

EVALUACIÓN DEL AVANCE DE LA CARBONATACIÓN EN CONCRETO BAJO CONDICIONES DE ALTO TRAFICO URBANO: CASO TUNJA, COLOMBIA.

(Assessment of Carbonation Advancement in Concrete under High Urban Traffic Conditions: The Case of Tunja, Colombia)

Angie Tatiana Barrantes Duarte (1), Sara Alejandra Castellanos Castaño (2),
Wilson Alfredo Medina Sierra (3)

- (1) Facultad de Ingeniería Civil, Estudiante del Programa Especialización en Estructuras, Universidad Santo Tomas – Seccional Tunja.
- (2) Facultad de Ingeniería Civil, Estudiante del Programa Especialización en Estructuras, Universidad Santo Tomas – Seccional Tunja.
- (3) Facultad de Ingeniería Civil, Estudiante del Programa Especialización en Estructuras, Universidad Santo Tomas – Seccional Tunja.

Recibido: 15 de julio 2025. Aceptado por:

Resumen—La carbonatación del concreto es un fenómeno progresivo que compromete la durabilidad de las estructuras, especialmente en entornos urbanos expuestos a altos niveles de contaminación vehicular. Este estudio se centró en evaluar el impacto del tráfico sobre el avance de la carbonatación en concreto, mediante la exposición de cilindros en diez puntos estratégicos de la ciudad de Tunja, seleccionados por sus niveles variables de congestión. El objetivo principal fue identificar si las condiciones ambientales urbanas influyen significativamente en la salud del concreto a lo largo del tiempo. Para ello, se desarrolló una metodología en cuatro fases: análisis del tráfico urbano, fabricación de cilindros, exposición por seis meses en campo y evaluación de la profundidad de carbonatación. Los resultados mostraron que, aunque los cilindros presentaron un desempeño estructural dentro de los rangos esperados, la profundidad de carbonatación varió de forma significativa entre zonas. Esto confirmó que el entorno urbano influye directamente en la velocidad de deterioro del concreto. Como conclusión, se logró establecer una zonificación general que identifica las áreas más propensas a este tipo de afectación en Tunja, ofreciendo información útil para futuras decisiones de diseño, mantenimiento y conservación de estructuras en la ciudad.

Palabras clave— Carbonatación, Concreto, Monóxido de Carbono, Tráfico

Abstract—Carbonation in concrete is a progressive phenomenon that compromises the durability of structures, especially in urban environments exposed to high levels of vehicular pollution. This study focused on evaluating the impact of traffic on the advancement of carbonation in concrete by exposing cylindrical specimens in ten strategic locations in the city of Tunja, selected based on their varying levels of traffic congestion. The main objective was to identify whether urban environmental conditions significantly influence concrete performance over time. A four-phase methodology was developed: traffic analysis, specimen fabrication, six-month exposure in the field, and evaluation of carbonation depth. Results showed that although all specimens exhibited structural behavior within expected parameters, the depth of carbonation varied significantly between zones. This confirmed that the urban environment directly influences the rate of concrete deterioration. As a conclusion, a general zoning was established, identifying the areas most affected by this phenomenon in Tunja, providing a useful foundation for future decisions regarding the design, maintenance, and preservation of structures in the city.

Keywords— Carbonation, Concrete, Carbon Monoxide, Traffic.

I. INTRODUCCIÓN

La carbonatación es uno de los procesos más relevantes y estudiados en el campo de la durabilidad del concreto, especialmente en ambientes urbanos donde la exposición constante al dióxido de carbono (CO_2) generado por el tráfico vehicular incrementa su incidencia. Este fenómeno ocurre cuando el CO_2 atmosférico penetra en la estructura porosa del concreto y reacciona con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), formando carbonato de calcio (CaCO_3). Como consecuencia, el pH del concreto disminuye, lo que compromete la protección natural que este ofrece a las armaduras embebidas, facilitando la corrosión del acero. [1] [2]

Este proceso no se desarrolla de manera uniforme ni a una velocidad constante, ya que depende de múltiples factores tanto del entorno como del propio material. Autores coinciden en que variables como la humedad relativa, la permeabilidad del concreto, su porosidad y el nivel de alcalinidad tienen un papel determinante en la evolución de la carbonatación [3] [4] [5]. En este sentido, el portal 360 en Concreto, respaldado por la empresa cementera Argos, señala que “el proceso de carbonatación se ve afectado por variables naturales que se encuentran en el concreto... debe haber humedad” [3]. Esta afirmación se ve reforzada por lo expuesto por Bohlin y Snibb, quienes destacan que la difusión del CO_2 y su reacción con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ están estrechamente vinculadas con el entorno ambiental inmediato [4].

Con el cambio climático, la influencia del ambiente se vuelve aún más significativa. Fluctuaciones más marcadas de temperatura y humedad alteran las condiciones de exposición y, por tanto, la forma en que se comporta el concreto con el paso del tiempo. Según Yeongmo Yeon y Jang-Ho Jay Kim, “las variaciones inducidas por el cambio climático... pueden afectar directamente al rendimiento del hormigón” [6]. Investigaciones adicionales, como las de Du et al. [7], Talukdara et al. [5] y Leemann y Moro [8], han mostrado que estos cambios pueden incrementar tanto la velocidad de carbonatación como debilitar las propiedades mecánicas del material.

A esto se suma la interacción con otros agentes agresivos, como los cloruros, que agravan el deterioro del concreto. Sagar et al. observaron que la combinación de carbonatación con cloruros fundidos acelera significativamente la corrosión de las armaduras [9], mientras que Qiu advierte que este efecto conjunto reduce la capacidad de retención de cloruros y favorece su difusión, acortando el tiempo hasta que comienza la corrosión [10] [11]. Chinè-Polito et al. y Campos Silva et al. coinciden en que este tipo de deterioro compromete la integridad estructural del concreto armado [12] [13].

Para evaluar el nivel de afectación, se suele recurrir a la medición de la profundidad de carbonatación, que indica cuán lejos ha penetrado el CO_2 en el concreto. Mohammadi Golafshani lo define como un parámetro esencial para conocer la vulnerabilidad del material [14]. La técnica más utilizada es la aplicación de fenolftaleína como indicador de pH en cortes frescos del concreto, aunque autores como Khadka et al. señalan limitaciones cuando la carbonatación no es uniforme [15]. Chávez-Ulloa et al. han reportado que esta reacción puede reducir el pH desde 12.5 hasta aproximadamente 8.3, dependiendo del grado de afectación [16] [17] [2].

La resistencia del concreto frente a este proceso también está estrechamente relacionada con la calidad de su elaboración. Chávez-Ulloa et al. [18] y Prieto & Celis [19] remarcan la importancia de una buena dosificación y del control en el proceso de mezclado. Además, Jedidi destaca que en estructuras envejecidas o mal construidas, la porosidad tiende a ser más variable y menos controlada, lo que facilita la entrada del CO_2 [20]. Algunas propuestas como la de Oliveira et al. apuntan a modificar la mezcla agregando hidróxido de calcio para aumentar su capacidad de absorber CO_2 sin comprometer su durabilidad [8].

Desde una perspectiva ambiental, el concreto presenta una dualidad interesante. Si bien la producción de cemento es una de las principales fuentes de emisiones de CO_2 , varios estudios han demostrado que el concreto puede, durante su vida útil, absorber una parte de ese CO_2 gracias al mismo proceso de carbonatación. Possan et al. destacan esta capacidad de “recaptura” como un aspecto a tener en cuenta para mitigar los impactos ambientales de la construcción [18] [17].

