

Título del Trabajo:

“Desarrollo y evaluación experimental de un concreto permeable modificado con carbón activado para la captación de CO₂ y mitigación de inundaciones urbanas”

Nombre del autor: Hernández Cruz Juan Pablo

Fecha: 04/11/2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 26 de noviembre de 2025

Número de control: ICBI-D/3025/2025

Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Juan Pablo Hernández Cruz**, quien presenta el trabajo de titulación **“Desarrollo y evaluación experimental de un concreto permeable modificado con carbón activado para la captación de CO₂ y mitigación de inundaciones urbanas”**, ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Mtro. Mauricio Guerrero Rodríguez

Secretario: Dr. Luis Daimir López León

Vocal: Dr. Iván Erick Castañeda Robles

Suplente: Mtra. Valeria Volpi León

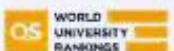
Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.



Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director de ICBI

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
dirección_icbi@uah.edu.mx, vergarar@uah.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uah.edu.mx

Glosario de términos

Adsorción: Fenómeno físico-químico en donde las moléculas de gases o líquidos se adhieren a la superficie de un material sólido.

Agregado fino: Material granular con tamaño menor a 4.75 mm.

Agregado grueso: Partículas pétreas con un tamaño superior a 4.75 mm, menor a 3”.

Cámara de carbonatación: Equipo cerrado que simula un ambiente con dióxido de carbono controlado.

Carbonatación: Reacción que tiene el dióxido de carbono atmosférico con el hidróxido de calcio y otros productos de hidratación del cemento, formando carbonato de calcio y agua.

Coeficiente de permeabilidad: Magnitud que expresa la velocidad con la que un fluido atraviesa un medio poroso bajo un gradiente de presión.

Curado: Proceso de conservación de la humedad y temperatura del concreto después del vaciado para permitir la hidratación completa del cemento y el desarrollo de su resistencia.

Difracción de rayos X (XRD): Técnica físico-química usada para identificar las fases cristalinas presentes en el concreto y cuantificar el grado de carbonatación.

Difusión de CO₂: Movimiento del dióxido de carbono a través de los poros del concreto.

EIS: Técnica no destructiva que aplica una señal alterna de baja amplitud a un sistema electroquímico para medir su impedancia compleja.

Electrodo de referencia: Elemento con potencial electroquímico estable usado como punto de comparación en las mediciones de potencial de corrosión.

Electrodo de trabajo: Parte del sistema electroquímico en la que ocurre la reacción de interés. En este caso, la varilla de acero embebida en el concreto.

Electrodo auxiliar o contraelectrodo: Electrodo inerte usado para cerrar el circuito durante las pruebas electroquímicas y permitir el paso de corriente.

Fenolftaleína: Indicador ácido-base que cambia de color rosa a incoloro ante la presencia de dióxido de carbono.

Granulometría: Distribución de los tamaños de partículas en los agregados.

Hidratación del cemento: Serie de reacciones químicas entre el cemento y el agua que produce compuestos hidratados que confieren resistencia al concreto.

Humedad relativa: Relación entre la cantidad de vapor presente en el aire y la máxima que puede contener a la misma temperatura.

Impedancia: Resistencia total que opone un sistema electroquímico al paso de una corriente alterna. Se mide en ohmios y se analiza mediante diagramas de Nyquist o Bode.

Matriz cementante: Fase continua formada por los productos de hidratación del cemento que rodea y une los agregados. Su microestructura determina la resistencia, durabilidad y capacidad de difusión de gases del concreto.

OCP: Técnica electroquímica que mide el potencial natural del acero embebido en concreto respecto a un electrodo de referencia sin aplicar corriente externa.

pH: Nivel de alcalinidad de la pasta cementante.

Permeabilidad: Propiedad del concreto para permitir el paso del agua a través de sus poros interconectados.

Portlandita: Producto secundario de la hidratación del cemento portland.

Potencial de corrosión (Ecorr): Valor medido del potencial del acero frente a un electrodo de referencia.

Relación agua/cemento: Proporción entre la masa de agua y la de cemento en la mezcla que controla la trabajabilidad, la porosidad y resistencia final del concreto.

Sistema de tres electrodos: Configuración empleada en ensayos electroquímicos compuesta por el electrodo de trabajo, electrodo de referencia y contraelectrodo.

Superficie específica: Área total de contacto disponible por unidad de masa de un sólido.

Termogravimetría (TGA): Técnica que mide la variación de masa de una muestra al aumentar la temperatura.

Índice

Capítulo 1	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Específicos	5
1.5. Hipótesis	5
1.6. Alcances	6
1.7. Limitaciones	6
Capítulo 2. Marco Teórico	7
2.1. Concreto permeable	7
2.1.1. Definición	7
2.1.2. Aplicaciones	7
2.1.3. Propiedades	9
2.2. Carbón activado	13
2.2.1. Características	13
2.2.2. Adsorción	13
2.2.3. Aplicaciones ambientales	14
2.3. Carbonatación del concreto	15
2.3.1. Mecanismos	15
2.3.2. Indicadores	16
2.3.3. Factores que afectan la carbonatación	19
2.4. Determinación de la profundidad de carbonatación	20

Capítulo 3. Metodología Experimental	28
3.1. Diseño de concreto permeable con adición de carbón activado	28
3.1.1. Carbón activado.....	28
3.1.2. Arena.....	29
3.1.3. Cemento	29
3.1.4. Agua	30
3.1.5. Grava	30
3.1.6. Dosificaciones y mezclas	31
3.2. Elaboración de especímenes.....	33
3.2.1. Prueba de granulometría	33
3.2.2. Elaboración de cilindros de concreto con carbón activado	33
3.2.3. Núcleos de concreto	35
3.2.4. Muestras de concreto para captación de CO₂.....	36
3.3 Construcción y configuración de la cámara de carbonatación	37
3.3.1. Descripción del sistema	37
3.3.2. Calibración de sensores de CO₂ Y Humedad relativa.....	39
3.3.3. Control de variables internas	41
3.4. Evaluación de resistencia a la compresión de cilindros.....	42
3.5. Prueba de Permeabilidad	43
3.6. Prueba de captación de CO₂	44
3.7. Exposición de núcleos en la cámara de carbonatación.....	45
3.8. Medición electroquímica de corrosión por carbonatación.....	46
3.9. Evaluación de profundidad de carbonatación (fenolftaleína)	47
Capítulo 4. Resultados y Discusión	48

4.1. Desempeño del concreto con carbón activado versus concreto convencional.....	48
4.2. Resultados de la prueba de granulometría.....	53
4.3 Evaluación experimental de la permeabilidad de concreto	58
4.4. Comportamiento de la captura de CO₂ y variación en la profundidad de carbonatación.....	60
4.5. Resultados de la captación de CO₂.....	65
4.6. Análisis comparativo de las propiedades electroquímicas.....	67
4.6.1 Potencial a circuito abierto.	68
4.6.2 Impedancia de espectroscopia electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés)	72
4.7. Discusión técnica y viabilidad práctica de uso en el sector construcción	75
Capítulo 5. Conclusiones.....	75
5.1. Conclusiones Generales.....	75
5.2. Recomendaciones	77
Referencias	79
Referencias bibliográficas de figuras.....	86

Lista de Figuras

Figura 1. Concretos permeables usados en estacionamientos, estadios de futbol, caminos peatonales y tránsito ligero. (CEMEX, 2025), (CEMEX, 2023), (VerdeCreto 2020) y (VerdeCreto, 2020).....	8
Figura 2. Gráficas de granulometría de concreto permeable (a) con los agregados B1D, B1U, B0D y BOU; junto con el sedimento utilizado (b) por Barreto et al. (2023).	12
Figura 3. Microscopía de carbón activado e imagen de carbón activado. Cruz Cerro et al. (2016) y Garden Central. (2020).	13

Figura 4. Microscopía de muestra de carbón activado por Zhao et al. (2015).....	15
Figura 5. Representación del proceso de carbonatación por Alnahhas, F. (2023).....	16
Figura 6. Ejemplo de la aplicación de fenolftaleína en una probeta recién partida de concreto por Osorio, J. D. (2023).....	17
Figura 7. Representación del modelo TGA por (Granados Cristancho, 2015).....	18
Figura 8. Funcionamiento de la tecnología de XRD por 911 Metallurgist. (2024).....	18
Figura 9. Diagrama esquemático de Celda utilizada para los análisis de EIS y Tafel por Ortiz, C. (s. f.).....	19
Figura 10. Potenciales de corrosión medidos mediante media celda, técnica de medición tomada de la norma ASTM C876-91.....	23
Figura 11. Medición de potencial de corrosión por CJE Ingenieros. (2018).....	24
Figura 12. Modelo gráfico de la prueba EIS por Peña Caravaca et al., (2023).....	24
Figura 13. Cámara de carbonatación acelerada comercial por Campos Silva, A. R., Fajardo San Miguel, G., & Mendoza-Rangel, J. M. (2016).....	26
Figura 14. Cámara de carbonatación in vitro para la evaluación de los especímenes de concreto permeable modificados.....	27
Figura 15. Elaboración y curado de especímenes de concreto permeable con carbón activado.	34
Figura 16. Representación de los núcleos de concreto elaborados.	35
Figura 17. Núcleos de concreto A, B y C.....	36
Figura 18. Muestras de concreto para la prueba de captación de CO ₂	37
Figura 19. Diseño de la cámara de carbonatación acelerada in vitro con sus especificaciones técnicas y manejo.	39
Figura 20. Cámara de carbonatación in vitro fabricada de acuerdo a las especificaciones establecidas previamente.	39
Figura 21. Medidor de dióxido de carbono Air Detector modelo MF1-017.....	40
Figura 22. Máquina y cilindro para la prueba de compresión.....	42

Figura 23. Adaptación de permeámetro hecha a base de PVC.....	44
Figura 24. Adaptación del dispositivo de medición de retención de CO ₂ de concreto permeable con carbón activado.	45
Figura 25. Núcleo de concreto B expuesto en la cámara de carbonatación in vitro.....	46
Figura 26. Núcleo de concreto rociado con fenolftaleína.....	48
Figura 27. Tipos de fractura en cilindros de concreto. Fuente: NMX-C-083-ONNCCE-2014.	51
Figura 28. Curva granulométrica obtenida del agregado utilizado.	54
Figura 29. Comparativa de la curva granulométrica obtenida con la curva de Barreto et al. (2023).	57
Figura 30. Representación de la cámara de carbonatación acelerada.	61
Figura 31. Medición de potencial a circuito abierto de especímenes de concreto armado convencionales y permeables.	68
Figura 32. Potencial de corrosión Ecorr, a potencial de circuito abierto de varillas de acero embebidos en concretos convencionales y permeables sin y con adición de carbón activado (2 y 5 %).	71
Figura 33. Módulo de fase de EIS de especímenes de concreto reforzado en cámara de carbonatación diseñada.....	73
Figura 34. Ángulo de fase de EIS de especímenes de concreto reforzado en cámara de carbonatación diseñada.....	73
Figura 35. Diagrama de Nyquist de EIS de especímenes de concreto reforzado en cámara de carbonatación diseñada.....	74

Lista de Tablas

Tabla 1. Diseños de concretos permeables revisados en la literatura, Fuente: Li, Zhang, & Jiang, (2021), Sandoval Chambi, (2021) y Singh et al. (2016)	11
Tabla 2. Diseño de concreto permeable y propiedades revisadas en la literatura, Fuente: Juárez Cardozo (2019).....	12

Tabla 3. Interpretaciones de profundidad de carbonatación por Félix, Carrazedo, & Possan, (2017)	21
Tabla 4. Comparativa entre los métodos de Potencial de corrosión y EIS.....	25
Tabla 5. Dosificación de concreto permeable en base a Li, X., Zhang, Y., & Jiang, H. (2021) con la adición de un 2 % y 5 % de carbón activado de manera experimental.....	31
Tabla 6. Propiedades básicas de la dosificación de concreto permeable.....	32
Tabla 7. Dosificación de concreto simple clase II de 250 kg/cm ² por CEMEX (2025).....	32
Tabla 8. Resultados de calibración de sensor de humedad (HR) y CO ₂ , obtenidos durante las pruebas.....	41
Tabla 9. Rangos de permeabilidad por Nazeer et al., (2020), Zhu et al., (2020) y Moretti et al. (2020).....	44
Tabla 10. Resultados de la prueba de resistencia realizada a los especímenes de concreto convencional, patrón y permeables al 2 % y 5 % de carbón activado.....	49
Tabla 11. Fracturas registradas durante la prueba de compresión de los especímenes de concreto permeable.....	51
Tabla 12. Distribución de las partículas a lo largo de los tamices empleados, así como las cantidades de material retenido y acumulado.....	54
Tabla 13. Límites de granulometría para agregado fino según la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018.	55
Tabla 14. Límites granulométricos del agregado grueso, en masa, en porcentaje que pasa de acuerdo a la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018.....	56
Tabla 15. Resultados obtenidos de la prueba de permeabilidad de las probetas de concreto permeable.	59
Tabla 16. Resultados de las mediciones de radios en los núcleos de CM1, CM2, Muestra patrón y Concreto convencional mediante el uso de las ecuaciones 3 y 4.	62
Tabla 17. Resultados de la medición de captación de CO ₂ en las muestras modificadas 1, 2 y patrón.....	65

Resumen

Las ciudades a nivel global enfrentan problemas de escurrimientos pluviales, inundaciones y cambio climático, debido a la impermeabilización del suelo, el incremento de gases de efecto invernadero (principalmente el CO₂), y las lluvias torrenciales. El concreto permeable ha sido una alternativa para favorecer la infiltración; sin embargo, su alta porosidad puede comprometer sus propiedades mecánicas y su durabilidad. El carbón activado es un material con una elevada área específica y química superficial que favorece a la adsorción de contaminantes, por lo que su incorporación al concreto permeable, podría contribuir a la reducción de CO₂ en ambientes urbanos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de añadir 2 % y 5 % de carbón activado (en volumen respecto al cemento) sobre el desempeño hidráulico, mecánico, de durabilidad y electroquímico en mezclas de concreto permeable, al igual que su capacidad de captura de CO₂. Se diseñaron prototipos experimentales con una mezcla patrón y dos modificadas. Se hicieron mediciones de sus propiedades principales: permeabilidad hidráulica mediante el método de carga variable, resistencia a la compresión a edades normativas, carbonatación por fenolftaleína y ensayos electroquímicos como el potencial de corrosión de circuito abierto y EIS bajo una exposición controlada de dióxido de carbono. La captura de CO₂ se estimó en un dispositivo de flujo entrada/salida a partir de la variación de concentración. De manera general, las mezclas de carbón activado mantuvieron una alta permeabilidad y una resistencia adecuada para aplicaciones no estructurales, mostrando además un aumento consistente en la reducción de CO₂ frente a la muestra patrón. La mezcla con una adición de 5 % presentó mayor carbonatación, coherente con su microestructura más abierta, mientras que la mezcla con un 2 % ofreció un mejor equilibrio entre adsorción de CO₂, permeabilidad y resistencia. Estos resultados respaldan la viabilidad del concreto permeable modificado con carbón activado para infraestructura peatonal y captación pluvial, aportando criterios de diseño y evaluación reproducibles para su implementación.

Palabras clave: concreto permeable, carbón activado, adsorción de CO₂, carbonatación, permeabilidad hidráulica.

Abstract

Cities worldwide face problems of stormwater runoff, flooding, and climate change due to soil impermeability, increased greenhouse gases (primarily CO₂), and torrential rains. Permeable concrete has been an alternative to promote infiltration; however, its high porosity can compromise its mechanical properties and durability. Activated carbon is a material with a high specific surface area and surface chemistry that favors the adsorption of pollutants, so its incorporation into permeable concrete could contribute to CO₂ reduction in urban environments. The objective of this work was to evaluate the effect of adding 2% and 5% activated carbon (by volume relative to cement) on the hydraulic, mechanical, durability, and electrochemical performance of permeable concrete mixes, as well as their CO₂ capture capacity. Experimental prototypes were designed with a standard mix and two modified mixes. Measurements were taken of the main properties of the concrete: hydraulic permeability using the falling head method, compressive strength at standard ages, carbonation by phenolphthalein, and electrochemical tests such as open-circuit corrosion potential and EIS under controlled carbon dioxide exposure. CO₂ uptake was estimated in an inlet/outlet flow device based on concentration variations. Overall, the activated carbon mixtures maintained high permeability and adequate strength for non-structural applications, also showing a consistent increase in CO₂ reduction compared to the control sample. The mixture with a 5% addition exhibited greater carbonation, consistent with its more open microstructure, while the mixture with 2% offered a better balance between CO₂ adsorption, permeability, and strength. These results support the viability of activated carbon-modified permeable concrete for pedestrian infrastructure and rainwater harvesting, providing reproducible design and evaluation criteria for its implementation.

