas, lo que indica una alta probabilidad de sufrir corrosión.

Investigaciones como las de Yoon et al. [7] observó que la corrosión ocurre cuando la distancia entre el frente de carbonatación y la superficie de la barra de refuerzo (la profundidad no carbonatada) es menor de 5 mm. Esto sugiere que, al alcanzar 5 mm de carbonatación respecto a la barra de refuerzo, ya existe riesgo. Por tanto, es fundamental planificar adecuadamente las intervenciones de mantenimiento para asegurar la durabilidad de las estructuras.

## 5. Conclusiones

Los resultados, demostraron que las variables consideradas influyen considerablemente en la profundidad de carbonatación, presentándose mayor carbonatación en elementos sin capa protectora y con presencia de humedad.

Los resultados concuerdan con lo establecido en la bibliografía sobre el proceso de carbonatación en el hormigón, y revelan que la profundidad de carbonatación aumenta progresivamente con el paso del tiempo, mientras que la velocidad de este proceso tiende a disminuir.

Aunque el tiempo es un factor crucial en el proceso de carbonatación, no actúa de manera aislada. Las interacciones entre las condiciones ambientales, las características de los materiales y el diseño estructural desempeñan un papel fundamental.

Comprender la importancia del fenómeno de la carbonatación, puede influir en la formulación de estrategias de diseño y mantenimiento más eficaces para preservar la integridad a largo plazo de las estructuras.

Se tuvieron limitaciones en la obtención de permisos para llevar a cabo los ensayos, y la falta de acceso directo a las estructuras y la necesidad de depender de datos disponibles pudieron introducir ciertas incertidumbres en la precisión de los resultados. A pesar de esto, se empleó una rigurosidad metodológica en la selección de estructuras y en la interpretación de los datos.

La concentración de CO<sub>2</sub> es un factor crucial en el proceso de carbonatación, aunque reconocida su importancia y su influencia, se encontró una limitación en la disponibilidad directa de los datos en el territorio de estudio. Sin embargo, se encontró una solución mediante la estimación de la concentración de CO<sub>2</sub> utilizando datos de emisiones y comportamientos históricos de crecimiento.

## 6. Referencias

- [1] J. Calavera. *Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón*, 4ta. ed. Madrid: Intemac, 2000.
- [2] S. Rostman. *Tecnología moderna de durabilidad*, Cuadernos Intemac, 1992.
- [3] CPC-18. *Measurement of hardened concrete carbonation depth*, 1988.
- [4] L. Mejía L. *Inspección y Diagnóstico de Estructuras de Hormigón Armado*. Cantabria: Ediciones UPC, 2010.
- [5] V. G. Papadakis, C. G. Vayenas y M. N. Fardis. "Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem", *Chemical Engineering Science*, vol. 46, issues 5-6, 1991.

[6] J. Broomfield. *Corrosión del acero en el hormigón: comprensión, investigación y reparación*, Madrid: AENOR, 1999.

[7] I. Yoon, O. Copuroglu, K Park. "Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete". *Atmospheric Environment*, vol. 41, issue 34, pp. 7274-7285, noviembre, 2007. -