Frente a este panorama, el presente estudio plantea una estrategia metodológica para analizar cómo las condiciones reales de la ciudad de Tunja influyen en el avance de la carbonatación del concreto. Para ello, se elaboraron cilindros de prueba que fueron expuestos en diez puntos diferentes de la ciudad, elegidos según sus niveles de tráfico vehicular y, por tanto, de contaminación. Estos especímenes permanecieron expuestos durante seis meses. Al mismo tiempo, se mantuvo un grupo de control en condiciones estables de laboratorio. La comparación entre ambos permitió identificar el impacto real del entorno urbano en el proceso de deterioro.

El desarrollo del proyecto se estructuró en cuatro fases principales: primero, la selección de los puntos de estudio basados en el tráfico urbano; luego, la fabricación de los cilindros en laboratorio bajo condiciones controladas; en tercer lugar, su ubicación estratégica en campo; y finalmente, la recolección y evaluación de los especímenes para analizar el avance de la carbonatación.

II. DESARROLLO DEL PROYECTO

• FASE I – Puntos de Estudio

Para determinar los puntos de estudio, se realizó un análisis mediante la plataforma **Google Maps**, con el fin de identificar las zonas con los niveles de tráfico más altos en la ciudad de Tunja. El estudio se basó en un período de una semana, durante el cual se identificaron diez ubicaciones representativas a lo largo del casco urbano, caracterizadas por un alto flujo vehicular y, por consiguiente, una mayor probabilidad de acumulación de gases contaminantes. Dichas ubicaciones se pueden observar en la figura 1 presentada a continuación.

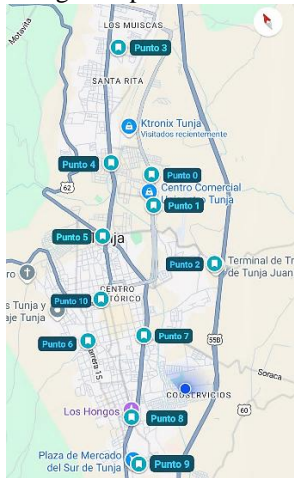


Fig. 1. Ubicación de los puntos de estudio.
Fuente: Google Maps.

Una vez seleccionadas las zonas con mayor tráfico, se procedió a analizar el comportamiento vehicular en cada punto durante los siete días de la semana. Para ello, se utilizó la herramienta de tráfico habitual de Google Maps, que permite visualizar el flujo vehicular por franjas horarias como se observa en la Figura 2. En cada caso, se registró la imagen correspondiente al horario de mayor congestión diaria, además de una imagen base sin tráfico (Figura 3), que fue considerada como el 100% de fluidez.

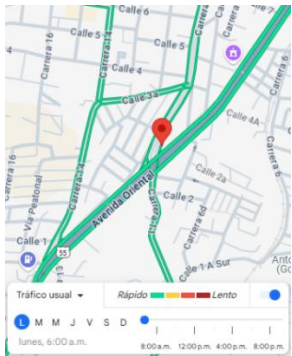


Fig. 2. Zona sin tráfico.
Fuente: Google Maps.



Fig. 3. Zona con tráfico en hora pico.
Fuente: Google Maps.

Posteriormente, se aplicó una metodología de cuantificación visual. A cada color que representa el tráfico en las imágenes

(verde, amarillo, naranja o rojo) se le asignó un **valor porcentual estimado** de acuerdo con su nivel de congestión:

- Verde: 0%
- Amarillo: 50%
- Rojo: 80%
- Rojo oscuro: 100%

Luego, se determinó el número de tramos de cobertura de cada color sobre las vías visibles en la imagen, lo cual permitió aplicar una fórmula de ponderación para calcular un **índice promedio de tráfico** en cada punto. La fórmula usada fue la siguiente:

$$Indice_{tráfico} = (V_a \times 0,50) + (V_r \times 0,80) + (V_R \times 1,00) \quad (1)$$

$$Tráfico\ promedio = \frac{Indice\ de\ tráfico}{Total\ de\ tramos} \quad (2)$$

Donde:

- V_a = tramos de vía en color amarillo
- V_r = tramos de vía en color rojo
- V_R = tramos de vía en color rojo oscuro

Por ejemplo, en el caso del **Punto 5** (Figura 4) durante el sábado a la 1:00 p.m., se observó una distribución de color de 7 tramos en verde, 5 tramos en amarillo, 13 tramos en rojo y 4 tramos en rojo oscuro.



Fig. 4. Zona con tráfico en hora pico.
Fuente: Google Maps.

Aplicando la fórmula:

$$Indice\ de\ tráfico = (7 \times 0,50) + (13 \times 0,80) + (4 \times 1,00)$$

$$Indice\ de\ tráfico = 16,9 \quad (3)$$

$$Tráfico\ promedio = \frac{16,9}{5+13+4} \quad (4)$$

$$Tráfico\ promedio = 0,768 \rightarrow 77\% \rightarrow \bullet$$

Este valor representó el nivel estimado de tráfico durante la hora pico en cada punto. El mismo procedimiento se aplicó en todas las ubicaciones seleccionadas, generando así la Tabla 1,

la cual presenta los índices promedio de tráfico por punto. Estos valores sirvieron como base para justificar la selección de las zonas de exposición de los cilindros.

Tabla 1.

Datos de puntos de estudio.

PUNTO	REFERENCIA	HORA PICO	TRAFICO
0	Sumergidos en Laboratorio	No aplica	No aplica
1	CC. Unicentro	12:00 – 1:00 pm	●
2	Nuevo Terminal	6:30 – 7:30 pm	●
3	Los muiscas	12:00 – 1:00 pm	●
4	CC. Olímpica	2:00 – 3:00 pm	●
5	Profamilia	12:00 – 1:00 pm	●
6	Barrio el Topo	10:00 – 11:00 am	●
7	Antiguo Terminal	6:00 – 7:00 am	●
8	Los hongos	12:00 – 1:00 pm	●
9	Plaza de Mercado	8:50 – 9:50 am	●
10	Parque Santander	5:00 – 6:00 pm	●
NIVEL DE CONGESTIÓN VEHICULAR		● = 0 - 25 %	● = 25 - 50 %
		● = 50 - 75 %	● = 75 - 90 %

Fuente: Autores.

• FASE II – Elaboración de cilindros y laboratorios de caracterización.

A. Elaboración de cilindros

- Materiales y mezcla

En lo referente a los materiales, la grava y la arena fueron obtenidas de la cantera *La Roca*, ubicada en la vía Tunja – Monquirá. Para la elaboración de la mezcla se utilizó cemento Holcim Fuerte Ecoplanet, cemento de uso general que cuenta con el sello de calidad ICONTEC ISO 9001 (V.2008) – ISO 14001 en el proceso de producción, así como la certificación ICONTEC de cumplimiento de la normatividad vigente NTC 121, lo que garantiza su idoneidad para aplicaciones estructurales y de durabilidad.