Keywords: Permeable concrete, activated carbon, CO₂ adsorption, carbonation, hydraulic permeability.

Capítulo 1

1.1. Introducción

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos para el sector de la construcción al demandar materiales y técnicas que reduzcan su impacto ambiental y promuevan la sostenibilidad. Las actividades constructivas generan una cantidad significativa de emisiones de gases de invernadero, especialmente dióxido de carbono, el cual es uno de los principales gases que contribuyen al efecto invernadero y al aumento de la temperatura global por consecuencia (Banco Bilbao Vizcaya Argentaria Research, 2024). Estas emisiones provienen principalmente de la producción de cemento, el transporte y la operación de edificaciones, representando el 8 % de la producción global de CO₂ (Scott, 2025). En este contexto, se ha impulsado el desarrollo de materiales que puedan tener un menor impacto en el medio ambiente y con la capacidad de interactuar con gases de invernadero como el CO₂ atmosférico.

El concreto permeable ha sido implementado para promover la infiltración de agua pluvial al subsuelo, permitiendo disminuir los escurrimientos superficiales y contribuir a la recarga de los mantos acuíferos (Hu et al., 2018). No obstante, su alta porosidad puede comprometer las propiedades mecánicas y la durabilidad de este sistema si no se controlan las proporciones de la mezcla. Por ello, diferentes investigaciones se han enfocado en optimizar sus características mediante el uso de aditivos, agregados modificados o materiales de alta capacidad adsorbente (Campos Silva et al., 2016).

En México, una de las problemáticas más relevantes son las inundaciones recurrentes en gran parte del territorio, las cuales se han vuelto un problema importante en zonas urbanas debido a la indiscriminada impermeabilización del suelo y a los sistemas de drenaje insuficientes (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2024). Esta situación ha impulsado el interés por el desarrollo de tecnologías capaces de mejorar la gestión pluvial y reduzcan la vulnerabilidad urbana ante eventos extremos. En la ciudad de Pachuca, por ejemplo, la remodelación del Parque David Ben Gurión contempla la instalación de 100 000 m² de concreto permeable, permitiendo la filtración de agua pluvial al subsuelo y contribuyendo a la conservación de los recursos hídricos (El Sol de Hidalgo, 2024).

Por otra parte, el CO₂ no solo agrava el cambio climático, sino que también puede aprovecharse en materiales cementantes mediante procesos de captura y adsorción. El carbón

activado es conocido por su alta área superficial y su capacidad de adsorción de contaminantes gaseosos y acuosos, propiedades que pueden ser aprovechadas en matrices cementantes (Kaur et al., 2021). Su incorporación en el concreto permeable no solo puede favorecer la captura de CO₂, sino que también modificar la microestructura del material, influyendo en el proceso de carbonatación y en los procesos electroquímicos asociados a la durabilidad (Muñoz Morles & Henao Aristizábal, 2023). Estudios previos han demostrado que es posible mantener una permeabilidad elevada y una resistencia mecánica adecuada para el tránsito ligero mediante el ajuste de la granulometría y la relación agua/cemento (Barreto Sandoval et al., 2023; Bui et al., 2023).

El uso de estas tecnologías en México, pueden implementarse de manera experimental en proyectos de pavimentación permeable y gestión pluvial urbana, de igual manera existe un amplio campo en la mejora para su adaptación a condiciones locales. En este contexto, la presente investigación busca desarrollar y evaluar un concreto permeable modificado con carbón activado, con el fin de mitigar inundaciones urbanas mediante su alta capacidad de infiltración y contribuir a la reducción de dióxido de carbono atmosférico a través de mecanismos de adsorción.

1.2. Planteamiento del problema

La urbanización acelerada en México ha generado una ocupación de territorio sin planeación ni control hidráulico, lo cual ha derivado en un aumento de impermeabilización del suelo urbano. En la zona metropolitana de la Ciudad de México, el 91.8 % del suelo urbano ya se encuentra edificado y las áreas urbanas crecieron 21 % entre 2005 y 2014, con una proyección de incremento de 27 % para 2024 (Cruz-Bello, Galeana-Pizaña & González-Arellano, 2023). Este fenómeno impide que el agua pluvial pueda infiltrarse de manera natural hacia el subsuelo, incrementando la escorrentía superficial y provocando inundaciones mucho más frecuentes en zonas urbanas, de acuerdo a la (Comisión Nacional del Agua, 2021), el cambio de uso de suelo refleja un aumento en las superficies selladas, lo que limita la infiltración y, en consecuencia, favorece la escorrentía superficial y el riesgo de inundaciones urbanas.

Paralelamente, la industria de la construcción se ha consolidado como una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, siendo el CO₂ uno de los gases

que mayor presencia ha tenido a nivel nacional, contribuyendo al cambio climático y provocando un deterioro en la calidad del aire en zonas metropolitanas (El Economista, 2022).

En este contexto, el concreto permeable ha sido una solución muy eficiente para la gestión sostenible del agua pluvial. Este material permite la infiltración del agua hacia el subsuelo, reduciendo en gran medida la carga de los sistemas de drenaje urbano y ayudando a prevenir inundaciones (Buitrago & Rosas Acero, 2021). Sin embargo, su uso en México sigue siendo limitado debido a la falta de normativas relacionadas al concreto permeable y conocimiento técnico, hasta ahora, no se ha explotado ampliamente su potencial para captar gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono.

Ante esta situación, es necesario explorar materiales con beneficios ambientales adicionales. El carbón activado, conocido por su alta porosidad y capacidad de adsorción de gases, ha sido utilizado en diversas aplicaciones ambientales. Su incorporación en mezclas cementantes representa una oportunidad innovadora para desarrollar materiales de construcción multifuncionales, capaces de contribuir a la mitigación del cambio climático mediante la captura de dióxido de carbono (Liu et al., 2022).

Por lo tanto, se plantea la necesidad de evaluar experimentalmente la viabilidad de un concreto permeable con adición de carbón activado en cierto porcentaje que funcione de manera dual al infiltrar el agua pluvial y captar CO₂ atmosférico. Esta investigación busca aportar evidencia científica local que permita ampliar el uso de tecnologías sostenibles en el sector de la construcción, y responder a los retos urbanos y climáticos actuales en México.

1.3. Justificación

En el contexto actual del cambio climático, la industria de la construcción constituye uno de los sectores con mayor impacto ambiental a nivel mundial. Este sector es responsable de una proporción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la impermeabilización extensiva del suelo y de la generación masiva de residuos sólidos, además de contribuir a la contaminación de cuerpos de agua y suelos. Ante este panorama, resulta indispensable impulsar el desarrollo de materiales y tecnologías constructivas que no solo mantengan la funcionalidad y viabilidad económica, sino que también sean sostenibles y coherentes con los principios de la economía circular.

En 2019, México generó aproximadamente 737 millones de toneladas de dióxido de carbono, ubicándose entre los 13 países con mayores emisiones del planeta (La Jornada, 2021). De este total, se estima que cerca del 50 % se relaciona directa o indirectamente con actividades del sector de la construcción (El Economista, 2022), lo que repercute en el deterioro de la calidad del aire y en el incremento del calentamiento global.

Diversos estudios confirman que el aumento en la concentración atmosférica de CO₂ está directamente vinculado con procesos antropogénicos como la industrialización, el transporte y la generación de energía mediante combustibles fósiles (Totosaus, 2023). En el caso mexicano, esta acumulación ha modificado el equilibrio climático, generando fenómenos extremos como olas de calor, sequías prolongadas y variaciones en los patrones de precipitación que afectan la biodiversidad, la producción agrícola y la salud humana (Cuervo-Robayo et al., 2020).

A su vez, la expansión urbana descontrolada ha intensificado la impermeabilización del suelo, limitando la infiltración natural del agua pluvial y agravando problemas como inundaciones, erosión y reducción de la recarga de acuíferos. Estas condiciones, además de tener consecuencias hidrológicas, están asociadas con un aumento de la contaminación atmosférica y con el surgimiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, especialmente en poblaciones vulnerables (Arvizu Juvera et al., 2025).

Frente a este panorama, la presente investigación se justifica en la necesidad de reducir los impactos directos de la impermeabilización urbana y las emisiones de CO₂, principales causantes de inundaciones y contaminación ambiental. El desarrollo de concretos permeables modificados con carbón activado surge como una alternativa técnica, ambiental y económicamente viable, capaz de facilitar la infiltración pluvial y contribuir a la captura de CO₂.

Su relevancia radica en que integra la gestión del agua y la mitigación del cambio climático dentro de un mismo material constructivo, favoreciendo la transición hacia ciudades más sostenibles y resilientes. Además, aporta evidencia experimental para el diseño de soluciones basadas en principios de economía circular y eficiencia ambiental, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 y con las metas nacionales de acción climática.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar y evaluar un concreto permeable modificado con adición de carbón activado en diferentes proporciones, tomando como base dosificaciones previamente desarrolladas, con el propósito de analizar su desempeño en términos de: permeabilidad, resistencia mecánica, capacidad de adsorción de CO₂, resistencia ante la carbonatación y comportamiento electroquímico. De esta manera, se busca desarrollar un material con un propósito dual: disminuir el escurrimiento superficial y permitir la adsorción de dióxido de carbono.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Establecer una dosificación de concreto permeable modificada con una adición de carbón activado en diferentes porciones respecto al volumen total de la muestra (2 % y 5 %), basada en dosificaciones existentes de concretos permeables funcionales para que puedan servir como base.
- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los especímenes elaborados (granulometría, resistencia a la compresión y permeabilidad), a fin de evaluar el efecto del carbón activado en el desempeño estructural del material.
- Analizar la capacidad de adsorción de dióxido de carbono en muestras de concreto permeable modificadas con diferentes proporciones de carbón activado, mediante la exposición controlada en un dispositivo diseñado para permitir el flujo continuo del gas y la medición de su concentración de entrada y salida, con el fin de determinar la eficiencia de retención de CO₂ en la matriz cementante.
- Evaluar el comportamiento del concreto permeable modificado con carbón activado frente al proceso de carbonatación y su respuesta electroquímica, mediante mediciones de impedancia electroquímica (EIS) y aplicación de fenolftaleína al 1 %, con el propósito de determinar la influencia del carbón activado en la reactividad y durabilidad del material.

1.5. Hipótesis

La incorporación de distintos porcentajes de carbón activado en mezclas de concreto permeable influye directamente en sus propiedades mecánicas, como resistencia a la compresión, permeabilidad y capacidad de captación de CO₂, y modifica el equilibrio

estructural, la porosidad y la eficacia de adsorción de este gas de efecto invernadero en condiciones controladas de exposición.

1.6. Alcances

Este proyecto se enmarca en el campo de la ingeniería civil y se orienta al diseño y evaluación experimental de un concreto permeable modificado con carbón activado, concebido con un doble propósito: mejorar la gestión pluvial urbana y contribuir a la mitigación de contaminación ambiental mediante la captación parcial de dióxido de carbono.

En el ámbito técnico, el estudio abarca la formulación de mezclas con diferentes proporciones de carbón activado y la evaluación de su comportamiento mecánico, hidráulico y ambiental. Se analizarán variables como la resistencia a la compresión, la permeabilidad, la carbonatación y la retención de CO₂ bajo condiciones controladas de exposición, con el propósito de determinar la influencia del aditivo en el equilibrio entre resistencia, porosidad y capacidad de adsorción, aspectos fundamentales para el desempeño del concreto permeable.

Desde el punto de vista temático, la investigación se delimita a la fase experimental de laboratorio y no pretende establecer una normativa, sino generar evidencia técnica confiable que contribuya al conocimiento sobre materiales sostenibles y que sirva de referencia para estudios posteriores. Asimismo, los resultados podrán aplicarse en infraestructuras de tránsito ligero y sistemas de captación pluvial, como banquetas, jardines infiltrantes y pavimentos urbanos expuestos a gases de invernadero. En conjunto, este proyecto pretende ampliar la base científica sobre el uso de concretos permeables modificados con materiales adsorbentes, fortaleciendo la relación entre la ingeniería civil y la sostenibilidad ambiental, promoviendo un desarrollo de soluciones constructivas innovadoras y replicables en contextos urbanos vulnerables.

1.7. Limitaciones

El estudio presenta diversas limitaciones técnicas para abordar una caracterización más profunda de la microestructura del concreto y de la distribución interna del carbón activado.

Estas técnicas no se incluyen en el presente estudio debido a la falta de equipos como una máquina universal de tensión, microscopio electrónico de barrido (SEM), difractómetro de rayos x (XRD) o analizadores químicos de precisión.

En su lugar, se diseñaron dispositivos experimentales: una cámara de carbonatación acelerada, basada en la norma ISO 1920-12:2015, que expone el procedimiento para determinar la resistencia a la carbonatación del concreto mediante la exposición de especímenes de concreto en un ambiente controlado de dióxido de carbono y humedad; un permeámetro; y un sistema de flujo de inyección y control de flujo de CO₂. No obstante, el diseño y calibración de estos equipos requirió tiempo, materiales y ajustes, lo cual limitó la posibilidad de realizar pruebas prolongadas o replicadas en múltiples escenarios.

Finalmente, aunque se aborda el comportamiento físico, mecánico y ambiental del concreto permeable con carbón activado, el estudio no incluye la evaluación estructural a escala real, ni ensayos de desempeño en campo, por lo que los resultados deben interpretarse en un contexto experimental de laboratorio.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Concreto permeable

2.1.1. Definición

Un concreto permeable es aquel que tiene una relación de vacíos de entre el 15 %-30 % y su proceso de fabricación es similar al de un concreto convencional con la diferencia de que, para su fabricación, se requiere menos cemento y menos arena, teniendo una resistencia igual o menor a la de un concreto convencional (Coila Mamani & Condori Alejo, 2024).

En este mismo sentido, este material de construcción está diseñado para permitir el paso del agua a través de su estructura, que a diferencia del concreto convencional su composición es en su mayoría de agregado grueso y en algunos casos lleva una mínima proporción de agregado fino. Esto le otorga una porosidad mucho mayor que los concretos convencionales, lo que facilita la infiltración de agua, teniendo como principal función la de ser un suelo firme poroso según Juárez Cardozo, (2019).

2.1.2. Aplicaciones

El concreto permeable ha funcionado como una solución urbana sostenible, gracias a su capacidad de infiltración que ayuda a prevenir inundaciones por la impermeabilización del suelo. Su uso se ha diversificado en infraestructura capaz de soportar cargas ligeras como lo son

calles residenciales, ciclovías y banquetas. Estos espacios pueden ser aprovechados para la infiltración de agua al subsuelo, evitando de ese modo encharcamientos y facilitando el tratamiento natural de lluvias. Un ejemplo del uso del concreto permeable son algunos proyectos urbanos como el parque La Mexicana en la Ciudad de México, en donde la implementación de concreto permeable en senderos y explanadas contribuye a la infiltración y evita la escorrentía superficial, evitando la erosión del suelo y fomentando la recarga de mantos acuíferos (Juárez Cardozo, 2019).

Infraestructura como estacionamientos, ya han utilizado este tipo de concretos cubriendo extensas áreas en las cuales la impermeabilización del suelo genera repercusiones significativas sobre la infiltración natural del agua, caminos peatonales y de tráfico ligero que abarcan unos cuantos metros o kilómetros, estadios de futbol o canchas públicas en donde se puede aprovechar el espacio para la captación de aguas pluviales (Li, Zhang, & Jiang, 2021). Si bien el uso del concreto permeable está siendo aplicado en diversas obras de infraestructura, el uso de concretos permeables está limitado a resistencias de compresión bajas, en rangos de 30 kg/cm² hasta 280 kg/cm² (Ramírez et al., 2023), los nuevos estudios sobre este concreto se enfocan en alcanzar resistencias a las de concretos convencionales, eliminando una de sus limitaciones más significativas. En el caso de México, algunos ejemplos de estas infraestructuras se pueden ver en el parque Atizapan, Edomex, el andador Eduardo Molina en la Ciudad de México, el estacionamiento Liverpool Lindavista en la Ciudad de México y El estadio Bryant-Denny de la Universidad de Alabama. Obras realizadas por empresas como VerdeCreto y CEMEX (Véase figura 1).