La mezcla de concreto utilizada en la elaboración de los cilindros corresponde a una dosificación diseñada para alcanzar una resistencia especificada de $f'c = 21$ MPa. Esta dosificación ha sido desarrollada y validada en diversas investigaciones del semillero de investigación SIEC, y fue adoptada como base metodológica en el presente trabajo. La mezcla se caracterizó por una relación agua/cemento de 0,46, lo que asegura un equilibrio entre trabajabilidad y resistencia, condiciones necesarias para el objetivo de evaluar el avance de la carbonatación bajo exposición ambiental.

La siguiente tabla presenta las cantidades específicas de materiales empleadas, calculadas para la fabricación de 37 cilindros con un margen de desperdicio del 20 %. En ella se detallan las proporciones de cemento, arena, grava y agua requeridas para la mezcla, que garantizan la homogeneidad y reproducibilidad del material utilizado en este estudio.

Dosificación de material para la mezcla.

Cantidad de cilindros		37	Desperdicio (%)		20
	Para		BULTOS	BULTOS	
Cemento	98.86	Kg	→	2.0	1.98
Arena	167.39	Kg	→	2.8	2.79
Grava	220.01	Kg	→	3.7	3.67
Agua	45.19	Kg			

Fuente: Autores.

El primer paso para llevar a cabo este procedimiento consistió en la preparación de los moldes metálicos para cada cilindro. Se alistaron un total de 33 moldes o camisas para garantizar que se encontraran en condiciones adecuadas y que aseguraran el confinamiento correcto de la mezcla (Figura 5). Posteriormente, se aplicó una capa de desmoldante con el propósito de evitar que el concreto se adhiriera a las paredes, facilitando así el proceso de desencofrado posterior. [21]

Una vez listos los moldes, se procedió a realizar la mezcla de forma manual. Para ello, se integraron el agregado grueso, el agregado fino y el cemento, hasta obtener una mezcla homogénea. Luego, se añadió el agua y se continuó mezclando hasta alcanzar la consistencia y humedad adecuadas. (Figura 6)



Fig. 5. Alistado y aplicación de desmoldante.

Fig. 6. Mezcla.

Fuente: Autores.

Como se puede observar en la Figura 7. Para la verificación de la trabajabilidad del concreto, se realizó el ensayo de asentamiento (slump test). Se humedeció el molde cónico y se sujetó firmemente con los pies. El concreto se depositó en tres capas, apisonando cada una con 25 golpes utilizando una varilla con punta redondeada. Posteriormente, se enrasó la superficie, se retiró el molde de forma recta y se midió la diferencia de altura entre el molde y la mezcla, obteniendo un valor de **122 mm** de asentamiento. Este resultado se encuentra dentro del rango aceptable para mezclas de consistencia media a fluida, según lo establecido por la **NTC 3967**, equivalente a la norma **ASTM C143/C143M**, que regula el ensayo de asentamiento del concreto fresco. [22] [23]



Fig. 7. Ensayo de asentamiento - Slump
Fuente: Autores.

Una vez verificada la mezcla, se procedió a llenar los 33 moldes restantes. Cada molde fue llenado en tres capas, apisonando cada una con 25 golpes. A diferencia del procedimiento del ensayo de asentamiento, en esta etapa no se retiró el molde. En su lugar, se aplicaron 15 golpes adicionales con un martillo de goma sobre las paredes del molde, con el fin de eliminar vacíos y minimizar la formación de hormigueros en los cilindros. Finalmente, se enrasó la superficie de cada molde con una varilla y se dejaron secar durante 24 horas como se aprecia en la figura 8. Este procedimiento se realizó siguiendo los lineamientos de la **NTC 1377**, norma colombiana que establece los criterios de elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio, equivalente a la **ASTM C192**. [24] [25]



Fig. 8. Elaboración de cilindros.
Fuente: Autores.

Luego del secado, se desencofraron los cilindros y se marcaron con la referencia “CARB” junto con un número identificador como se observa en la figura 9, con el propósito de mantener un orden sistemático en el seguimiento del proyecto.



Fig. 9. Desencofrado y marcado de cilindros
Fuente: Autores.

Fig. 10. Sumergidos

A partir del momento del desencofrado, tres cilindros se dejaron sumergidos en piscina de agua en los laboratorios de la

universidad (Fig. 10). Estos permanecieron allí durante todo el proceso y sirvieron como muestra base para realizar comparaciones posteriores con los cilindros dispuestos en las distintas zonas de la ciudad.

B. Caracterización del material

- Laboratorio de Granulometría (INV E-213)

Para este procedimiento se llevó a cabo el ensayo de granulometría con el objetivo de determinar la distribución del tamaño de partículas del agregado fino y grueso que serían utilizados en la elaboración de los cilindros. Este análisis es fundamental para verificar que los materiales cumplan con las especificaciones técnicas establecidas por las normas, garantizando así una mezcla de concreto adecuada. [26]

El primer paso consistió en tomar una muestra representativa del agregado a ensayar. Esta muestra fue previamente secada al horno para eliminar cualquier traza de humedad que pudiera afectar la precisión de los resultados. A continuación, se procedió a **pesar la muestra total seca**, registrando su masa inicial.



Fig. 11. Grava Seca.



Fig. 12. Arena Seca.

Fuente: Autores.

Posteriormente, se preparó la serie de tamices normalizados, colocándolos en orden descendente de apertura, desde el tamiz de mayor diámetro hasta el más fino, incluyendo el fondo o "bandeja". Luego, la muestra fue vertida cuidadosamente en el tamiz superior, y se colocó la tapa para evitar pérdidas durante el procedimiento. El tamizado se realizó de forma manual, agitando y golpeando lateralmente el conjunto de tamices durante un período aproximado de 10 a 15 minutos. Este proceso se llevó a cabo de manera uniforme para asegurar que las partículas se distribuyeran adecuadamente a través de los diferentes niveles.

Al finalizar el tamizado, se pesó el material retenido en cada tamiz (Figura. 13), registrando los datos en una hoja de cálculo para su posterior análisis los cuales se presentan en la tabla 2.



Fig. 13. Retención de tamices de grava y arena.

Fuente: Autores.

Tabla 2.

Retención de material en cada tamiz.

PESO (g)	4138,3	1340,1
TAMIZ	GRAVA	ARENA
1	0	0
3/4	0	0
1/2	547,1	0
3/8	939,5	0
No 4''	2081,6	32,1
No 8''	381,2	35
No 16''	87,7	84,1
No 20''	11,4	42,4
No 40''	52,6	538,2
No 60''	14,6	388,3
No 80''	6,4	118
No 100''	2,4	43,6
No 200''	8,7	54,2
FONDO	1,3	1,1
TOTAL	4134,5	1337
% Error	0,999	0,998

Fuente: Autores.

Con esta información se calculó el porcentaje retenido y el porcentaje que pasa por cada tamiz, lo que permitió construir la curva granulométrica de cada tipo de agregado, Presentada en la Figura 14. [27]

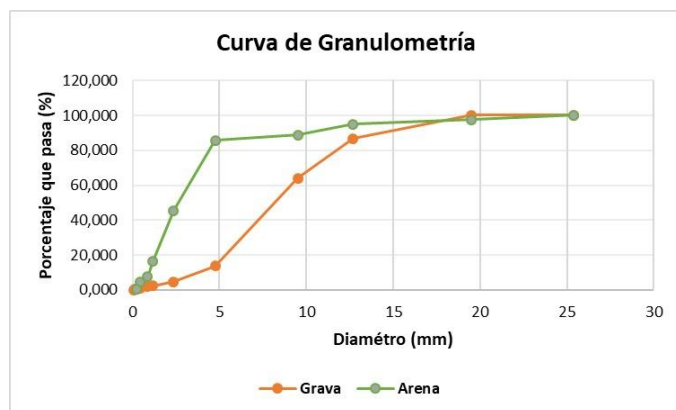


Fig. 14. Curva Granulométrica.