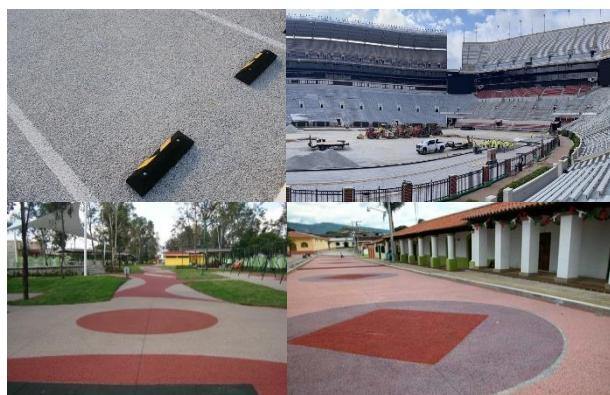


Figura 1. Concretos permeables usados en estacionamientos, estadios de futbol, caminos peatonales y tránsito ligero. (CEMEX, 2025), (CEMEX, 2023), (VerdeCreto 2020) y (VerdeCreto, 2020).

2.1.3. Propiedades

Por otro lado, el concreto permeable tiene la peculiaridad de tener una porosidad adecuada que permite una permeabilidad de 0.1 y 1.0 cm/s, aunque algunos diseños optimizados alcanzan valores de hasta 3.0 cm/s, lo cual es considerablemente superior al convencional (Carrasco Contreras, 2025). En cuanto a su resistencia mecánica, el concreto permeable tiene resistencias de entre 71 kg/cm² y 285 kg/cm², dependiendo de la dosificación que se maneje, el tipo de agregado, los aditivos y la calidad del curado (Cruz Díaz & Arana Pari, 2021). Si bien presentan una resistencia menor a las del concreto convencional, esta es suficiente para el tránsito ligero (banquetas, ciclovías, estacionamientos vehículos ligeros, etc.).

Para determinar la permeabilidad de los concretos, suele usarse la fórmula del Método de Carga Variable mostrada en la ecuación 1, que si bien, no se menciona en la norma ACI 522 R – 10 (Norma relacionada a la permeabilidad del concreto permeable), es aceptado al ser coherente con el comportamiento del concreto permeable (Ortiz-Marqués et al. 2025), este método permite conocer la cantidad de agua que pasa a través de estos sistemas. Muchos autores utilizan diversos métodos para el cálculo de esta propiedad, pero esta fórmula permite saber la permeabilidad de un concreto con ayuda del permeámetro de carga variable, dicha prueba debe ser realizada bajo condiciones de un flujo laminar.

$$k = \frac{l*a}{t*A} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \dots \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad (cm/s)

l = longitud de la probeta (cm)

A = Área de la probeta (cm²)

a = Área de la tubería de carga (cm²)

t = Tiempo en pasar de h_1 a h_2 (seg)

h_1 = Altura de la columna (cm)

h_2 = altura de la tubería de salida (cm)

Pueden existir 4 tipos de resultados, donde según Nazeer et al., (2020), un k menor a 0.0001 cm/s donde se dice que tiene una permeabilidad baja, Zhu et al., (2020), establece que $0.0001 \text{ cm/s} \leq k < 0.001 \text{ cm/s}$, es una permeabilidad propia de concretos convencionales, Moretti et al. (2020), menciona que $0.001 \text{ cm/s} \leq k < 0.1 \text{ cm/s}$, se tiene una permeabilidad adecuada para concretos permeables y de igual manera Nazeer et al., (2020), menciona que una permeabilidad de $0.1 \text{ cm/s} \leq k < 4.0 \text{ cm/s}$, es una permeabilidad típica de concretos permeables o pavimentos diseñados para una infiltración rápida.

Asimismo, otra propiedad que tiene esta clase de concreto es que ayudan a la regulación térmica urbana, ya que su superficie porosa permite que exista una mejor disipación del calor en comparación a concretos convencionales (Coila Mamani & Condori Alejo, 2024).

En particular, una de las principales características de esta clase de materiales es el tamaño de sus agregados ya que estos son los que determinarán el equilibrio entre resistencia y permeabilidad, los tamaños de estos agregados oscilan entre 4.75 mm y 12.5 mm , siendo más común entre los 9.5 mm y 12.5 mm según Li, X., Zhang, Y., & Jiang, H. (2021). El tamaño uniforme es fundamental para lograr una estructura estable y permeable, por lo que no se debe variar el tamaño de los agregados gruesos.

Siguiendo con esta línea, la consistencia de la mezcla, presenta una trabajabilidad limitada, teniendo revestimientos de entre 0 cm a 1 cm , esto debido a que su alto contenido de vacíos dificulta el acabado superficial y presenta una estructura chiclosa y brillante, esta clase de concretos requiere una colocación rápida y una compactación cuidadosa para conservar sus propiedades porosas y resistencia (Juárez Cardozo 2019).

Sumado a lo anterior, el módulo de elasticidad de un material se define como la relación que existe en el esfuerzo al que se está sometiendo un material y su deformación unitaria, lo que representa a la rigidez del material en cuestión ante una carga impuesta sobre este mismo. (Juárez Cardozo, 2019, p. 9).

A partir de las consideraciones teóricas, las dosificaciones del concreto permeable han sido ampliamente estudiadas en la literatura técnica y científica, muchas empresas han usado dosificaciones comerciales las cuales han sido probadas y demostrado su funcionalidad sin comprometer sus propiedades. Estas dosificaciones

suelen hacerse con cemento portland, agregados gruesos de granulometría controlada, una mínima cantidad de arena o ninguna, normalmente de 0.6 mm, agua (que si bien esta dada en las dosificaciones, muchas veces no son correctas para cada caso y se suele ajustar hasta tener una apariencia chiclosa y brillante), y en ocasiones aditivos especiales que mejoren sus propiedades físicas (Sandoval Chambi, 2021).

Según Li, Zhang, & Jiang, (2021), Sandoval Chambi, (2021) y Singh et al. (2016), una dosificación típica de concreto permeable consta de los siguientes datos proporcionados en la tabla 1:

Tabla 1. Diseños de concretos permeables revisados en la literatura, Fuente: Li, Zhang, & Jiang, (2021), Sandoval Chambi, (2021) y Singh et al. (2016).

Material	Cantidad kg/m³
Cemento	300-450
Grava de 4.75 mm a 9.5 mm	700-1500
Arena	0-76
Propiedades	Cantidades
Relación agua/cemento	0.27-0.35
Permeabilidad	2 mm/s a 40 mm/s
Resistencia	50 – 250 kg/cm ²

Además, otras proporciones son dadas por Juárez Cardozo (2019) que constan de datos muy similares como los que se presentan a continuación en la tabla 2:

Tabla 2. Diseño de concreto permeable y propiedades revisadas en la literatura, Fuente: Juárez Cardozo (2019).

Material	Cantidad kg/m ³
Cemento	313.16
Grava de 9.5 mm a 15.5 mm	700
Arena	0
Propiedades	Cantidad
Relación agua/cemento	0.59
Permeabilidad	1.8 mm/s
Resistencia	150 kg/cm ²

En la elaboración de un concreto permeable, la granulometría de los agregados resulta un factor determinante, pues en ella depende la porosidad que permite la infiltración del agua. Tal como señalan Barreto et al. (2023), el uso de agregados gruesos con diferentes configuraciones con tamaños máximos de 19 mm (B1D), tamaño único de 19 mm (B1U), agregado mal calibrado (B0D) y tamaño único de 10 mm (B0U); favorece la formación de una estructura porosa e interconectada. Esta distribución granulométrica, asegura un equilibrio adecuado entre permeabilidad e integridad mecánica, lo que justifica la inclusión de los gráficos presentados en la Figura 2, donde se ilustra cómo la selección de tamaño del agregado influye directamente en las propiedades hidráulicas y de la durabilidad del concreto permeable en aplicaciones urbanas.

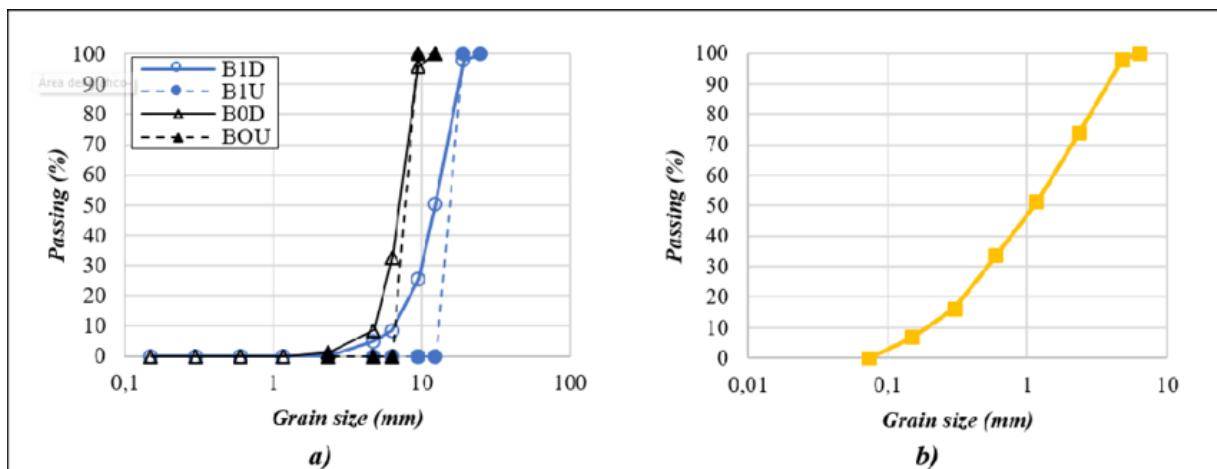


Figura 2. Gráficas de granulometría de concreto permeable (a) con los agregados B1D, B1U, B0D y B0U; junto con el sedimento utilizado (b) por Barreto et al. (2023).

2.2. Carbón activado

2.2.1. Características

El carbón activado es un material producto de la carbonización de elementos orgánicos mediante métodos físicos (altas temperaturas con gases oxidantes) o con agentes químicos (agentes deshidratantes), para poder desarrollar una serie de microporos y mesoporos los cuales tienen la capacidad de atrapar gases como el dióxido de carbono, líquidos y microorganismos en cierta medida (véase figura 3), por lo que su implementación dentro de un concreto permeable puede ser posible y tener una utilidad adicional a su capacidad de infiltración de aguas pluviales, abriendo la posibilidad de poder captar el agua y filtrar en cierta medida así como para poder captar gases de efecto invernadero los cuales pueden ser perjudiciales para el ecosistema (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006).



Figura 3. Microscopía de carbón activado e imagen de carbón activado. Cruz Cerro et al. (2016) y Garden Central. (2020).

2.2.2. Adsorción

Cabe resaltar que, la capacidad del carbón activado para adsorber CO₂ depende de varios factores, como puede ser su porosidad, el área superficial y la química superficial del material, específicamente los microporos con tamaños menores a 2 nm son los más indicados para la adsorción de este gas, debido al tamaño de las moléculas del mismo gas y su preferencia a acoplarse a cavidades reducidas de este tamaño (Zhu et al., 2018).

Por otra parte, el proceso de obtención del carbón activado es principalmente a base de materiales orgánicos o biomasa, la cual puede someterse a procesos físicos o químicos para su obtención, siendo la desorción térmica la forma más común de obtener este material, partiendo de residuos vegetales como cáscaras de café, hojas, cáscara de coco y residuos agroindustriales, por lo que su producción puede ser circular. (Ben-Mansour et al., 2016).

Algunas de las propiedades del carbón activado para la captación de CO₂ son las siguientes:

- Superficie específica: El carbón activado posee una superficie específica que puede llegar a los 1500 m²/g, lo que le otorga una excelente capacidad de adsorción (Shawnim & Mohammad, 2019).
- La capacidad de adsorción de CO₂: El carbón activado es eficiente para adsorber gases como el CO₂, especialmente en presencia de humedad, lo que lo hace adecuado para ambientes donde el concreto permeable está expuesto al aire y al agua de lluvia (Padrón *et al.*, 2013).

2.2.3. Aplicaciones ambientales

La implementación de carbón activado dentro de un concreto permeable, puede mejorar en cierta medida las propiedades de captura de este gas de invernadero, según estudios recientes, se ha demostrado que la incorporación de carbón activado en un 4%, 6% y 8% del volumen total de un concreto convencional, garantiza que sus propiedades no sean alteradas en gran medida, aunque podría ser perjudicial usar valores elevados en concretos permeables donde sus propiedades son diferentes a las del concreto convencional, permitiendo incrementar su capacidad de captura de gases por las propiedades mismas del carbón activado (Culque & Sanchez, 2023).

Algunos efectos que puede tener en la mezcla son los siguientes:

- Porosidad: La adición de carbón activado puede incrementar ligeramente la porosidad del concreto, favoreciendo aún más su capacidad de infiltración de agua, lo que es beneficioso en aplicaciones donde se busca un alto grado de permeabilidad.
- Resistencia a compresión: La resistencia a la compresión del concreto puede verse ligeramente afectada, por lo que es importante equilibrar la dosificación del carbón activado para mantener las propiedades mecánicas adecuadas, mediante el uso de aditivos o la modificación de la cantidad de agua.

Por otro lado, cabe subrayar que, el carbón activado es un material ampliamente reconocido por su alta porosidad y su superficie específica, lo que confiere una gran capacidad para poder adsorber diversos contaminantes ambientales (véase figura 4). La estructura microporosa facilita la captación de moléculas contaminantes como los gases de dióxido de

carbono, compuestos orgánicos volátiles y materiales pesados presentes en el agua y aire (García Cabal, 2022).

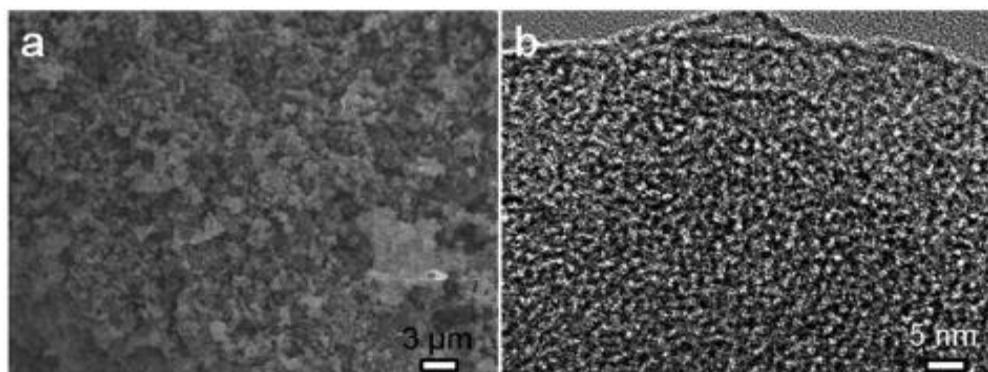


Figura 4. Microscopía de muestra de carbón activado por Zhao et al. (2015).

Desde un punto de vista ambiental, el carbón activado presenta una gran contribución a la reducción de contaminantes gracias a procesos fisicoquímicos de adsorción con ayuda de sus poros microscópicos, en donde las moléculas de contaminantes volátiles como el dióxido de carbono se adhieren a la superficie sin alterar su estructura química según el mismo autor.

2.3. Carbonatación del concreto

2.3.1. Mecanismos

La carbonatación del concreto es un proceso químico mediante el cual el dióxido de carbono (CO_2) presente en el aire reacciona con los compuestos de hidratados de cemento, principalmente el hidróxido de carbono ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), para formar carbonato de calcio (CaCO_3) y agua (H_2O). Este fenómeno ocasiona una disminución del pH de la pasta cementante, lo que puede comprometer la carga pasiva que protege al acero de refuerzo y, en consecuencia, favorece la corrosión del mismo (Chiné-Polito et al., 2019).

Aunque el proceso de carbonatación se considera uno de los principales mecanismos de deterioro del concreto armado, su comprensión y control permiten aprovecharla parcialmente como mecanismo de captura de CO_2 , siempre que se limite a la superficie del material y que no afecte el refuerzo interno. De acuerdo con Bui et al. (2023), la velocidad de carbonatación depende de la difusión del gas de dióxido de carbono a través de los poros del concreto, la cual se ve favorecida por condiciones de humedad intermedia, cercanas al 70 %.