Fuente: Autores.

- El análisis granulométrico de los materiales evidencia que el agregado grueso corresponde a un tamaño nominal de ¾ de pulgada, mientras que el agregado fino se clasifica como malla No. 40, lo que confirma su adecuada categorización como agregados grueso y fino, respectivamente. Adicionalmente, el procedimiento presentó un porcentaje de error inferior al 1 %, lo cual indica una pérdida mínima de material durante el ensayo y respalda la precisión con la que se llevó a cabo el proceso.

- Laboratorio de Masas Unitarias (NTC 92)

El ensayo de masas unitarias tiene como finalidad determinar la densidad del agregado fino y del agregado grueso, lo cual es fundamental para hallar la dosificación más óptima de los materiales en la mezcla a utilizar en el concreto. Este valor permite calcular el volumen que ocupa una masa conocida de

agregado, incluyendo los espacios vacíos entre partículas. [28]

Para iniciar el procedimiento, se seleccionaron muestras representativas tanto del agregado fino como del agregado grueso, asegurándose de que estuvieran secos, sin humedad superficial que alterara la medición. Se utilizó un recipiente cilíndrico metálico con un volumen de 1 litro, cuyo peso en vacío fue registrado previamente.

Para el agregado grueso, el llenado del recipiente se realizó en tres capas, compactando cada una mediante 25 golpes con una varilla metálica para simular una condición de "masa compactada". (Figura. 15)

En el caso del agregado fino, se repitió el procedimiento de llenado, pero sin compactar, siguiendo la condición de "masa suelta", es decir, vertiendo el material cuidadosamente sin ejercer presión adicional (Figura. 16). En ambos casos, una vez completado el llenado, se enrasó la superficie para evitar excesos y se pesó el recipiente lleno.



Fig. 15. Grava.



Fig. 16. Arena.

Fuente: Autores.

Con los datos de peso del recipiente vacío y lleno, se calcularon las masas unitarias mediante la fórmula:

$$\text{Masa Unitaria SUELTA} = \frac{\text{Masa agregado suelto}}{\text{Volumen del recipiente}} \quad (5)$$

$$\text{Masa Unitaria COMPACTADA} = \frac{\text{Masa agregado compactado}}{\text{Volumen del recipiente}} \quad (6)$$

Finalmente, los resultados fueron representados en la siguiente tabla.

Tabla 3.

Datos obtenidos del laboratorio.

DIMENSIONES	RECIPIENTES	
	ARENA	GRAVA
DIAMETRO	16,1 cm	20,1 cm
ALTURA	16 cm	15,8 cm
VOLUMEN	3257,329 cm ³	5013,478 cm ³
MASA UNITARIA SUELTA		
PESO	ARENA	GRAVA
1	5674,5 g	5674,5 g
2	5813,2 g	5813,2 g
3	5740 g	5740 g
PROMEDIO	5742,567 g	5742,567 g
RESULTADO	1,763 g/cm ³	1,145 g/cm ³
MASA UNITARIA APISONADA		
PESO	ARENA	GRAVA
1	9635 g	6040 g

2	9715 g	6064 g
3	9607 g	6094 g
PROMEDIO	9652,33 g	6066 g
RESULTADO	2,963 g/cm³	1,210 g/cm³

Fuente: Autores.

- Los ensayos de masa de masas unitarias realizados a la grava y la arena ayudaron a determinar la densidad aparente que presentan estos materiales en condiciones sueltas y apisonadas, como se evidenció que la arena presento valores altos en comparación con la grava lo que evidencia una mayor compactación potencial y menor porosidad.

Laboratorio de Absorción (INV E-222)

El objetivo de este ensayo fue determinar el peso específico y el porcentaje de absorción del agregado fino y grueso, lo cual es fundamental para establecer la proporción adecuada de agua en la mezcla de concreto, así como para conocer la densidad real del material.

El procedimiento comenzó con la selección y secado de la muestra representativa del agregado, la cual fue colocada en el horno a una temperatura aproximada de 110 °C durante 24 horas, con el fin de eliminar toda la humedad presente en el material. [29]

Una vez alcanzado el estado seco, se registró el peso de la muestra (Figura. 17). Luego, se sumergió completamente en agua durante un periodo de 24 horas, con el fin de que alcanzara la condición de saturación con superficie seca.

Transcurrido ese tiempo, se retiró la muestra del agua y se procedió a secar suavemente la superficie de las partículas con un trapo húmedo o una toalla absorbente, sin extraer el agua interna (Figura. 18). Esta condición permite simular el estado en el que el agregado se encuentra saturado, pero sin humedad superficial. Se registró el peso de la muestra en esta condición.



Fig. 17. Grava



Fig. 18. Arena.

Fuente: Autores.

Posteriormente, con los valores medidos se procedió a reemplazarlos en la formula (7) correspondiente a el porcentaje de absorción del agregado en estudio. Dichos valores y resultados se pueden observar en la tabla 4.

$$Absorción (\%) = \left(\frac{W_{ssd} - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad (7)$$

Tabla 4. Datos obtenidos del laboratorio.

	GRAVA	ARENA
--	-------	-------

Peso seco al horno (Wd)	2389,1 g	1892,5 g
Peso superficialmente seco (Wssd)	2426,8 g	1933,2 g
% de absorción	1,6 %	2,2 %

Fuente: Autores.

Laboratorio de Humedad (NTC 1776)

El propósito de este ensayo fue determinar el contenido de humedad presente en los agregados finos y gruesos en el momento de su uso, información esencial para ajustar correctamente la cantidad de agua añadida en la mezcla de concreto y mantener una relación agua/cemento controlado. [30]

Para iniciar el procedimiento, se seleccionó una muestra representativa del agregado a analizar. Esta muestra fue pesada inmediatamente después de su recolección para obtener su peso húmedo como se puede evidenciar en la Figura 19.



Fig. 19. Peso Inicial Grava.



Fig. 20. Peso Inicial Arena.

Fuente: Autores.

Posteriormente, la muestra fue colocada en el horno a una temperatura constante de 110 °C, durante un periodo aproximado de 24 horas, hasta que se eliminó completamente la humedad presente. Una vez alcanzado el estado seco, se registró el peso seco del material como se muestra en la tabla 6.

Con los datos obtenidos, se aplicó la fórmula siguiente para calcular el contenido de humedad (%):

$$Humedad (\%) = \frac{\text{Peso seco} - \text{Peso húmedo}}{\text{Peso húmedo}} \times 100 \quad (8)$$

Los datos y resultados obtenidos luego de aplicar la formula se registraron en la siguiente tabla.

Tabla 7. Datos obtenidos del laboratorio.

MASA	GRAVA	ARENA
Antes de lavar	4206,9 g	1400,3 g
Después de lavar	4138,3 g	1340,1 g
% de humedad	2 %	4 %

Fuente: Autores.

- En cuanto al contenido de humedad de los materiales, se obtuvo que la arena presentó un 4 % y la grava un 2 %, lo que evidencia que el agregado fino tiende a retener una mayor cantidad de agua debido a su mayor superficie específica. Esta característica es importante, ya que influye directamente en la

dosificación del agua en la mezcla de concreto y, por ende, en sus propiedades finales.