En concretos permeables, la estructura altamente porosa es más abierta y la mayor conectividad de sus poros permiten una distribución más rápida de CO₂, lo que incrementa la formación superficial de carbonatos. Si a esta matriz se le incorpora carbón activado, material con una elevada área específica y afinidad por los gases, puede potenciar la adsorción y la posterior reacción del dióxido de carbono con los productos de cemento. No obstante, este aumento en la permeabilidad y la reactividad debe controlarse cuidadosamente, ya que la carbonatación excesiva, podría reducir la alcalinidad del sistema y comprometer su durabilidad a largo plazo (véase figura 5).

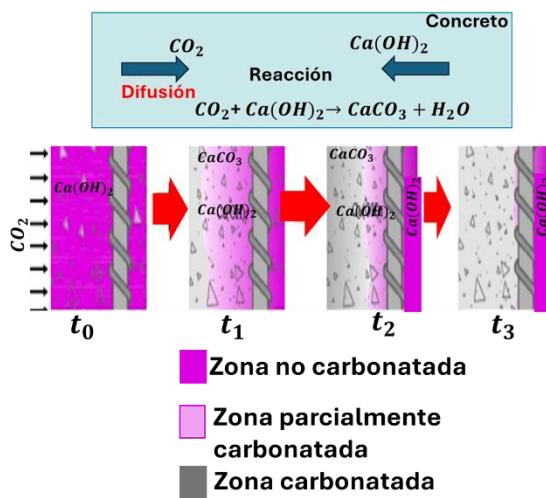


Figura 5. Representación del proceso de carbonatación por Alnahhas, F. (2023).

2.3.2. Indicadores

La evaluación del proceso de carbonatación del concreto puede realizarse mediante métodos químicos, físico-químicos y electroquímicos, los cuales permiten determinar la extensión y los efectos del proceso tanto sobre la matriz cementante como el acero de refuerzo.

El método químico más común y el más utilizado es el ensayo con fenolftaleína al 1 % indicador ácido-base que cambia el color en función del pH del material. Al aplicarse sobre una superficie de concreto recién fracturada, las zonas no carbonatadas, con valores de pH entre 9 y 10, se tiñen de color rosa, mientras que las zonas carbonatadas, con un pH inferior a 8.2, permanecen incoloras (véase figura 6). Este contraste permite identificar visualmente la frontera de carbonatación y medir la profundidad del frente carbonatado con instrumentos de precisión

como el vernier. Su simplicidad lo convierte en una técnica rápida y económica para el control de laboratorio, aunque solo ofrece una estimación cualitativa.



Figura 6. Ejemplo de la aplicación de fenolftaleína en una probeta recién partida de concreto por Osorio, J. D. (2023).

En cuanto a los métodos físico-químicos para una evaluación cuantitativa más precisa, se utiliza el análisis termogravimétrico (TGA) y la difracción de rayos X (XRD). El TGA mide las pérdidas de masa asociadas a la descomposición térmica de la portlandita y el carbonato de calcio (véase figura 7), permitiendo cuantificar el contenido de estos compuestos a distintas profundidades del material (Bui et al., 2023). Por su parte, el XRD identifica las fases cristalinas formadas durante la carbonatación (véase figura 8), y puede estimar la profundidad mediante la ecuación de difusión mostrada a continuación.

$$x = k\sqrt{t} \dots \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

x = Profundidad de carbonatación

k = Constante de carbonatación

t = Tiempo de carbonatación (días, meses, años)

Ambos métodos proporcionan una información estructural complementaria, útil para correlacionar el grado de carbonatación con las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto.

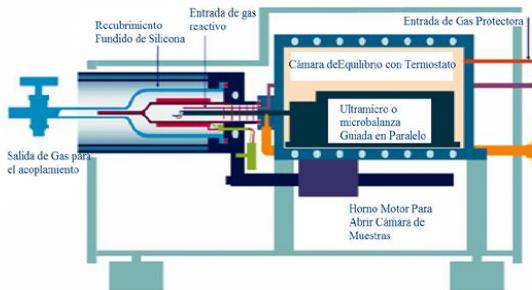


Figura 7. Representación del modelo TGA por (Granados Cristancho, 2015).

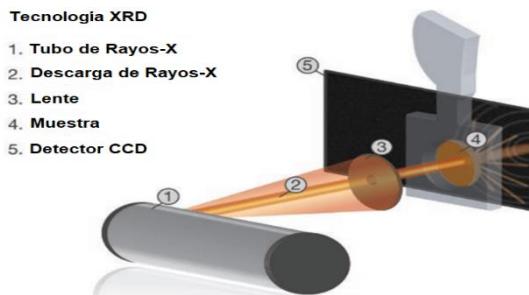


Figura 8. Funcionamiento de la tecnología de XRD por 911 Metallurgist. (2024).

Otros métodos útiles para medir el proceso de carbonatación son los métodos electroquímicos que buscan analizar los efectos de este proceso sobre el acero embebido, se aplican técnicas electroquímicas tales como las curvas Tafel y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Las curvas Tafel se obtienen mediante un barrido de potencial y permiten calcular parámetros como la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) y el potencial de corrosión (E_{corr}), indicadores del estado de pasividad del acero (Gamry Instruments, s. f.). La técnica EIS, por su parte, aplica señales senoidales de distintas frecuencias (normalmente 10 Hz), para medir la impedancia total del sistema, lo que posibilita evaluar la integridad dieléctrica y la resistencia a la corrosión del concreto carbonatado mediante un circuito abierto con un electrodo de referencia, contraelectrodo y electrodo de trabajo (véase figura 9).

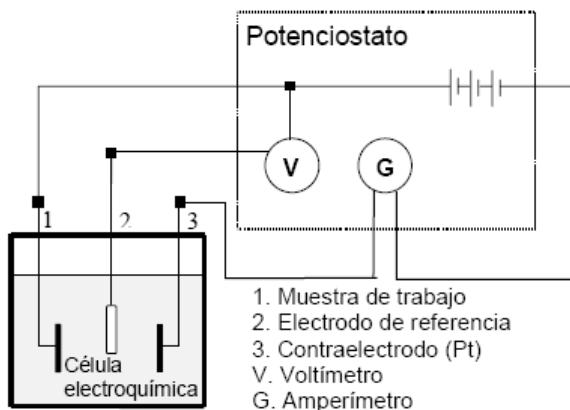


Figura 9. Diagrama esquemático de Celda utilizada para los análisis de EIS y Tafel por Ortiz, C. (s.f.).

2.3.3. Factores que afectan la carbonatación

La relación agua/cemento constituye un factor determinante en el proceso de carbonatación del concreto. Una proporción más elevada favorece a una mayor porosidad y permeabilidad de la matriz cementante, lo que facilita la difusión del CO₂. A su vez, incrementar la cantidad de portlandita disponible para la reacción con este gas (Merah et al., 2024).

Así mismo, la porosidad del concreto desempeña un papel esencial en los concretos permeables, ya que estos están diseñados deliberadamente con una porosidad mucho mayor que los concretos convencionales para permitir la infiltración de agua, la difusión de CO₂ es más rápida y el frente de carbonatación puede alcanzar mayores profundidades en menos tiempo. No obstante, una porosidad excesiva puede comprometer la durabilidad del material.

Por otra parte, la humedad relativa es otro factor clave, pues se ha documentado que, en ensayos acelerados, la profundidad de carbonatación alcanza su valor máximo al 70% de humedad relativa. Por debajo de ese valor, la disolución y el transporte del dióxido de carbono se reducen significativamente, lo que limita el avance del frente carbonatado (Rahmon, 2023).

En conjunto, estos factores interactúan de forma compleja y condicionan tanto la velocidad como la profundidad de carbonatación. En el contexto del concreto permeable modificado con carbón activado, entender esta interacción resulta especialmente relevante para optimizar su diseño al tener relaciones de agua/cemento adecuadas y una microestructura

controlada que permita equilibrar la funcionalidad de infiltración, la captación de dióxido de carbono y durabilidad.

2.4. Determinación de la profundidad de carbonatación

La fenolftaleína es una de las sustancias más utilizadas para medir la profundidad de carbonatación en especímenes de concreto, ya que la medición se realiza con un vernier o regla graduada, desde la superficie expuesta hasta donde se encuentran los primeros rastros de color rosa en el concreto. Este valor se reporta en milímetros y suele registrarse con varios puntos desde el borde del espécimen a la zona no carbonatada para obtener su promedio.

Primeramente, se determina la profundidad promedio para cada una de las caras de los especímenes mediante la ecuación 3:

$$Cn = \frac{\sum dn}{n} \dots \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde:

Cn = Cara del espécimen

$\sum dn$ = Sumatoria de mediciones

n = Número de mediciones

y posteriormente se usa la sumatoria de las mediciones por cara como se muestra en la ecuación 4:

$$X = \frac{\sum Cn}{n} \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde:

$\sum Cn$ = Sumatoria de caras

n = Número de caras

De esta manera, es posible determinar la profundidad de carbonatación (Campos-Silva, Fajardo, & Mendoza-Rangel, 2016).

Diversos autores han señalado que este modelo es ampliamente aceptado en estudios de durabilidad del concreto, ya que la carbonatación es un proceso controlado principalmente por la difusión de CO₂ en el interior de la masa cementante (Quintana Alfaro, 2023).

Es importante mencionar que, en México, la evaluación de la carbonatación mediante el uso de fenolftaleína está regulada por la norma NMX-C-515-ONNCCE-2016, la cual especifica el uso de indicadores ácido-base, como la fenolftaleína (solución al 1 % en alcohol), para revelar aquellas zonas no carbonatadas de color rosado característico (pH>9), y zonas carbonatadas sin color (pH<9). Con el uso de un vernier, se deben tomar las medidas desde la cara de cada espécimen y registrar los datos para poder calcular su profundidad de carbonatación.

Aunado a lo anterior, la evaluación de la carbonatación es un aspecto crítico el cual se usa para determinar la durabilidad del concreto armado. La técnica con fenolftaleína, aunque sea muy simple de hacer, sigue siendo una herramienta muy útil para lograr estimar el avance frente a la carbonatación del concreto y decidir sobre intervenciones preventivas o correctivas.

En función de la profundidad medida, se pueden clasificar los resultados según criterios prácticos reportados en la tabla 3.

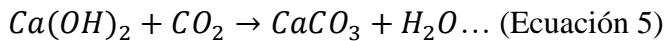
Tabla 3. Interpretaciones de profundidad de carbonatación por Félix, Carrazedo, & Possan, (2017).

Profundidad de carbonatación	Interpretación
<1 cm	Concreto de baja porosidad, durabilidad alta o una mala homogeneización del material.
1 – 3 cm	Carbonatación moderada, adecuada para mantener la integridad del acero
> 3 cm	Muy vulnerable a corrosión

2.5.Corrosión en concreto armado: fundamentos electroquímicos

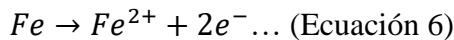
Cuando el CO₂ penetra por los poros del concreto, reacciona con el Ca (OH)₂ en el proceso de carbonatación, de tal forma que se produce carbonato de calcio (CaCO₃) y reduce progresivamente el pH. Según (Camacaro Vásquez *et al.*, 2023), la carbonatación es el proceso

químico que más influencia tiene en la pérdida de alcalinidad en el concreto y, por tanto, en la desprotección del acero frente a la corrosión como se muestra en la ecuación 5.

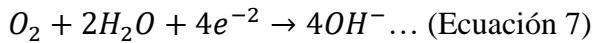


En relación con lo anterior, una vez el pH baja por debajo de 9, la capa pasiva desaparece, iniciando la corrosión del acero.

Es fundamental señalar que, la corrosión en concreto armado es uno de los fenómenos electroquímicos más complejos que deteriora el acero presente de refuerzo con el tiempo. Este proceso ocurre cuando el acero deja de estar protegido por el álcali de concreto (pH>12), lo que hace que pierda su capa pasiva, y se convierte en un ánodo de una celda de corrosión. El ánodo ferroso (Fe) se oxida liberando electrones y formando a su vez Fe^{2+} .



De esta manera, estos electrones viajan hacia una zona catódica donde reaccionan con el oxígeno del ambiente (O_2) y el agua para formar hidróxido de hierro, cerrando el circuito electroquímico.



Con extensión de esta idea, este proceso químico genera productos de corrosión, comúnmente óxidos e hidróxidos, que ocupan mayor volumen en el metal original. Esto provoca una expansión interna, grietas en la cubierta de concreto y pérdida de adherencia entre el acero y el concreto, afectando la resistencia y durabilidad. (Martínez, Gómez, & Salazar, 2021).

En igual sentido, diversos factores aceleran el proceso de carbonatación, ya que se disminuye el pH del concreto al convertir hidróxido de calcio en carbonato de calcio, debilitando la pasivación del acero (Muñoz Morales & Henao Aristizábal, 2023). De la misma manera la presencia de cloruros, provenientes de ambientes marinos o sales deshielantes, rompe la capa pasiva de acero incluso cuando el pH es muy alto. Otros factores que intervienen son la humedad relativa elevada, que favorece la conducción iónica; la alta porosidad, que facilita la difusión de agentes agresivos y temperaturas elevadas que aceleran las reacciones según el mismo autor.

2.6. Técnicas de monitoreo electroquímico: potencial de corrosión, impedancia electroquímica

En cuanto al monitoreo del estado de corrosión del acero en estructuras de concreto armado, es de suma importancia para poder evaluar su durabilidad y predecir el tiempo de vida útil que tendrá la estructura. Las técnicas electroquímicas no destructivas como potencial de corrosión y la espectrografía de impedancia electroquímica (EIS), son ampliamente utilizadas debido a su precisión, sensibilidad y facilidad de implementación (Martínez, Gómez & Salazar, 2021).

Asimismo, el potencial de corrosión se llama medición del potencial de media celda (HCP) y consiste en evaluar el potencial eléctrico del acero frente a un electrodo de referencia de Cu/CuSO₄, sin aplicar corriente (véase figura 10). Este es un método normado por la ASTM C876-15 y la ASTM C876-19, lo que permite estimar la probabilidad que tiene el acero de una corrosión activa en estructuras de concreto armado, no da información sobre la velocidad de corrosión, pero sí sobre la condición pasiva o activa del acero (Gamry Instruments, s.f.).

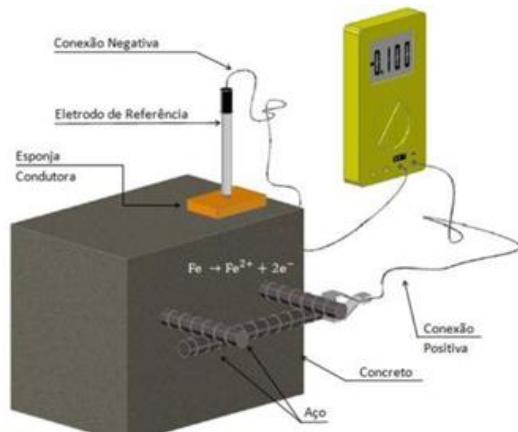


Figura 10. Potenciales de corrosión medidos mediante media celda, técnica de medición tomada de la norma ASTM C876-91

De acuerdo a la norma ASTM C876-15, un potencial menor a -350 mV frente al electrodo de cobre/sulfato indica una probabilidad mayor al 90% de corrosión activa, en contraste a valores de -200 mV que muestran que no existe corrosión activa. La medición del potencial que se mide en celda es un método muy eficaz para detectar zonas con una muy alta

probabilidad de que exista una corrosión activa, con la limitante de que no proporciona velocidad de corrosión.

Cabe resaltar que este método es muy usado en inspecciones rápidas y análisis comparativos entre diversas áreas de la estructura. Si bien presenta limitantes como la influencia de factores como la humedad, el recubrimiento del concreto o el tipo de electrodo, puede repercutir en los resultados de la prueba (véase figura 11).



Figura 11. Medición de potencial de corrosión por CJE Ingenieros. (2018).

De igual forma, otro método muy usado es la Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Este método se basa en una señal alterna de bajo voltaje (normalmente de 10 mV), a través de un amplio rango de frecuencias de entre 0.01 Hz a 100 kHz con el propósito de obtener información detallada sobre los procesos corrosivos que ocurren en la interfaz acero-concreto.