• **FASE III – Ubicación de cilindros en puntos de estudio**

Para esta etapa del proyecto fue fundamental contar con la colaboración de la comunidad. Una vez realizado el estudio de los puntos críticos de la ciudad con alto tráfico vehicular, y teniendo los cilindros elaborados y debidamente identificados, el siguiente paso consistió en visitar las ubicaciones previamente seleccionadas.

En cada lugar, se dialogó con los residentes de la zona hasta encontrar un espacio adecuado donde se permitiera dejar los cilindros durante el periodo de exposición a los factores ambientales y al dióxido de carbono generado por los vehículos, conforme a los objetivos del proyecto.

Paralelamente, se designó un punto cero en los laboratorios de la universidad, donde se dejaron tres cilindros sumergidos en agua durante todo el tiempo de exposición como muestras de control, con el fin de comparar su comportamiento con el de los cilindros ubicados en los diferentes puntos de estudio.

Por razones de privacidad y en cumplimiento de lo establecido en la **Ley 1581 de 2012** sobre la protección de datos personales en Colombia, no es posible incluir en la tabla la dirección exacta ni los datos de contacto proporcionados por las personas que colaboraron durante esta fase del proyecto. Al no contar con autorización expresa para su divulgación, la información se presenta a continuación en la tabla 6 de forma general. [31]

Tabla 6. Ubicación de cilindros en puntos de estudio.

PUNTO	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN	CILINDRO
0	Universidad Santo Tomas	Sumergidos	1 - 2 - 3
1	CC. Unicentro	Vivero	4 - 5 - 6
2	Nuevo Terminal	Rotonda terminal	7 - 8 - 33
3	Los muscas	Terraza	10 - 11 - 12
4	CC. Olímpica	Parqueadero	13 - 14 - 15
5	Profamilia	Bicicletería	16 - 17 - 18
6	Barrio el Topo	Parqueadero	9 - 19 - 20
7	Antiguo Terminal	Parqueadero	21 - 22 - 23
8	Los hongos	Estación de servicio	24 - 25 - 26
9	Plaza de Mercado	Parqueadero	27 - 28 - 29
10	Parque Santander	Lubricentro	30 - 31 - 32
ELABORACIÓN DE LOS CILINDROS		4 de diciembre 2024	
UBICACIÓN DE LOS CILINDROS		20 de diciembre 2024	
RECOLECCIÓN DE LOS CILINDROS		26 de mayo 2025	

Fuente: Autores.

Al finalizar este proceso, los cilindros fueron dispuestos según se muestra en la tabla anterior. En el siguiente mapa se puede observar la ubicación general de cada grupo de cilindros. Esta distribución abarca una parte significativa del área urbana, permitiendo así obtener datos más representativos. Gracias a esta dispersión geográfica, fue posible evitar concentraciones en una sola zona y, por tanto, alcanzar una visión más amplia y diversa del comportamiento del concreto expuesto a diferentes

condiciones ambientales y niveles de contaminación.



Fig. 21. Disposición final de cilindros. Fuente: Google Maps.

• **FASE IV – Recolección y ensayo a compresión de cilindros.**

Luego del periodo de exposición al medio ambiente, establecido (6 meses) para los cilindros, se recolectaron para llevar de nuevo al laboratorio y se procedió a realizar el ensayo de carbonatación con el fin de evaluar la profundidad del frente carbonatado en el concreto. (Figura.22)

El primer paso consistió en fallar los cilindros mediante compresión, utilizando la máquina universal de marca MATEST ubicada en el laboratorio de materiales de la Universidad Santo Tomas de Tunja, la cual cuenta con certificado de calibración respectivo y que tiene una capacidad de carga de 2000 kN, como se observa en la Figura.23. Esta rotura permitió obtener una superficie interna expuesta y reciente del concreto, sobre la cual se aplicaría posteriormente el indicador.



Fig. 22. Recolección de cilindros. Fig. 23. Falla de cilindros. Fuente: Autores.

Una vez obtenida la sección recién fracturada, se procedió a rociar uniformemente la superficie con una solución al 1% de fenoltaleína disuelta en alcohol etílico, la cual actúa como indicador de pH (Figura.24). Esta sustancia permite distinguir las zonas carbonatadas de las no carbonatadas:

- Las zonas **no carbonatadas** (con pH mayor a 9) adquieren un **color rosa o púrpura intenso**.

- Las zonas **carbonatadas** (con pH menor a 9) **no presentan coloración**, permaneciendo con su tono gris natural.



Fig. 24. Aplicación de indicador sobre falla.
Fuente: Autores.

Posteriormente, con ayuda de un calibrador, se midió la profundidad de carbonatación desde la superficie expuesta hacia el interior del cilindro, en 4 puntos distintos alrededor del espécimen como se observa en la figura. 25, esto para tener un valor más fiable del cálculo de promedio.



Fig. 25. Medición de profundidad de carbonatación.
Fuente: Autores.

Este procedimiento se realizó con los 33 cilindros dispuestos en las distintas zonas seleccionadas, dichos valores se registraron para su análisis y comparación entre los distintos puntos de exposición en la ciudad y se encuentran en la tabla 7 en la sección de resultados.

Este ensayo permitió evaluar el grado de afectación del concreto por exposición prolongada al dióxido de carbono (CO_2), factor clave en el proceso de deterioro por carbonatación.

Es importante mencionar que durante el análisis se identificaron mediciones atípicas en algunos de los cilindros evaluados. En ciertos casos, se observaron valores de carbonatación significativamente bajos, los cuales se atribuyen a la forma en que fueron dispuestos los ejemplares durante el periodo de exposición. En particular, se evidenció que la cara del cilindro que permaneció en contacto con la superficie de

apoyo presentó profundidades de carbonatación considerablemente menores en comparación con el resto del perímetro. Por otro lado, también se registraron mediciones notablemente más altas que no guardaban coherencia con las demás lecturas del mismo cilindro. Estas discrepancias se deben, en parte, a la manipulación no controlada por parte de algunos colaboradores voluntarios en ciertos puntos de estudio.

A continuación, se observa el resultado de diferentes mediciones en los cilindros con profundidades de carbonatación diferentes al comportamiento evidenciado en la superficie del cilindro.



Fig. 26. Mediciones de carbonatación mínimas.
Fuente: Autores.



Fig. 27. Mediciones anómalas.
Fuente: Autores.

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de carbonatación realizado en los cilindros expuestos en los diferentes puntos previamente seleccionados en la ciudad. Para cada cilindro, se realizaron tres mediciones puntuales de la profundidad del frente carbonatado en la superficie fracturada, con el fin de obtener datos representativos y confiables.

Los valores registrados se expresan en milímetros (mm) y permiten identificar el nivel de penetración del dióxido de carbono en cada muestra de concreto. Esta información resulta clave para analizar el grado de carbonatación en función del entorno de exposición.

Tabla 7.
Resultados de mediciones x punto de estudio en (mm).

PUNTO 0: SUMERGIDOS EN LABORATORIO			
Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3
Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	15,36	15,16	15,3
Altura (cm)	29,96	30,13	29,8
Área (cm ²)	18554,00	18074,28	18385,38
Peso (kg)	12,49	12,23	12,12
Esfuerzo máx. (Mpa)	25,76	27,06	21,26
Laboratorio de Carbonatación			
PROFUNDIDAD	CILINDRO 1	CILINDRO 2	CILINDRO 3
Promedio (mm)	0	0	0
Máxima (mm)	0	0	0
Mínima (mm)	0	0	0
PROMEDIO	0		
PUNTO 1: CC. UNICENTRO			
Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 4	CILINDRO 5	CILINDRO 6
Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	15,28	15,28	15,2
Altura (cm)	29,9	29,9	29,86
Área (cm ²)	18337,35	18337,35	18145,83
Peso (kg)	11,67	11,71	11,74
Esfuerzo máx. (Mpa)	13,05	16,96	20,02
Laboratorio de Carbonatación			
PROFUNDIDAD AD	CILINDRO 4	CILINDRO 5	CILINDRO 6
Promedio (mm)	9,23	5,82	7,37
Máxima (mm)	12,54	9,24	9,06
Mínima (mm)	6,88	4,15	6,14
PROMEDIO	7,47		
PUNTO 2: NUEVO TERMINAL			
Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 7	CILINDRO 8	CILINDRO 33
Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	15,31	15,21	15,13
Altura (cm)	30,13	29,83	29,9
Área (cm ²)	18443,48	18193,62	17979,09
Peso (kg)	11,84	11,46	11,94

Esfuerzo máx. (Mpa)	18,68	14,49	20,12
Laboratorio de Carbonatación			
PROFUNDIDAD AD	CILINDRO 7	CILINDRO 8	CILINDRO 33
Promedio (mm)	9,19	7,02	8,18
Máxima (mm)	14,05	9,09	12,54
Mínima (mm)	4,79	4,88	4,12
PROMEDIO	8,13		
PUNTO 3: LOS MUISCAS			
Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 10	CILINDRO 11	CILINDRO 12
Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	15,3	15,23	15,31
Altura (cm)	29,9	29,86	29,8
Área (cm ²)	18385,38	18217,53	18433,48
Peso (kg)	11,80	11,77	11,71
Esfuerzo máx. (Mpa)	19,54	20,64	20,26
Laboratorio de Carbonatación			
PROFUNDIDAD AD	CILINDRO 10	CILINDRO 11	CILINDRO 12
Promedio (mm)	8,24	6,68	11,61
Máxima (mm)	12,55	8,8	17,5
Mínima (mm)	4,16	3,55	7,45
PROMEDIO	8,84		
PUNTO 4: CC. OLIMPICA			
Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 13	CILINDRO 14	CILINDRO 15
Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	15,2	15,2	15,25
Altura (cm)	29,83	30,13	30,16
Área (cm ²)	18145,83	18145,83	18265,41
Peso (kg)	11,84	11,60	11,99
Esfuerzo máx. (Mpa)	22,45	22,45	19,91
Laboratorio de Carbonatación			
PROFUNDIDAD AD	CILINDRO 13	CILINDRO 14	CILINDRO 15
Promedio (mm)	7,89	8,47	8,01
Máxima (mm)	10,16	11,88	10,94
Mínima (mm)	5,11	4,84	5,3
PROMEDIO	8,12		
PUNTO 5: PROFAMILIA			

Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 16	CILINDRO 17	CILINDRO 18
Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	15,23	15,25	15,25
Altura (cm)	30,2	29,83	30,4
Área (cm ²)	18217,53	18265,41	18265,41
Peso (kg)	11,85	11,76	12,02
Esfuerzo máx. (Mpa)	19,50	21,20	19,81

Laboratorio de Carbonatación			
PROFUNDIDAD AD	CILINDRO 16	CILINDRO 17	CILINDRO 18
Promedio (mm)	8,67	6,095	7,97
Máxima (mm)	12,66	7,52	13,55
Mínima (mm)	3,04	4,51	3,03
PROMEDIO			7,57

PUNTO 6: BARRIO EL TOPO			
Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 9	CILINDRO 19	CILINDRO 20
Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	15,26	15,15	15,26
Altura (cm)	30,2	29,83	29,93
Área (cm ²)	18313,35	18869,19	18313,35
Peso (kg)	11,77	11,45	11,80
Esfuerzo máx. (Mpa)	19,62	19,96	20,16

Laboratorio de Carbonatación			
PROFUNDIDAD AD	CILINDRO 9	CILINDRO 19	CILINDRO 20
Promedio (mm)	10,47	8,47	8,79
Máxima (mm)	15,03	9,91	11,34
Mínima (mm)	5,81	7,21	6,81
PROMEDIO			9,24

PUNTO 7: ANTIGUO TERMINAL			
Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 21	CILINDRO 22	CILINDRO 23
Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	14,88	15,08	14,86
Altura (cm)	29,9	30,13	29,5
Área (cm ²)	17389,84	17860,45	17366,48
Peso (kg)	11,76	11,87	11,58
Esfuerzo máx. (Mpa)	21,88	21,84	15,75

Laboratorio de Carbonatación			
-------------------------------------	--	--	--

PROFUNDIDAD AD	CILINDRO 21	CILINDRO 22	CILINDRO 23
Promedio (mm)	6,57	5,96	8,39
Máxima (mm)	8,27	7,08	13,21
Mínima (mm)	5,38	5,39	6,41
PROMEDIO			6,97

PUNTO 8: LOS HONGOS			
Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 24	CILINDRO 25	CILINDRO 26
Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	15,23	15,21	15,21
Altura (cm)	29,96	29,8	30,16
Área (cm ²)	18217,53	18193,62	18193,62
Peso (kg)	11,84	11,83	12,19
Esfuerzo máx. (Mpa)	23,07	20,46	23,82

Laboratorio de Carbonatación			
PROFUNDIDAD AD	CILINDRO 24	CILINDRO 25	CILINDRO 26
Promedio (mm)	9,74	6,54	9,65
Máxima (mm)	14,29	9,52	12,13
Mínima (mm)	5,49	3,25	6,7
PROMEDIO			8,64

PUNTO 9: PLAZA DE MERCADO			
Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 27	CILINDRO 28	CILINDRO 29
Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	15,25	15,33	15,23
Altura (cm)	29,93	29,86	29,7
Área (cm ²)	18313,35	18457,55	18217,53
Peso (kg)	11,77	11,84	11,69
Esfuerzo máx. (Mpa)	21,24	18,42	20,21

Laboratorio de Carbonatación			
PROFUNDIDAD AD	CILINDRO 27	CILINDRO 28	CILINDRO 29
Promedio (mm)	7,09	6,78	7,70
Máxima (mm)	8,9	9,43	9,46
Mínima (mm)	5,09	3,04	5,3
PROMEDIO			7,19

PUNTO 10: PARQUE SANTANDER			
Laboratorio de compresión			
MEDICIÓN	CILINDRO 30	CILINDRO 31	CILINDRO 32

Edad (días)	184	184	184
Diámetro (cm)	15,21	15,13	15,23
Altura (cm)	30,2	29,9	30,16
Área (cm ²)	18193,62	17979,09	18217,53
Peso (kg)	11,6	11,46	11,94
Esfuerzo máx. (Mpa)	17,45	22,24	16,68

Laboratorio de Carbonatación

PROFUNDIDAD	CILINDRO 30	CILINDRO 31	CILINDRO 32
Promedio (mm)	11,8	7,57	6,1
Máxima (mm)	14,53	10,04	8,56
Mínima (mm)	7,43	3,25	3,55
PROMEDIO	8,49		

Fuente: Autores.