La EIS permite obtener parámetros como la resistencia de polarización (R_p), la capacitancia de la doble capa y la impedancia del sistema, los cuales pueden modelarse usando circuitos equivalentes. Estos circuitos representan las interacciones electroquímicas que tienen lugar entre el acero y el concreto, fundamentales para comprender la cinética y los mecanismos de transferencia de carga involucrados (véase figura 12).

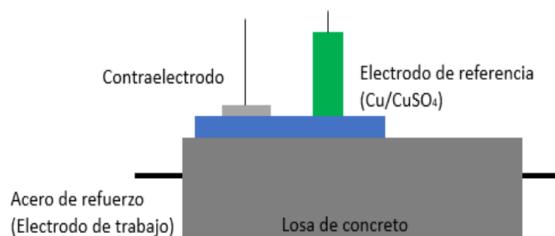


Figura 12. Modelo gráfico de la prueba EIS por Peña Caravaca et al., (2023).

Cabe señalar que Gamry Instruments ha optimizado esta técnica mediante el uso de señales multi-sinusoidales (OptiEIS), lo que reduce el tiempo total del ensayo manteniendo la integridad de los datos, aunque el enfoque es mucho más común en celdas tipo batería, su principio es aplicable a estudios estructurales cuando se busca eficiencia temporal (Gamry Instruments, s.f.).

Conviene resaltar que esta técnica se encarga de evaluar la resistencia del sistema, la capacitancia de la doble capa y los mecanismos de transferencia de carga, modelando el comportamiento electroquímico mediante circuitos equivalentes. Según investigaciones de Martínez, Gómez y Salazar (2021), la técnica de EIS permite distinguir entre diferentes procesos como la transferencia de carga y la difusión iónica, lo que la convierte en una herramienta poderosa para caracterizar el inicio y evolución de la corrosión (véase tabla 4).

Tabla 4. Comparativa entre los métodos de Potencial de corrosión y EIS.

Técnica	Información que proporciona	Ventajas	Limitantes
Potencial de corrosión	Probabilidad de corrosión	Rapidez y portabilidad	No cuantifica velocidad de corrosión
Impedancia electroquímica	Parámetros eléctricos muy detallados	Precisión y anticipación de fallas	Requiere interpretación

2.7. Cámaras de carbonatación acelerada: diseño, control ambiental y precedentes

Cabe mencionar que el concreto es un material cuya porosidad puede verse comprometida con el pasar del tiempo debido a procesos fisicoquímicos como la carbonatación, la cual afecta la alcalinidad del medio cementante reduciéndola considerablemente, favoreciendo de ese modo la corrosión del acero de refuerzo. Este proceso puede verse en la naturaleza lentamente, por lo que se han desarrollado cámaras de carbonatación acelerada con el propósito de reducir ese periodo de carbonatación para ver cuáles son los efectos del dióxido de carbono a lo largo de los años. Estas cámaras son de gran utilidad para evaluar la durabilidad de materiales cementantes, especialmente en investigaciones orientadas al mejoramiento de la resistencia del concreto ante un ambiente agresivo (Merah, 2024).

Partiendo de lo anterior, las cámaras de carbonatación acelerada son un sistema cerrado y controlado en donde se simulan las condiciones atmosféricas de un entorno urbano contaminado, permitiendo así observar el avance que tiene el proceso de carbonatación en el concreto, morteros y cementos expuestos a un ambiente rico en CO₂. El diseño de estas cámaras incluye una estructura sellada herméticamente con sistemas de control ambiental que permiten regular la concentración de dióxido de carbono, humedad y temperatura. El uso de medidores de este gas, humidificadores automáticos, controles de temperatura y/o medidores y una ventilación interna forzada garantiza que las condiciones dentro de la cámara sean homogéneas y representativas (véase figura 13).



Figura 13. Cámara de carbonatación acelerada comercial por Campos Silva, A. R., Fajardo San Miguel, G., & Mendoza-Rangel, J. M. (2016).

Sumado a esto, dichas cámaras de carbonatación ofrecen una forma eficaz y segura de evaluar en días o semanas este proceso que normalmente llevaría años en condiciones ambientales comunes, para esto se suministra una cantidad intensiva de CO₂ de un 0.05 % a 5 % (Merah, 2024), aunque de igual manera puede variar hasta un 10% dependiendo de la velocidad del flujo y el tamaño de la cámara, normalmente modificadas. La clave para la eficacia de estas cámaras radica en reproducir niveles de saturación específicos y previamente probados en donde se alcance su saturación máxima en un espacio determinado, tanto de humedad como de dióxido de carbono, que promueven las reacciones químicas sin desvirtuarlas (véase figura 14).

En este mismo sentido, las cámaras típicas incluyen un recinto hermético con control de temperatura, humedad y control de CO₂, además de tener una ventilación interna para homogeneizar el ambiente (Chinè-Polito et al., 2019). La concentración de este gas, se eleva

entre un 1 % a 5 % para acelerar el proceso sin alterar la naturaleza del carbonato formado; sin embargo, niveles superiores a un 10% pueden incluir cambios microestructurales distintos observados en condiciones reales, aunque puede aceptarse dependiendo del tamaño de la cámara y el flujo según (Merah, 2024).

De igual manera, el control de la humedad relativa es fundamental ya que esta debe de estar entre valores de 50 % y 70 %, pues estar en este rango de valores evita la saturación completa de los poros como su sequedad, condiciones que inhiben la reacción. Asimismo, se debe de mantener una temperatura de entre 20 °C y 25°C para favorecer una cinética similar a la natural; temperaturas superiores pueden ocasionar una disminución de la solubilidad del dióxido de carbono y el hidróxido de calcio, ralentizando este proceso. (Merah, 2024).



Figura 14. Cámara de carbonatación *in vitro* para la evaluación de los especímenes de concreto permeable modificados

Por otro lado, la adaptación apropiada de una cámara de carbonatación acelerada se centra en conocer cuáles son los niveles máximos de saturación, CO₂, humedad y temperatura; así como los mínimos para de ese modo lograr las condiciones adecuadas para acelerar este proceso químico. Investigaciones muestran que incrementar la concentración de este gas hasta un 3% puede producir profundidades de carbonatación comparables a las de campo, pero concentraciones de 18% podrían no mejorar la velocidad en concretos de alta resistencia (≤ 40 MPa) y pueden dar resultados distorsionados o alejados de la realidad. De igual forma, aumentar el tiempo de curado húmedo previo de 7 a 28 días reduce notablemente la carbonatación por lo que es recomendable no pasar este lapso (Vollpracht et al., 2024).

En particular, las cámaras comerciales tienen perfiles válidos de pH, contenido de carbonato y microestructura con exposiciones reales (Chinè-Polito et al., 2019). Las investigaciones coinciden en que siempre que los valores de saturación se mantengan en un rango óptimo de: $3\% < \text{CO}_2 < 18\%$, Humedad entre 50%-70%, temperatura entre 20 a 25 °C, la carbonatación acelerada se reproduce eficazmente en condiciones naturales sin introducir artefactos.

Capítulo 3. Metodología Experimental

3.1. Diseño de concreto permeable con adición de carbón activado

En esta sección se describe el proceso para diseñar un concreto permeable que incorpore carbón activado como adición parcial al cemento, con el objetivo de mejorar su funcionalidad ambiental. Se trabajaron dos mezclas experimentales con 2 % y 5 % de carbón activado respecto al volumen de cemento, además de una mezcla patrón sin adiciones.

El diseño se realizó siguiendo lineamientos de la normativa ACI 522R-10, para determinar la permeabilidad de esta clase de concretos, considerando una relación de agua cemento de 0.35, y priorizando una granulometría de agregados gruesos de tamaño de 19 mm.

3.1.1. Carbón activado

El carbón activado utilizado para este estudio fue adquirido de manera comercial, marca “Mi Granero”. Considerando que se agregó como una adición a la matriz cementante se prefirió utilizar una presentación fina en vez de granulada. El uso de partículas finas permite una mejor dispersión dentro de la mezcla y minimiza posibles efectos negativos en la resistencia mecánica del concreto.

Este tipo de material se encuentra disponible en diferentes versiones como gránulos pequeños, cilindros o incluso de forma pulverizada, la composición típica del carbón activado pulverizado presenta un contenido promedio de 75 %-80 % de carbono, 60 % de oxígeno, y 0.5 % de hidrógeno, además de cenizas residuales de entre 5 %-10 %, dependiendo del precursor y el proceso de activación (Sevilla, U. D., 2011).

Se empleó carbón activado fino de cascara de coco, con un área superficial BET (Brunauer–Emmett–Teller) de $1150 \text{ m}^2/\text{g}$, índice de yodo de 1000 mg/g, granulometría entre malla 12 x 40, una densidad de 0.37 g/cm^3 y una dureza del 96 %.

3.1.2. Arena

Dentro de algunas dosificaciones utilizadas, se incorporó arena como agregado fino con el objetivo de mejorar la resistencia a la compresión del concreto permeable, siguiendo las especificaciones de la mezcla. Si bien muchas de las fórmulas tradicionales no usan arena para conservar su estructura porosa, muchos estudios han demostrado que la adición de pequeñas cantidades de este agregado, mejoran notoriamente la resistencia a la compresión.

La arena utilizada fue adquirida de una casa de materiales local, obtenidos los agregados se realizó el acarreo hasta el laboratorio de Tecnología de los Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), donde se procedió con la elaboración de todos los ensayos propuestos en la presente investigación. Para garantizar que esta fuera del mismo banco de materiales, se realizaron ensayos granulométricos para separar las partículas más grandes de las que se van a utilizar. Dichos ensayos se realizaron en base a la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018, que regula los métodos de prueba de caracterización de agregados para concreto hidráulico, ya que no existen normas para concretos permeables. Se emplearon tamices de los números No. 4 (4.75 mm), No. 10 (2 mm), No. 20 (0.85 mm), No. 40 (0.425 mm), No. 60 (0.250 mm) de la marca MATEX. Las partículas de 0.425 mm fueron las que se utilizaron en la mezcla por recomendación de autores y empresas, ya que este tamaño permite una adecuada compactación de la mezcla sin obstruir los vacíos interconectados que permiten la permeabilidad.

3.1.3. Cemento

El cemento utilizado para las probetas corresponde al cemento Portland ordinario, porque es el más predominante en la región y más utilizado, debido a su gran versatilidad que permite ser utilizado en todo tipo de elementos estructurales y no estructurales y en climas variados. La marca de cemento no fue una variable crítica, por lo que se trabajó con la marca Moctezuma en su presentación de 50 kg. La marca de cemento es indistinta ya que puede usarse cualquiera siempre y cuando cumpla con los estándares de calidad requeridos.

Para garantizar el buen desempeño del cemento en la mezcla, se procuró que el cemento fuera de una producción reciente, con una antigüedad no mayor a 6 meses, tal y como se recomienda en la práctica y en la normativa vigente. El cemento debe ser almacenado de forma adecuada pues de no hacerlo se puede comprometer sus propiedades aglutinantes,

comprometiendo así la resistencia y durabilidad del concreto. La compra del cemento se realizó de forma inmediata para el proceso de elaboración del concreto con el fin de evitar el envejecimiento del material.

Durante la adquisición del material, se tomaron las medidas pertinentes de almacenamiento, manteniendo los sacos en un lugar seco, ventilado y protegido de la humedad o exposición al agua, ya que la adsorción de humedad puede afectar o incluso arruinar el cemento en sí, provocando su endurecimiento repentino. Para asegurar la calidad del producto empleado, se tomó como referencia la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017, que establece las especificaciones y requisitos del cemento hidráulico comercializado en México. Esta norma regula aspectos como la resistencia a la compresión, finura, fraguado y contenido de compuestos principales, lo que permite garantizar la confiabilidad del material.

3.1.4. Agua

Para la elaboración de las mezclas de concreto permeable se optó por utilizar agua tratada proveniente de las instalaciones de la UAEH.

El agua utilizada en mezclas de concreto debe cumplir con criterios de calidad que eviten la presencia de sustancias que pueden interferir con las reacciones de hidratación del cemento, como materia orgánica, aceites, sales, ácidos, etc. En ese sentido, la norma NMX-C-122-ONNCCE-2016 establece que el agua apta para empezar a elaborar concreto es aquella que, en condiciones normales, no afecta el tiempo de fraguado ni la resistencia del material.

Se verificó que el agua no presentará características anormales (olor, color, turbidez o residuos), y su uso se mantuvo constante a lo largo del proceso experimental, asegurando uniformidad en todos sus usos.

3.1.5. Grava

El agregado grueso utilizado consistió en grava de 3/4" (19 mm), seleccionada por su tamaño que, si bien está fuera de lo recomendado por el autor, una malla menor sería demasiado pequeña y no se contaba con una malla de 5/8" (16 mm), pues no es muy usada en el país y una malla de 1/2" (12.5 mm) no cumplía con el tamaño especificado en la dosificación. Este material fue adquirido de la misma casa de materiales de donde se obtuvo la arena para asegurar su

homogeneidad. Sus características y tamaño son compatibles con el concreto permeable y se verificó su conformidad con la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018.

Se emplearon tamices de 3" (75 mm), 2 ½" (63 mm) 1 ½" (37.5 mm), 1" (25 mm), 3/4" (19 mm), 1/2" (12.5 mm), 3/8" (9.5 mm) y el fondo. Esta secuencia permite obtener la distribución granulométrica completa del agregado grueso. De este análisis se seleccionó la fracción de 3/4" (19 mm), el cual es adecuado para mantener los vacíos interconectados que caracterizan al concreto permeable.

Antes de la incorporación del material, la grava fue lavada con agua limpia para remover el polvo, arcillas y otras impurezas para posteriormente ser secada al sol durante 48 horas y revuelta constantemente.

3.1.6. Dosificaciones y mezclas

Para el diseño de la mezcla de concreto permeable, se tomó como referencia las dosificaciones propuestas por Li, X., Zhang, Y., & Jiang, H. (2021), las cuales han demostrado ser funcionales y presentar un buen desempeño en términos de resistencia y permeabilidad, agregando un 2 % y 5 % del volumen total de la muestra de manera experimental, con el objetivo de evaluar la influencia del carbón activado en el concreto permeable para la captación de CO₂. Esta estrategia permite estudiar el efecto de dicho material manteniendo el volumen total de cemento y modificando la matriz cementante como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Dosificación de concreto permeable en base a Li, X., Zhang, Y., & Jiang, H. (2021) con la adición de un 2 % y 5 % de carbón activado de manera experimental.

Material	Muestra patrón	Muestra	Muestra
		modificada 1	modificada 2
Cemento	358 kg/m ³	422.38 kg/m ³	409.45 kg/m ³
Agua	107 kg/m ³	129 kg/m ³	129 kg/m ³
Aggregado Grueso (3/4")	1595 kg/m ³	1222 kg/m ³	764 kg/m ³
Arena (No. 40)	0 kg/m ³	76 kg/m ³	76 kg/m ³
Carbón Activado	0 %	2 %	5 %

Esta dosificación cumple con las características requeridas para un concreto permeable funcional, ya que los cálculos respecto a su relación agua/cemento está en un rango típico, una permeabilidad adecuada y una resistencia común para este material, como se muestra en la Tabla 6 y las ecuaciones 8, 9 y 10:

Tabla 6. Propiedades básicas de la dosificación de concreto permeable.

Propiedades	Cantidades
Relación agua/cemento	0.27-0.35
Permeabilidad	2 mm/s a 40 mm/s
Resistencia	40-50 Kg/cm ²

$$\text{Relación Agua Cemento (Muestra Patrón)} = \frac{107 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{358 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.29 \dots \text{ (Ecuación 8)}$$

$$\text{Relación Agua Cemento (Muestra Modificada 1)} = \frac{129 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{422.38 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.31 \dots \text{ (Ecuación 9)}$$

$$\text{Relación Agua Cemento (Muestra Modificada 1)} = \frac{129 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{409.45 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.32 \dots \text{ (Ecuación 10)}$$

Como se muestra en las ecuaciones anteriores, estas relaciones de agua cemento cumplen con los requerimientos mínimos de una dosificación de concreto permeable. Además de la dosificación diseñada para tener una permeabilidad alta entre el rango de 2mm/s a 40 mm/s y una resistencia máxima cercana a 80 kg/cm².

En cuanto a la mezcla de referencia de concreto convencional, se optó por usar una dosificación comercial dada por el manual del constructor de CEMEX México, (2025); donde se especifican las siguientes cantidades para un concreto de 250 kg/cm², como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Dosificación de concreto simple clase II de 250 kg/cm² por CEMEX (2025).