La siguiente tabla presenta un resumen con el promedio total de la profundidad de carbonatación obtenida en cada uno de los puntos de estudio. Esta información permite comparar de forma general el nivel de afectación del concreto según las condiciones de exposición en cada zona evaluada.

Tabla 9.

Tabla resumen de promedios.

PUNTO DE ESTUDIO	PROMEDIO (mm)	NIVEL DE CARBONATACIÓN	
0	0	Bajo	●
1	7,5	Normal	●
2	8,1	Elevado	●
3	8,8	Elevado	●
4	8,1	Elevado	●
5	7,6	Normal	●
6	9,2	Elevado	●
7	6,9	Normal	●
8	8,6	Elevado	●
9	7,2	Normal	●
10	8,49	Elevado	●
CRITERIO PROPIO DE CLASIFICACIÓN			
PROF. mm	NIVEL DE CARBONATACIÓN	DESCRIPCIÓN	
0 – 4	Bajo	Buena resistencia a la carbonatación	●
4 – 8	Normal	Comportamiento esperado	●
8 – 12	Elevado	Se recomienda evaluar condiciones	●
> 12	Excesivo	Posible afectación a la durabilidad	●

Fuente: Autores.

La siguiente imagen muestra un mapa general con los resultados obtenidos a partir del promedio de los tres cilindros correspondientes a cada punto de estudio.

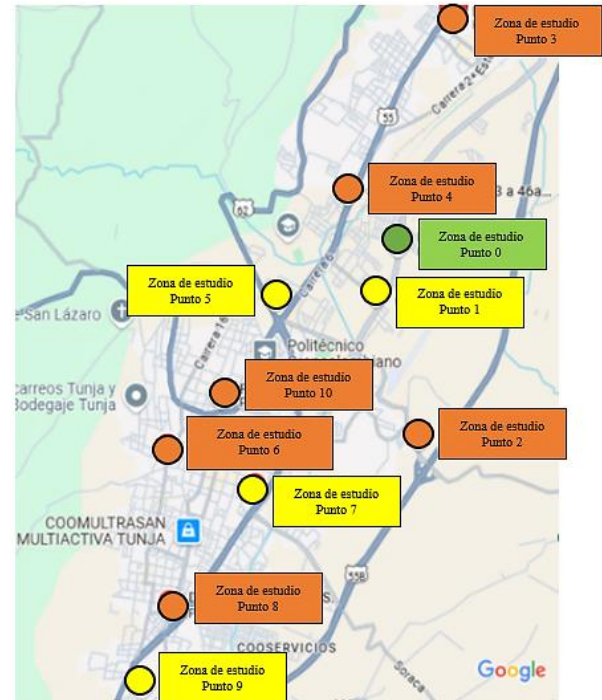


Fig. 26. Disposición final de cilindros.

Fuente: Google Maps.

IV. CONCLUSIONES

- La metodología propuesta para evaluar la carbonatación del concreto en condiciones reales de exposición urbana resultó efectiva, al permitir el análisis del comportamiento del material frente a diferentes niveles de contaminación atmosférica asociados al tráfico vehicular en la ciudad de Tunja. La comparación entre las muestras expuestas en campo y la muestra base mantenida en condiciones controladas permitió cuantificar el impacto del entorno urbano sobre la pérdida de alcalinidad del concreto, observándose un mayor avance del frente de carbonatación en las zonas con alta carga vehicular.

- Considerando que para el desarrollo del presente estudio se seleccionaron diez puntos estratégicos dentro del área urbana de la ciudad de Tunja, en cada uno de los cuales se dispusieron tres cilindros de concreto, además de un punto de control con tres especímenes mantenidos en condiciones óptimas, se procedió al análisis de los resultados obtenidos en cuanto a la profundidad de carbonatación tras el periodo de exposición. Los cilindros correspondientes al punto de control no presentaron indicios de carbonatación en ninguna de sus caras, lo cual confirma que, en ausencia de factores ambientales agresivos, el concreto puede mantener su alcalinidad y proteger el refuerzo embebido de manera efectiva. En contraste, los cilindros expuestos en los diferentes puntos de la ciudad sí mostraron evidencia del proceso de carbonatación, con profundidades que oscilaron entre 3.03 mm y 17.5 mm, en función de las condiciones particulares de cada sitio de exposición. Estos resultados demuestran la influencia directa

del entorno urbano en la degradación progresiva del concreto y resaltan la importancia de considerar las condiciones reales de servicio en el diseño y mantenimiento de estructuras.

- Se evidenció una relación directa entre la intensidad del tráfico vehicular y la profundidad de carbonatación en los cilindros expuestos, lo cual confirma la influencia de la concentración de dióxido de carbono en el ambiente como factor determinante en el deterioro del concreto. Teniendo en cuenta que valores altos de profundidad de carbonatación como el de 17.5 mm corresponden a zonas de alto nivel de tráfico vehicular como el Sector comercial de los Muisacas correspondiente al punto de estudio 3, por el contrario, valores mínimos promedio de carbonatación que están en profundidades de 5.828 mm se presentó en zonas de menor nivel de tráfico vehicular como lo es el sector de Profamilia correspondiente al punto de estudio 5.

- Esta notable diferencia en la profundidad de carbonatación entre los distintos cilindros sugiere que cada punto de ubicación estuvo sujeto a condiciones ambientales particulares. Factores como la humedad relativa, la temperatura, la presencia de contaminantes, el grado de exposición directa a la intemperie y, especialmente, las concentraciones locales de dióxido de carbono, influyen de manera significativa en el avance del frente de carbonatación en el concreto.

- El uso de ensayos con fenolftaleína demostró ser una técnica confiable para la identificación del frente de carbonatación, facilitando la evaluación del grado de afectación del concreto tras el periodo de exposición. De la misma forma los resultados obtenidos aportan información relevante para el diseño de estructuras en entornos urbanos, promoviendo la incorporación de criterios de durabilidad más estrictos en zonas con alta contaminación vehicular, y fomentando estrategias de mantenimiento preventivo basadas en las condiciones reales de exposición.

- Aunque el objetivo principal del estudio no fue evaluar la resistencia a la compresión del concreto, los resultados de este ensayo mostraron que el 91 % de los cilindros alcanzaron o superaron el rango de resistencia aceptada correspondiente a concretos de 21 MPa. Sin embargo, el análisis comparativo permitió identificar una relación entre la resistencia mecánica y la magnitud de la carbonatación, evidenciando que los especímenes con menor resistencia fueron también los que presentaron mayores niveles de afectación.

- Se evidenció que los cilindros que no alcanzaron el rango aceptable de resistencia de diseño para 21 MPa coincidieron con los que presentaron mayores profundidades de carbonatación. Este comportamiento puede atribuirse a las condiciones de curado y exposición a las que estuvieron sometidos dichos especímenes, las cuales probablemente favorecieron una mayor pérdida de humedad y un desarrollo deficiente de su microestructura. Lo anterior resalta la relación existente entre una menor resistencia mecánica, mayor porosidad y mayor susceptibilidad a la penetración de CO₂, confirmando que los concretos que no logran su resistencia objetivo son más propensos a experimentar una carbonatación acelerada.

- Como recomendación para futuros trabajos, se sugiere ampliar el estudio evaluando otros factores que resultaron evidentes en este proceso y que pueden ser determinantes para comprender mejor la relación entre el entorno, la resistencia mecánica y el avance de la carbonatación. En particular, sería pertinente realizar el experimento con cilindros fabricados a partir de diferentes mezclas y sometidos a distintos procesos de curado, con el fin de identificar de manera más precisa cómo estas variables influyen en la susceptibilidad del concreto frente a la carbonatación en condiciones reales de exposición.

V. AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar un sincero agradecimiento a nuestra compañera Geraldine Alvarado, quien participó en la etapa inicial de este proyecto y a Fredy, laboratorista de la Universidad Santo Tomas Seccional Tunja, por su acompañamiento técnico y total compromiso durante el desarrollo de los ensayos de laboratorio, los cuales fueron fundamentales para el cumplimiento de los objetivos propuestos. También agradecemos a las personas que, de forma generosa, facilitaron los espacios necesarios para la ubicación y resguardo de los cilindros durante el periodo de exposición. Finalmente, pero no menos importante a nuestras familias por el apoyo incondicional durante todo el posgrado y la realización de este proyecto, así como también se reconoce la tutoría del ingeniero Wilson Medina, quien acompañó el proceso de revisión y corrección de este artículo para su correcta presentación. Sin ellos no habría sido posible la culminación de este artículo como trabajo de grado en la especialización de estructuras.

VI. REFERENCIAS

- [1] C.-U. Emilio, T. Pérez López, J. Reyes Trujeque y F. Corvo Pérez, «Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada,» *CENIC. Ciencias Químicas*, vol. 41, 2010.
- [2] H. A. M. Muñoz, Manual del acero gerdaui diaco para construcciones sismo resistentes, 2012.
- [3] J. D. Osorio, «Carbonatación del concreto: cómo detectarla,» [En línea]. Available: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/carbonatacion-del-concreto-como-detectarla>.
- [4] K. BOHLIN y R. SNIBB, «Carbonation of concrete: Effect of mineral additions and influence on,» *chalmers university of technology*, 2016.
- [5] S. Talukdara, N. Banthiaa y J. Grace, «Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate,» 24 April 2012.
- [6] Y. Yeon y J.-H. Jay Kim, «Desarrollo de diagrama probabilístico de superficie de satisfacción en 3D para la evaluación de la carbonatación del hormigón considerando el efecto del cambio climático,» *ScienceDirect*, vol. 466, 2025.
- [7] T. Du, Yongjia Cai, Yipu Guo, Jinghao Chen, Sen Chen, Mofang Yuan y Fulin Qu, «Time-dependent model for in-situ concrete carbonation depth under combined effects of

- temperature and relative humidity,» *ScienceDirect*, vol. 22, July 2025.
- [8] A. Moro y L. .. Fabrizio, «Carbonation of concrete: the role of CO₂ concentration,» *Materials and Structures*, 10 Agosto 2016.
- [9] C. Sagar, A. Chauhan y U. K. Sharma, «Synergistic effect of carbonation and cast-in-chlorides on corrosion initiation in reinforced concrete,» *ScienceDirect*, vol. 72, 2025.
- [10] E. Possan, E. Felix y W. A. Thomaz, «CO₂ uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures,» *J Build Rehabil*, 2016.
- [11] P. Diego, R. Jhonny, S. Dinora y S. P. Mariana, «ESTIMACIÓN DE DAÑOS OCASIONADOS POR LA,» *Gaceta Tecnica*, pp. 88 - 106, 2022.
- [12] B. Chinè-Polito, R. Cuevas-Kauffmann, R. Jiménez-Salas y G. Ortiz-Quesada, «Estudio experimental de la,» *Tecnología en Marcha*, vol. 32, pp. 68 - 81, Abril - Junio 2019.
- [13] A. R. C. Silva, G. Fajardo y J. M. Mendoza-Rangel, «ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL AVANCE DE,» *CONCRETO Y CEMENTO. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO*, vol. 8, n° 1, pp. 14 - 34, 30 Octubre 2016.
- [14] P. Hajibabae, A. Behnood, T. Ngo y E. M. Golafshani, «Carbonation depth assessment of recycled aggregate concrete: An application of conformal prediction intervals,» *ScienceDirect*, vol. 268, 5 April 2025.
- [15] K. Khadka, M. Usman, M. A. Mojahidul y MdAbdur, «Accelerated Carbonation Of Concrete For Carbon,» *Noeth American Academic Research*, 19 Diciembre 2024.
- [16] E. A. de Oliveira, M. J. Guerreiro y I. & D. M. A. P. Abreu, «ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS of CO₂ ABSORPTION BY PERVIOUS,» *CO₂ Environmental Implications of CO₂ Absorption by Pervious Concrete Pavement in Urban Roads. In XIII CTV 2019 Proceedings: XIII International Conference on Virtual City and Territory: "Challenges and paradigms of the contemporary city"*, 21 12 2019.
- [17] M. Wadile, P. H. Joshi y P. R. Pawar, «Experimental Study to Reduce Carbonation Effect on,» *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, vol. 11, pp. 635 -640, 02 07 2023.
- [18] E. Chávez-Ulloa, T. P. López, J. R. Trujeque y F. C. Pérez, «Deterioro de estructuras de concreto por carbonatación en medio ambiente marino tropical y cámara de carbonatación acelerada,» vol. 36, n° 2, pp. 104 -113, 2013.
- [19] L. P. Urea y A. Celis, «Impactos de la contaminación por Dióxido de Carbono en la utilización de concretos y».
- [20] M. Jedidi, «Carbonation of Concrete: Measurement and Repair,» *Civil Engineering and Architecture*, vol. 12, n° 5, 23 Agosto 2024.
- [21] Q. Qiu, «Una revisión del estado del arte sobre el proceso de carbonatación en materiales cementosos: Fundamentos y técnicas de caracterización,» *ScienceDirect*, vol. 247, 30 Junio 2020.
- [22] ICONTEC, «Método de ensayo para el asentamiento del concreto fresco,» *Norma Técnica Colombiana NTC 3967*, 2013.
- [23] A. International, «Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete,» *ASTM C143 / C143M – 20*, 2020.
- [24] ICONTEC, «Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio,» *Norma Técnica Colombiana NTC 1377*, 2007.
- [25] A. International, «Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,» *ASTM C192 / C192M – 19*, 2019.
- [26] I. N. d. V. (INVIAS), «Método de ensayo para determinar la profundidad de carbonatación en el concreto endurecido,» *Norma INV E-213-13*, 2013.
- [27] D. S. d. Guzmán, *TECNOLOGIA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO*, Santafé de Bogota, D.C Colombia: Bhandar Editores Ltda., 1986.
- [28] (ICONTEC) y C. T. 3. (. y. Arquitectura), «NTC 92 – Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados,» *Norma técnica colombiana*, 1995.
- [29] M. d. T. -. S. 2. nstituto Nacional de Vías (INVÍAS) y c. t. d. a. pétreos, «INV E-222 – Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino,» *Norma técnica de ensayo para carreteras*, 2013.
- [30] ICONTEC y m. a. y. g. Comité Técnico 369901 – Concretos, «NTC 1776 – Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad evaporable de los agregados,» *Norma técnica colombiana*, 2019.
- [31] C. d. l. R. d. Colombia, «Ley 1581 de 2012 – Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales,» 2012.
- [32] G. Nacional, «Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10),» 2010.