Material	Muestra de concreto simple
Cemento	390 kg/m ³
Agua	205 kg/m ³
Agregado Grueso (3/4")	385 kg/m ³
Arena (No. 4)	304 kg/m ³

3.2. Elaboración de especímenes

3.2.1. Prueba de granulometría

Con los materiales seleccionados, se efectuó la prueba de granulometría de los agregados destinados a la mezcla de concreto. El procedimiento se realizó conforme a la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018, la cual establece los criterios técnicos para la distribución del tamaño de las partículas mediante tamizado.

Antes del ensayo, los especímenes se secaron en el horno a 110 ± 5 °C hasta alcanzar una masa constante, y posteriormente se pesaban en una balanza de precisión con un margen de error no mayor a 0.1 %.

El tamizado se efectuó utilizando una serie normalizada de tamices establecida por la norma, con aberturas comprendidas entre 75 mm y 0.075 mm (3" a No. 200), para determinar la graduación de los agregados y obtener una curva granulométrica.

Durante el ensayo se registraron el porcentaje total del material que pasa por cada tamiz, el porcentaje acumulado del material retenido, el porcentaje retenido en tamices consecutivos y la curva granulométrica resultante, que permitió analizar la distribución del tamaño de las partículas del agregado evaluado.

El módulo de finura (MF) del agregado fino se calculó según la metodología en la norma, y su valor debe situarse entre 2.3 y 3.1, rango que asegura una graduación adecuada y una buena trabajabilidad. Los resultados obtenidos se emplearon para verificar que los agregados cumplieran con la graduación requerida en el diseño del concreto permeable, garantizando una estructura granular que favorezca tanto la resistencia como la permeabilidad de un material.

3.2.2. Elaboración de cilindros de concreto con carbón activado

La elaboración de los cilindros de concreto permeable y convencional, se hizo uso en la norma NMX-C-170-ONNCCE-2019 para la reducción de muestras con el objetivo de minimizar las variaciones de las características entre la muestra probada y la muestra en campo, la norma NMX-C-156-ONNCCE-2010 para determinar la consistencia del concreto hidráulico en estado fresco mediante el ensayo conocido como revenimiento y la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016 la cual establece el procedimiento para la elaboración y curado de especímenes de concreto.

Con los diseños de la muestra patrón de concreto permeable, muestra modificada 1 con 2 % de carbón activado, la muestra modificada 2 con 5 % de carbón activado y de concreto convencional, se comenzó con realizar las pruebas de reducción de muestras para cada una respectivamente. Con los agregados debidamente reducidos, se procedió a elaborar cada una de las mezclas con su debida dosificación correspondiente, para de ese modo poder llevar a cabo el ensayo de revenimiento con ayuda del cono de Abrams, una base y una varilla de 5/8" no corrugada, permitiendo medir la consistencia de cada una de las matrices cementantes elaboradas para cada dosificación.

El procedimiento consistió verter una tercera parte del volumen del cono con concreto fresco para proceder penetrando el material 25 veces de manera espiral hasta llenar el cono y terminar volteando el mismo para poder medir cual es la consistencia del concreto en estado fresco desde la base del cono hasta la mezcla.

Para la elaboración de los especímenes de concreto, se elaboraron 3 probetas de cada dosificación previamente establecida en moldes estandarizados de $\varnothing=15$ cm y $h=30$ cm. Con las mezclas elaboradas, se procedió con el vertido y la compactación manual para cada uno de los especímenes elaborados, llenando una tercera parte del volumen del molde y penetrando 25 veces de manera espiral mientras se golpea el molde 15 veces con un martillo de goma para la compactación manual, esto hasta llenar el cilindro.

Finalmente, estos especímenes pasaron por un periodo de 24 horas de fraguado para posteriormente dejarlos fraguar durante 28 días (véase figura 15).



Figura 15. Elaboración y curado de especímenes de concreto permeable con carbón activado.

3.2.3. Núcleos de concreto

El procedimiento se realizó conforme a la norma NMX-C-169-ONNCCE-2009, la cual establece las especificaciones para la fabricación y el manejo de especímenes destinados a ensayos mecánicos y químicos, como la carbonatación.

Debido a la falta de moldes normalizados para cilindros de estos tamaños, se fabricaron moldes experimentales de 11 cm de diámetro y 16 cm de altura, elaborados con tubos PVC y bases de madera desmontables, garantizando su estabilidad dimensional y sellado durante el vaciado (véase figura 16).

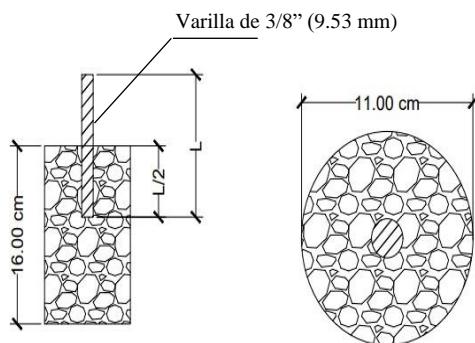


Figura 16. Representación de los núcleos de concreto elaborados.

Los especímenes se agruparon en cuatro lotes identificados como A, B, C y D, en donde el lote A, pertenecía al concreto permeable sin adición de carbón activado, el lote B, se componía de 2 % de carbón activado (muestra patrón 1), el lote C, contenía 5 % de carbón activado (muestra patrón 2) y el lote D, hecho como un concreto convencional de resistencia a la compresión de 250 kg/cm².

La preparación de las mezclas se efectuó utilizando la dosificación previamente determinada. Cada material fue pesado individualmente en una báscula de precisión. La mezcla se elaboró en un recipiente metálico limpio, y el procedimiento se desarrolló de acuerdo a las normas NMX-C-156-ONNCCE-2010.

Antes del vaciado, los moldes se lubricaron para facilitar el desmolde posterior. La mezcla se colocó en tres capas aproximadamente iguales, aplicando 25 penetraciones con una varilla de acero lis de 5/8" por capa, asegurando la compactación uniforme del material. En el centro de cada espécimen se introdujo una varilla corrugada de 3/8" y 30 cm de longitud,

procurando que permaneciera recta y sin tocar el fondo del molde. Este procedimiento se aplicó de manera idéntica para todas las dosificaciones de concreto permeable.

Tras el llenado, los especímenes se mantuvieron en reposo durante 24 horas para permitir el fraguado inicial (véase figura 17). Posteriormente, se desmoldaron cuidadosamente y se sometieron a un curado húmedo por aspersión durante 7 días, conforme a la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016, asegurando la hidratación adecuada del cemento. Una vez completado el curado, los núcleos se secaban al ambiente durante 24 horas antes de realizar las pruebas experimentales.

Los núcleos elaborados con las diferentes dosificaciones se emplearon en los ensayos de carbonatación descrito en apartados posteriores.



Figura 17. Núcleos de concreto A, B y C.

3.2.4. Muestras de concreto para captación de CO₂.

Si bien no existen normas para esta prueba, se puede usar como referencia la norma NMX-C-159-ONNCCE-2016, la cual establece como preparar cubos de concreto de 15 cm de cada lado, lo cual es útil para hacer una adaptación de captura de CO₂, optando por una medida de 7 cm x 7 cm x 5 cm, para que el tamaño de las muestras encajara en la adaptación de captación de este gas de invernadero.

Primeramente, se procedió a reducir las muestras y a realizar el ensayo de revenimiento en base a las normas NMX-C-170-ONNCCE-2019 y NMX-C-156-ONNCCE-2010.

Posteriormente, se limpiaron y engrasaron todos los moldes de prismas de concreto para que estos mismos estén listos para el vertido, posteriormente se realizaron ambas muestras de

concreto permeable con carbón activado al 2 % y 5 %, medido con la báscula y con ayuda de una charola de metal, cuchara de albañil y una probeta graduada.

Con las mezclas realizadas se colocaron 2 capas iguales durante el vertido en los moldes cúbicos, cada una compactada con 25 penetraciones de la varilla de 5/8", al no disponer de una mesa vibratoria, se optó por usar un martillo de goma para golpear alrededor de cada molde durante 15 segundos por cada capa vertida, asegurándose de no dejar huecos de aire.

Por último, se eliminó el exceso de la superficie con la varilla para posteriormente dejar fraguar los prismas de concreto durante 24 horas de para dejarlos fraguar por 7 días con ayuda de un atomizador con agua (véase figura 18).

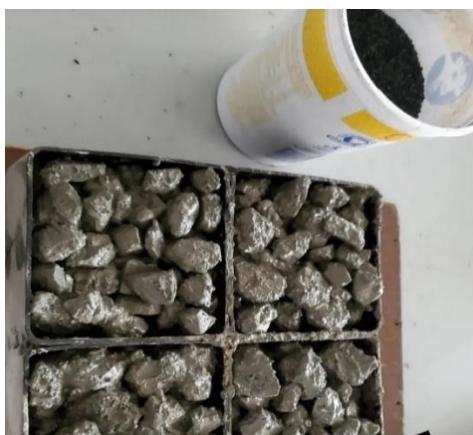


Figura 18. Muestras de concreto para la prueba de captación de CO₂.

3.3 Construcción y configuración de la cámara de carbonatación

3.3.1. Descripción del sistema

Con el objetivo de evaluar la resistencia del concreto permeable frente al proceso de carbonatación y correlacionar con la captura de CO₂ de los especímenes propuestos, fue necesario utilizar una cámara de carbonatación que permita acelerar el proceso de difusión de CO₂ de forma controlada y basándose en la norma ISO 1920-12:2015. Las condiciones necesarias para la operación de una cámara de carbonatación según la norma son: un suministro de CO₂ de un 3% a 18% constante, humedad relativa de entre 50% a 70%, una temperatura de entre 20°C a 25°C, una hermeticidad aceptable y un punto de alivio (Chinè-Polito et al., 2019).

Las cámaras de carbonatación comerciales, para alcanzar las condiciones anteriormente mencionadas, cuentan con un conducto por el cual se suministra una cantidad determinada de

CO₂ dentro del sistema, un sistema humidificador el cual tiene el propósito de alcanzar una determinada humedad relativa dentro de la misma cámara, un electrodo de referencia, un contra electrodo y un electrodo de trabajo para la realización de las pruebas de impedancia electroquímica. Las cámaras de carbonatación aceleradas comerciales tienen medidores de humedad relativa, temperatura, flujo de CO₂ y medidores de partes por millón de este mismo gas, pues es necesario controlar estos parámetros para que la simulación de una carbonatación acelerada sea exitosa y apegada a la realidad.

Con estas características y condiciones necesarias, se diseñó y construyó una cámara de carbonatación in vitro, con la innovación de que las probetas no necesitan ser retiradas de la cámara para poderlas evaluar, así como la reducción de gas utilizado para conseguir las condiciones de una cámara de carbonatación. Está hecha con placas de acrílico cortadas a la medida con dimensiones de 35 cm de cada lado, la placa superior cuenta con 2 orificios a la medida, los cuales sirven para poder conectar el electrodo de referencia, el cual está hecho de sulfato de cobre (CuSO₄), para mantener un potencial estable, una placa de platino la cual servirá como un contraelectrodo para cerrar el circuito y un electrodo de trabajo, que en este caso son los núcleos de concreto. La placa lateral izquierda de la cámara de carbonatación, cuenta con una entrada para la inyección de dióxido de carbono dentro del sistema, en la cara posterior se encuentra la entrada del humidificador el cual servirá para poder alcanzar una humedad relativa y en la cara lateral derecha está la salida de la varilla de los especímenes de concreto que sirvió para conectar el electrodo de trabajo. Además, se cuenta con medidores de temperatura, humedad relativa, flujo de dióxido de carbono y partículas del mismo gas presentes en el ambiente.

Como se muestra en las figuras 19 y 20, los especímenes de concreto se colocan dentro de la cámara de carbonatación sobre la base de madera junto con el humidificador, el medidor de CO₂ y el medidor de humedad, para posteriormente colocar una esponja humedecida sobre los especímenes. Con el espécimen dentro de la cámara, se coloca el electrodo de referencia y la placa de platino sobre la esponja para después conectar la varilla y los electrodos al medidor de impedancia electroquímica y proceder aplicando la inyección de dióxido de carbono y activando el humidificador.

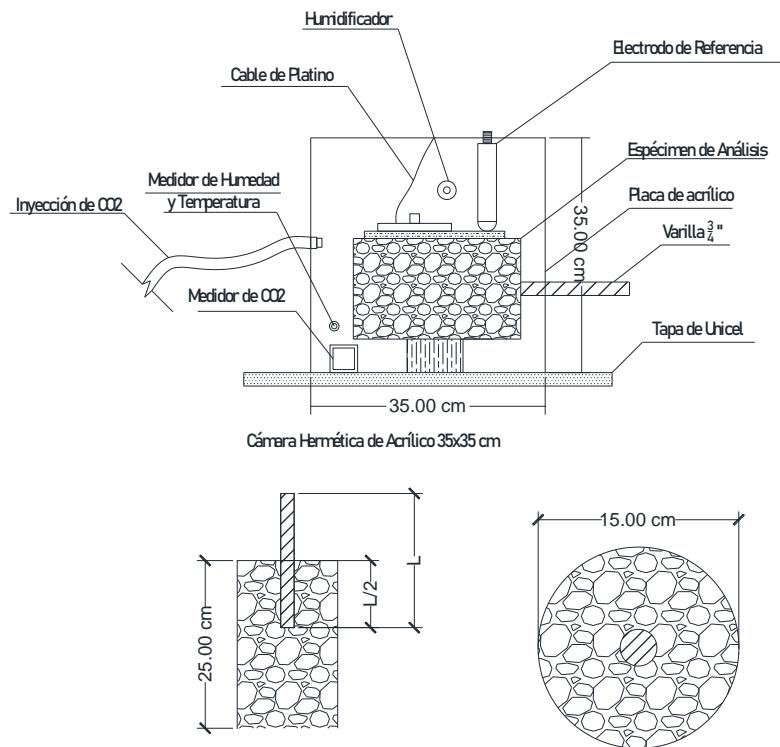


Figura 19. Diseño de la cámara de carbonatación acelerada *in vitro* con sus especificaciones técnicas y manejo.

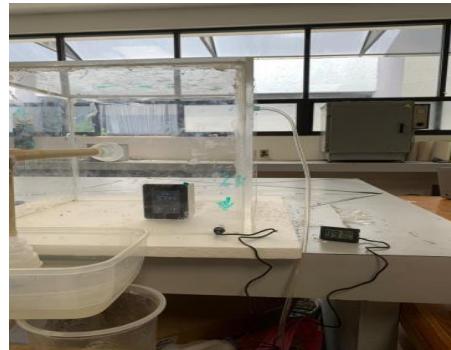


Figura 20. Cámara de carbonatación *in vitro* fabricada de acuerdo a las especificaciones establecidas previamente.

3.3.2. Calibración de sensores de CO₂ Y Humedad relativa

Para garantizar la validación de los resultados referente al parámetro de la humedad relativa presente en la cámara propuesta y lo solicitado por normativa en este tipo de cámaras, antes de realizar la exposición de los especímenes, se procedió a realizar la calibración de los equipos para los parámetros de medición de CO₂ y Humedad Relativa. Se siguieron las

instrucciones del fabricante para el uso adecuado de sensores de este tipo marca Air Detector, las cuales establecen que se debe dejar el medidor dentro de un espacio cerrado durante 2 horas hasta que se tenga una lectura estable y compatible con el ambiente en el que se encuentra, normalmente de entre 400 a 600 ppm en zonas urbanas de acuerdo al manual (véase figura 21).



Figura 21. Medidor de dióxido de carbono Air Detector modelo MF1-017.

Calibrados los equipos, se procedió a fijar los sensores dentro de la cámara de carbonatación diseñada y calibrar las condiciones de carbonatación a través del tiempo, realizando mediciones cada 10 minutos a un 5 % de dióxido de carbono constante y con un flujo de 5 L/min hasta que la cámara se saturase, para de ese modo saber con precisión cual es el tiempo que tarda en llegar la cámara de carbonatación en llegar a las condiciones ideales y a la saturación completa del sistema, dado a que los medidores de dióxido de carbono tenían medidores de temperatura y humedad, se hizo una comparativa entre ambos obteniendo los siguientes resultados de las mediciones de cada uno de los equipos durante un suministro de CO₂ hasta alcanzar un 10% y durante un periodo de 110 minutos, mostrado en la tabla 8:

Tabla 8. Resultados de calibración de sensor de humedad (HR) y CO₂, obtenidos durante las pruebas.

Tiempo (min)	Medidor de CO ₂ (PPM)	Medidor CO ₂ -HR (%)	Medidor de CO ₂ -Temp. (°C)	Medidor de HR (%)	Medidor de HR (°C)
10	1230	43	27.7	63	27.1
20	1605	64	28	66	27
30	1850	67	28	69	27
40	2100	71	27.4	73	26.8
50	2540	75	27.4	78	26.8
60	2790	84	28	86	27
70	3100	90	28	89	27
80	3740	94	28	92	27
90	3900	97	28	94	27
100	4100	98	27.6	96	26.5
110	4550	98	28	98	27

Los resultados mostrados en la tabla 8, el medidor de humedad relativa mostró mayor precisión en la medición de temperatura en comparación con los sensores de CO₂. Además, los datos de humedad relativa fueron más estables a lo largo del tiempo, con una variación aproximada de $\pm 2\%$ a los 30 minutos, alcanzando cerca del 70% de humedad relativa, un valor adecuado para este tipo de pruebas. A los 110 minutos, ambos sensores coincidieron en una lectura de 98% de humedad, lo que indica saturación del sistema. En cuanto a la temperatura, se registró una diferencia constante de ± 1 °C entre ambos sensores. Aunque el clima impidió una temperatura constante, el sistema no estuvo expuesto a fuentes directas de frío o calor, por lo que se optó por conservar la temperatura ambiental bajo una recomendación controlada de CO₂ del 10%, en cumplimiento con los parámetros establecidos en cámaras comerciales.

3.3.3. Control de variables internas

Durante las pruebas de carbonatación acelerada se implementaron medidas específicas para lograr mantener una estabilidad de las condiciones internas de la cámara. La concentración de dióxido de carbono se controló con el medidor de la válvula de suministro y sensores de CO₂,

manteniéndose en un 5 % con un flujo constante de 5 L/min. La temperatura se verificó antes de cada prueba en un espacio cerrado sin exposición directa a fuentes de calor o frío, registrándose un promedio estable de ± 27 °C con ambos medidores.

La humedad relativa se reguló mediante recipientes con agua y humidificador, estabilizándose a los 30 minutos en un rango de 65 % a 70 %. Para evitar fugas de gas, el sistema se selló con burletes de goma y cinta adhesiva en los orificios de los electrodos, varillas, humidificador y válvula de dióxido de carbono. Estas condiciones se mantuvieron constantes durante todas las pruebas.

3.4. Evaluación de resistencia a la compresión de cilindros

Cada grupo de probetas de concreto a una edad de 28 días, se procedió a realizar el ensayo por triplicado (para garantizar reproducibilidad) de rotura de probetas de concreto en la máquina de compresión axial. Se obtuvo la carga última de cada una de las 12 probetas sometidas al ensayo de compresión axial. Este ensayo tiene por finalidad determinar la resistencia a la compresión de testigos cilíndricos, para concretos con pesos unitarios mayores a 900 kg/m³, bajo la norma NMX-C-083-ONNCCE-2020. Los resultados de este ensayo son usados como una referencia para el control de calidad del concreto, proporciones, mezclado y operaciones de colocación; determinación del cumplimiento con las especificaciones; control para la evaluación de la efectividad del aditivo como cementante; y usos similares.



Figura 22. Máquina y cilindro para la prueba de compresión.

La máquina utilizada es una prensa para ensayos de compresión axial de cilindros Controls Group, con una capacidad de carga de 3000 Kn de fuerza axial y a una velocidad de 0.25 MPa/s, mostrada en la figura 22.

3.5. Prueba de Permeabilidad

Dado a que en México no existe ninguna normativa relacionada a la medición de la permeabilidad del concreto permeable, se usó como referencia la norma ACI-522R-10, que establece ciertos criterios generales sobre el diseño y el comportamiento hidráulico de pavimentos permeables. Si bien la norma impone que la permeabilidad “ K ” puede determinarse con la ecuación 11, la cual solo es aplicable a un permeámetro de cabeza descendente simple, esta norma reconoce otros métodos experimentales adaptados siempre que sean coherentes con el comportamiento del concreto permeable, como es el caso del Método de Carga Variable mostrado en la ecuación 1.

$$K = A/t \dots \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde:

K = Permeabilidad (mm/s)

A = Constante de 7.7 pulgadas

t = Tiempo en segundos

Se realizó una adaptación con tubos de PVC de 1”, donde el dispositivo consiste en un tubo de forma vertical de aproximadamente 60 cm donde se colocó el espécimen, un codo de 90° donde iba a conectarse con un tubo de forma vertical de aproximadamente la misma longitud y al final de ese tubo otro codo de 90° donde se colocó otro tubo vertical de alrededor de 30 cm de longitud y una base de 1” de diámetro. Esta adaptación se siguió en basó en el Método de Cargas variables, tomando como referencia la norma ACI-522R-10, procurando que las diferencias entre las alturas tuvieran una relación de 2:1 y que tuvieran medidas enteras para mayor comodidad en los cálculos a la hora de medir las columnas de agua. Se requirió una probeta de concreto permeable con medidas de 2.54 cm de diámetro por 28.30 cm de altura, vasos de precipitado, cronómetro y una manguera como se muestra en la figura 23.



Figura 23. Adaptación de permeámetro hecha a base de PVC.

Los resultados obtenidos en la prueba de permeabilidad, se pueden inferir en base a la literatura estudiada en el capítulo 2, mostrada en la tabla 9.

Tabla 9. Rangos de permeabilidad por Nazeer *et al.*, (2020), Zhu *et al.*, (2020) y Moretti *et al.* (2020).

Categoría	Rango (cm/s)	Significado
Muy baja permeabilidad	< 0.0001	Material casi impermeable
Baja permeabilidad	0.0001 - 0.001	Concretos convencionales
Moderada permeabilidad	0.001 – 0.1	Concretos permeables
Alta permeabilidad	0.1 – 4.0	Concretos permeables y material de infiltración

3.6. Prueba de captación de CO₂

Ante la problemática ambiental generada por los gases de efecto invernadero y en particular por el CO₂, y a la falta de una metodología específica para medir la captación de este gas, se desarrolló un sistema de captura de CO₂, simulando una corriente del mismo gas. Para realizar el estudio fue necesario el uso de un sistema de permeación de gas que permitiera configurar las condiciones a presión, temperatura y flujo de gas propuesto.

El sistema experimental se puede apreciar en la figura 24, el cual se rediseñó para permitir el paso del gas de forma controlada. Dicho sistema consta de:

- Medidor de CO₂ de entrada
- Adaptación de la entrada de CO₂
- Tubo de PVC de la pieza 1

- Acrílico de la pieza 1
- Muestra de concreto con plastilina para sellar
- Tornillos de ajuste
- Tubo de PVC de la pieza 2
- Medidor de CO₂ de salida

Se colocaron las muestras de concreto entre las 2 placas de acrílico del aparato, para después colocar una membrana delgada de plástico y posteriormente plastilina que recubra toda la muestra y los puntos donde el CO₂ entra y sale de la muestra. Con el cubo colocado se procede a encender los medidores de PPM durante 10 minutos posterior a su calibración para que se adapte al ambiente; con el tiempo transcurrido se procedió a conectar la inyección de dióxido de carbono a uno de los extremos con adaptados con látex para evitar fugas. Con los dispositivos colocados en su lugar y los medidores adaptados, se suministró una inyección de 5 Litros Por Segundo (LPS) del gas durante 5 minutos y a un flujo constante, para pasado el tiempo se pudiera tomar las lecturas de PPM de CO₂ de entrada y salida.

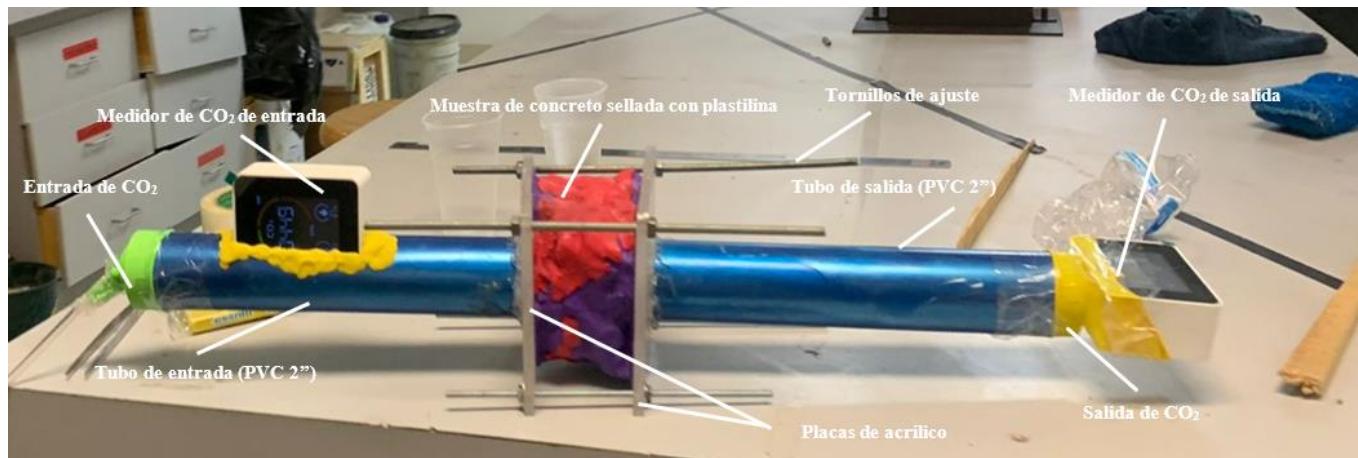


Figura 24. Adaptación del dispositivo de medición de retención de CO₂ de concreto permeable con carbón activado.

3.7. Exposición de núcleos en la cámara de carbonatación

El objetivo en este apartado fue evaluar concretos con la cámara propuesta de carbonatación en un periodo relativamente corto, para lo cual se adaptó la cámara aislada en la cual se recrearon las condiciones necesarias para que este fenómeno se presentará, (véase figura 25), es decir, se controló la temperatura y se alimentó de humedad, así como de volumen de

CO₂ equivalente a 200 veces la concentración en un ambiente natural. Sumado a este arreglo, se realizaron las adaptaciones para medir *in vitro* pruebas electroquímicas, utilizando los especímenes de concretos con varilla de acero en su interior como se muestra en la figura 30.

Para esta prueba se procedió a colocar el núcleo de concreto dentro de la cámara hermética para poder colocar el electrodo de referencia, el cual contenía sulfato de cobre preparado en una solución de agua destilada al 30 %. Después, se colocó la placa de platino, todo esto sobre una esponja humedecida. Con los dispositivos colocados encima del espécimen, se dejó dentro el medidor de partículas de dióxido de carbono y se selló la cámara.

Con esta misma sellada herméticamente, se colocaron los medidores de humedad y se inyectó una cantidad medida de CO₂, para luego conectar los electrodos del potenciómetro a la varilla sobresaliente del núcleo de concreto permeable, el cual se conectó a su vez al electrodo de referencia y a la placa de platino, respectivamente. Por consecuente, se llevó a cabo la inyección del gas y se activó el humidificador conectado al ambiente controlado a razón de 5 L/min dentro de la cámara, con una humedad relativa del 70% y una temperatura de $\pm 23^{\circ}\text{C}$ durante 30 minutos para su calibración y medición de datos expuestos durante 1 hora bajo esas condiciones constantes.



*Figura 25. Núcleo de concreto B expuesto en la cámara de carbonatación *in vitro*.*

3.8. Medición electroquímica de corrosión por carbonatación

Para esta prueba se basó en la norma ASTM G106-89, que se basa en dar las especificaciones y procedimientos para verificar tanto el software como el equipo utilizado en esta clase de mediciones, para asegurar que estas no estén sesgadas por errores de

instrumentación o procesamiento de datos. En el caso de los concretos permeables, esta prueba se usó para determinar cómo el dióxido de carbono al cual estaba destinado a exponerse este tipo de pavimento interfiere en el proceso de carbonatación de los especímenes de concreto al tener una reacción controlada mediante una cámara hermética donde se simulaba un ambiente húmedo y presencia de CO₂.

Para su comienzo, se hizo uso de un potenciómetro compatible con el software EC-Lab®, como el BioLogic EC-Lab, y una cámara hermética en donde se podía suministrar gases. En este caso, se realizó una adaptación de la misma con placas de acrílicos, las cuales estaban selladas con ayuda de una placa de unicel moldeada a las orillas del recipiente, además de unas perforaciones y una base para colocar los dispositivos de medición y los núcleos de concreto a utilizar. También se utilizó un humidificador para alcanzar las condiciones de humedad relativa, un tanque de CO₂ comprimido, medidor de partículas de este mismo gas, una esponja, medidor de humedad, electrodo de referencia y una placa de platino.

Antes de realizar esta prueba con cada uno de los especímenes, previamente estuvieron expuestos a las condiciones anteriormente mencionadas en el inciso 3.7, esto es importante ya que los núcleos debieron haber pasado por estas condiciones previas.

Una vez pasado el tiempo establecido del núcleo a analizar, se utilizó el software de BioLogic EC-Lab, este software está diseñado para controlar y analizar experimentos de electroquímica, como potenciómetros y galvanómetros. Este software permitió ejecutar y analizar la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), obteniendo información de propiedades como la capacidad de almacenamiento de energía, resistencia a la corrosión, y cinética de transferencia de carga. Esto ayudó a interpretar resultados y extraer parámetros clave para comprender el comportamiento electroquímico del concreto.

3.9. Evaluación de profundidad de carbonatación (fenolftaleína)

Para evaluar la difusión del CO₂ y por consiguiente la carbonatación esta prueba se realizó bajo normativa NMX-C-515-ONNCCE-2016, a partir de rociar a una distancia mínima de 30 cm con fenolftaleína al 1 % v/v, con especímenes previamente expuestos a un ambiente rico en CO₂ dentro de una cámara de carbonatación acelerada y evaluada con pruebas electroquímicas.

Esperando de 15 segundos a 1 minuto hasta que el rosa fuera visible a simple vista, repitiendo este mismo procedimiento con los demás especímenes.

Después, se procedió a medir con ayuda del vernier desde la cara exterior del núcleo hacia la parte rosada marcada por la fenolftaleína y desde diferentes puntos un total de 12 veces para capturar las medidas y determinar la profundidad de carbonatación y su durabilidad como se muestra en la figura 26.



Figura 26. Núcleo de concreto rociado con fenolftaleína.

Capítulo 4. Resultados y Discusión

4.1. Desempeño del concreto con carbón activado versus concreto convencional

En los ensayos de resistencia a la compresión en cilindros de concreto, realizados según la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014, se evaluó la resistencia máxima que soportó cada espécimen por triplicado para argumentar reproducibilidad, bajo carga axial. La Tabla 10 muestra los resultados de cada espécimen, reflejando las resistencias específicas alcanzadas según la dosificación y el tiempo de curado.

Tabla 10. Resultados de la prueba de resistencia realizada a los especímenes de concreto convencional, patrón y permeables al 2 % y 5 % de carbón activado.

Resultados de pruebas de resistencia			
Muestra	Días	Peso (kg)	Resistencia (kg/cm²)
Concreto convencional	28	13.05	240.22
Concreto convencional	28	14.20	251.32
Concreto convencional	28	13.53	253.06
Patrón	28	9.26	52.25
Patrón	28	9.40	56.58
Patrón	28	9.78	67.95
Muestra modificada 1 al 2 % (CM1)	28	8.29	54.75
Muestra modificada 1 al 2 % (CM1)	28	9.39	53.24
Muestra modificada 1 al 2 % (CM1)	28	9.55	63.97
Muestra modificada 2 al 5 % (CM2)	28	8.89	58.51
Muestra modificada 2 al 5 % (CM2)	28	8.27	32.61
Muestra modificada 2 al 5 % (CM2)	28	7.82	18.61

La muestra de concreto convencional obtuvo un promedio de 247.87 kg/cm², valor muy cercano al establecido en la dosificación de 250.00 kg/cm², Este resultado confirma que los

especímenes fueron realizados correctamente y cumplen con la resistencia esperada. En el caso de la muestra patrón de concreto permeable sin carbón activado, se obtuvo un promedio de 58.92 kg/cm², una resistencia ideal para los concretos permeables de acuerdo a la literatura estudiada.

En cuanto al CM1 al 2 % de carbón activado, se obtuvo un promedio de resistencia a la compresión de 57.32 kg/cm², muy similar a la resistencia de un concreto permeable sin carbón activado. Respecto al CM2 al 5 % de carbón activado, se obtuvo un promedio de resistencia a la compresión de 36.58 kg/cm², valor que, si bien se encuentra por debajo del umbral óptimo, continúa siendo funcional para aplicaciones donde la resistencia estructural no es crítica.

Los resultados muestran que la adición de carbón al 2 % en el CM1 no tiene una repercusión considerable en la resistencia de este tipo de concretos, siendo casi despreciable. En cuanto a la adición de carbón activado al 5 % del CM2, se demostró que reduce su resistencia a la compresión, pero permite su funcionalidad, por lo que es recomendable no sobrepasar este porcentaje, ya que puede disminuir su resistencia a la compresión.

Como se muestra en la tabla 11, la mayoría de las fracturas se presentaron en la base superior del cilindro, esto debido a que, al no ser una superficie plana en su totalidad, existen irregularidades que provocan estas fracturas porque la fuerza no se distribuye correctamente sobre entre la base de neopreno, la prensa y el espécimen. La mayoría de los cilindros tienen fracturas tipo 1 en la base superior, mientras que unos pocos tienen fracturas tipo 2.

Se puede inferir en base a las fallas en los especímenes presentaron un comportamiento estructural esperado para las fracturas tipo 1. Para las fracturas en especímenes de concreto del tipo 2, se puede suponer que dichas fracturas se presentaron por una dureza variable con ligeras imperfecciones (véase figura 27). Este tipo de fallas permite dilucidar que los especímenes podrían alcanzar valores más elevados de resistencias, pero la rugosidad de los especímenes permeables limita la obtención de estos datos.

De acuerdo a las dosificaciones usadas en base a Li, X., Zhang, Y., & Jiang, H. (2021), las muestras patrón y CM1 superaron el rango de resistencias esperado de 40 – 50 kg/cm², mientras los especímenes de concreto CM2 están por debajo del límite esperado, demostrando que entre mayor sea la cantidad de carbón activado, esta puede perjudicar la resistencia de los concretos permeables adicionados con este material.

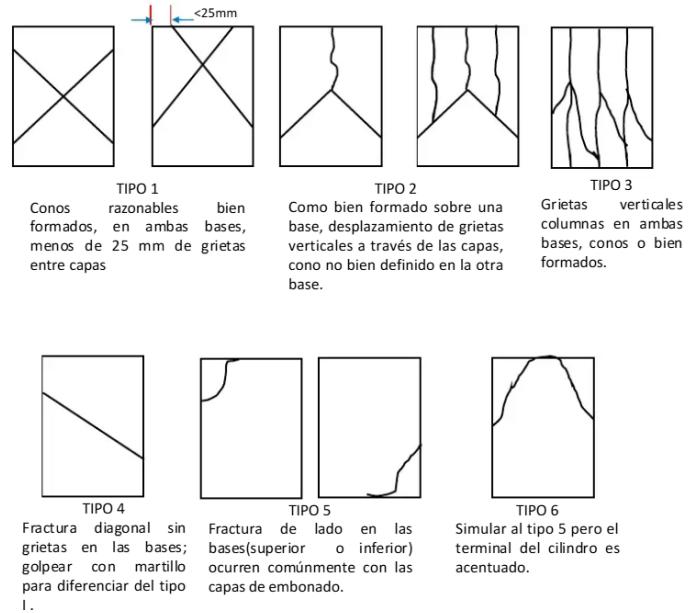


Figura 27. Tipos de fractura en cilindros de concreto.

Fuente: NMX-C-083-ONNCCE-2014.

Tabla 11. Fracturas registradas durante la prueba de compresión de los especímenes de concreto permeable.

Cilindro	Fotografía
Muestra patrón (1) - Fractura tipo I	
Muestra patrón (2) – Fractura tipo I	

Muestra patrón (3) – Fractura tipo 1



CM1 al 2 % (1) – Fractura tipo II



CM1 al 2 % (2) – Fractura tipo I



CM1 al 2 % (3) – Fractura tipo II



CM2 al 5 % (1) – Fractura tipo I



CM2 al 5 % (2) – Fractura tipo II

CM2 al 5 % (3) – Fractura tipo I

4.2. Resultados de la prueba de granulometría

Dentro de la prueba de granulometría, esta misma permitió determinar la distribución del tamaño de las partículas del agregado fino y grueso que se utilizó para realizar las mezclas de concreto permeable, obteniendo los siguientes resultados de los porcentajes retenidos, acumulados y que pasan las mallas utilizadas durante la prueba que se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Distribución de las partículas a lo largo de los tamices empleados, así como las cantidades de material retenido y acumulado.

Denominación	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que pasa
3"	75	0.00	0.00	0.00	100.00
2 ½"	63	0.00	0.00	0.00	100.00
1 ½"	37.5	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25	112.00	5.27	5.27	94.73
¾"	19	164.66	7.75	13.01	86.99
½"	12.5	231.05	10.87	23.88	76.12
3/8"	9.5	228.92	10.77	34.65	65.35
No. 4	4.75	102.48	4.82	39.47	60.53
No. 10	2	207.23	9.75	49.22	50.78
No. 20	0.85	122.78	5.78	54.99	45.01
No. 40	0.425	96.25	4.53	59.52	40.48
No. 60	0.25	78.59	3.70	63.22	36.78
No. 100	0.15	78.28	3.68	66.90	33.10
No. 200	0.075	65.15	3.06	69.97	30.03
Fondo		638.50	30.03	100.00	0.00

Los resultados anteriores, se realizó la curva granulométrica correspondiente como se muestra en la figura 28, además de una comparativa con los rangos ideales de material granulométrico que pasa de acuerdo a la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018 mostrados en la tabla 13 y 14:

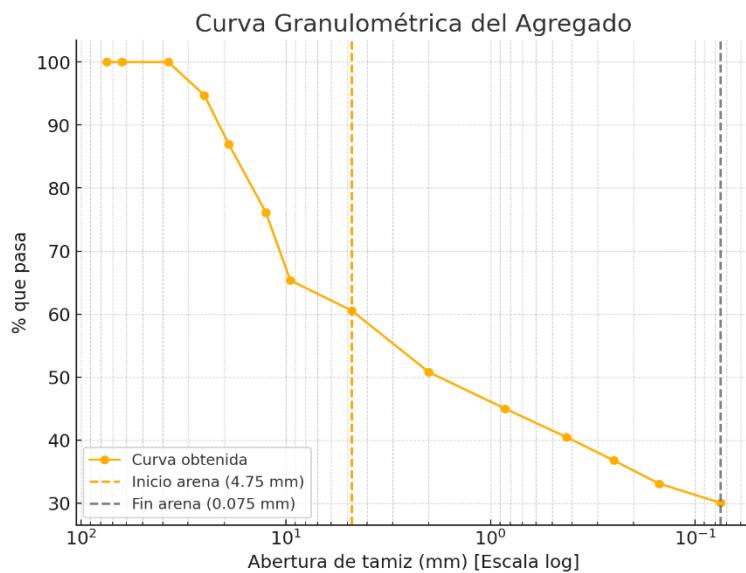


Figura 28. Curva granulométrica obtenida del agregado utilizado.

Tabla 13. Límites de granulometría para agregado fino según la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018.

Malla	% que pasa (NMX-C-111)
9.5 mm (3/8")	100
4.75 mm (No. 4)	95 – 100
2.36 mm (No. 8)	80 – 100
1.18 mm (No. 16)	50 – 85
0.600 mm (No. 30)	25 – 60
0.300 mm (No. 50)	10 – 30
0.150 mm (No. 100)	2 – 10

Tabla 14. Límites granulométricos del agregado grueso, en masa, en porcentaje que pasa de acuerdo a la norma NMX-C-111-ONNCCE-2018.

Tamaño nominal (mm)	100 (4")	90 (3½")	75 (3")	63 (2½")	50 (2")	37.5 (1½")	25 (1")	19 (¾")	12.5 (½")	9.5 (3/8")	4.75 (No. 4)	2.36 (No. 8)	1.18 (No. 16)
90.0 a 37.5 (3½" a 1½")	100	90 a -		25 a -		0 a 0 a -		-	-	-	-	-	-
		100		60		15	5						
63.0 a 37.5 (2½" a 1½")	-	100	90 a	35 a 0 a	0 a	-	-	-	-	-	-	-	-
			70	15	15								
			100										
50.0 a 25.0 (2" a 1")	-	-	-	90 a 35	0 a 0 a	0 a -	-	-	-	-	-	-	-
				100 a	15	5	5						
				70									
50.0 a 4.75 (2" a No. 4)	-	-	-	95 a -	35 a 10	0 a -	-	-	-	-	-	-	-
				100 a	70 a	5							
				100									
				30									
37.5 a 19.0 (1½" a ¾")	-	-	-	-	90 a 20 a	0 a -	-	-	-	-	-	-	-
					55 a	15							
				100									
				100									
37.5 a 4.75 (1½" a No. 4)	-	-	-	-	95 a 35 a	10 a 0 a	-	-	-	-	-	-	-
					70 a	5							
				100									
				30									
25.0 a 12.5 (1" a ½")	-	-	-	-	100 a 20 a	0 a -	-	-	-	-	-	-	-
					55 a	15							
				100									
25.0 a 9.5 (1" a 3/8")	-	-	-	-	100 a 40 a	10 a 0 a	-	-	-	-	-	-	-
					85 a	15							
				100									
				40									
25.0 a 4.75 (1" a No. 4)	-	-	-	-	95 a 25 a	0 a 0 a	-	-	-	-	-	-	-
					60 a	10	10						
				100									
19.0 a 9.5 (¾" a 3/8")	-	-	-	-	100 a 20 a	0 a 0 a	-	-	-	-	-	-	-
					55 a	15	5						
				100									
19.0 a 4.75 (¾" a No. 4)	-	-	-	-	100 a 20 a	0 a 0 a	-	-	-	-	-	-	-
					55 a	15	5						
				100									
12.5 a 4.75 (½" a No. 4)	-	-	-	-	-	-	40 a 0 a	-	-	-	-	-	-
							15						
				70									
9.5 a 2.36 (3/8" a No. 8)	-	-	-	-	-	-	-	100 a 85 a	10 a 0 a	0 a 5	-	-	-
								100	30	10			

Al comparar los resultados experimentales establecidos en la norma, se puede inferir que la prueba realizada no cumple con los requisitos al presentar un exceso en los tamices No. 4 y No. 8, lo que clasifica la muestra como un material más fino de lo requerido normativamente para un concreto hidráulico convencional. Sin embargo, al trabajar con un concreto permeable adicionado con carbón activado, esta desviación es funcional para garantizar la conectividad de vacíos.

Como se muestra en la curva granulométrica obtenida, la forma descendente de la gráfica indica que está bien graduada, además de que se muestra que un 35 % del material es agregado fino, un 30 % pasa la malla No. 200 y un 35 % es agregado grueso aproximadamente. Haciendo una comparación con las gráficas de granulometría recomendadas, se puede determinar el tipo de agregado que se tiene para hacer un concreto permeable ideal (véase figura 29).

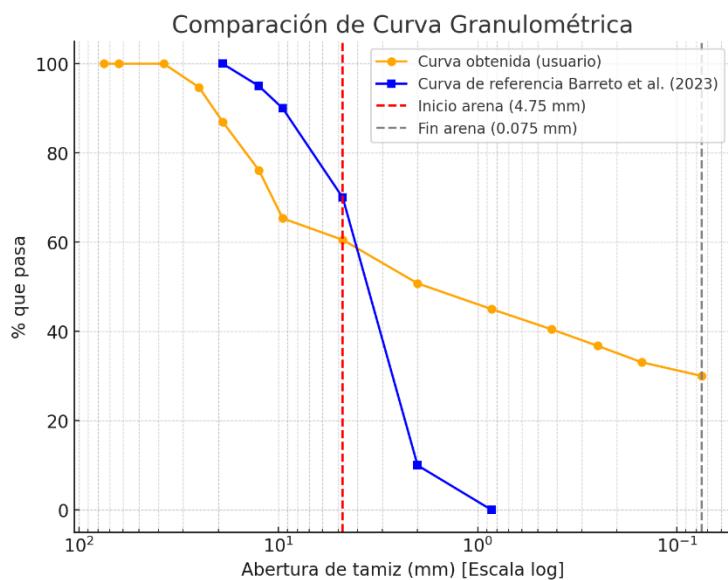


Figura 29. Comparativa de la curva granulométrica obtenida con la curva de Barreto et al. (2023).

El módulo de finura se puede determinar con los datos de la tabla 12 y utilizando la ecuación 12.

$$MF = \frac{\Sigma \% \text{ Retenido Acumulado } (6'' + 3'' + 1\frac{1}{2}'' + 3/4'' + N^o 4 + N^o 8 + N^o 16 + N^o 30 + N^o 50 + N^o 100)}{100} \dots \text{ (Ecuación 12)}$$

Usando la fórmula anterior, se obtiene un Módulo de Finura de 1.19, menor al rango mínimo de 2.3 establecido para una granulometría adecuada.

Haciendo una comparativa con la granulometría recomendada por Barreto et al. (2023) (Figura 34) para concretos permeables y de acuerdo a la normativa NMX-C-111-ONNCCE-2018, se puede ver que existe un mayor porcentaje que pasa la malla No. 4, por lo que el agregado tiene más facción fina de manera moderada que la granulometría recomendada, presenta una mayor uniformidad comparada con la gráfica de referencia y tiene cantidad similar de agregado grueso, por lo que, si bien la gráfica no es exacta, esto indica que el concreto permeable podría tener menor capacidad de drenaje pero sin repercutir en la funcionalidad del concreto permeable.

4.3 Evaluación experimental de la permeabilidad de concreto

El propósito de esta prueba es cuantificar la capacidad de infiltración del concreto permeable, esta es una propiedad esencial que asegura el paso del agua a través de su matriz cementante y lo diferencia de cualquier otro tipo de concreto. A diferencia de estos últimos, donde la permeabilidad es indeseable, en los concretos permeables constituye su principal función hidráulica.

La muestra patrón de concreto permeable, presentó un tiempo mucho menor con respecto a los demás especímenes, pudiendo deberse a tener menor cantidad de finos que las demás probetas. Los resultados en el CM1 dejan entre ver como repercute el carbón activado en la permeabilidad, aumentando 1 segundo respecto a la muestra de concreto permeable patrón sin adición de este material, esto debido a que existe mucha más obstrucción del flujo, dificultando un poco su infiltración. En cuanto al CM2 presenta una permeabilidad menor al CM1, teniendo tiempos de infiltración bastante similares entre sí, por lo que su coeficiente de permeabilidad “*k*” es bastante similar.

La muestra patrón y las muestras modificadas, en comparación con la tabla 9, presentaron una alta permeabilidad, la cual es aceptable según Nazeer et al., (2020), Zhu et al., (2020) y Moretti et al. (2020). Es importante recalcar que una alta permeabilidad, aunque es deseable en ciertas aplicaciones, puede ser también un riesgo para la durabilidad del concreto frente a agentes agresivos si no se consideran medidas de protección complementarias. Con los resultados se puede afirmar que este concreto permeable cumple su función y es adecuado para la infiltración del agua al subsuelo

Evaluando la participación del carbón activado presente como aditivo en los especímenes de concreto, se observa que disminuye ligeramente su permeabilidad, posiblemente por la obstrucción parcial de los poros por las partículas finas del aditivo. Aunque el concreto mantiene su capacidad de infiltración, esta reducción sugiere que mientras más grande sea la adición de este material, este mismo puede interferir con esta propiedad tan característica del concreto permeable como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Resultados obtenidos de la prueba de permeabilidad de las probetas de concreto permeable.

Resultados de pruebas de permeabilidad		
Espécimen	Resultado de Permeabilidad (k)	Interpretación
Muestra Patrón	1.94	Alta permeabilidad
CM1 al 2 % de carbón activado	1.59	Alta permeabilidad
CM2 al 5 % de carbón activado	1.49	Alta permeabilidad

Los resultados obtenidos a partir de la prueba de permeabilidad revelaron que el concreto ensayado presentó una alta capacidad de infiltración de agua, lo que indica una estructura interna con una conectividad significativa de poros. Durante la realización del ensayo, se registraron tiempos de entre 4 a 6 segundos, considerablemente bajos, lo cual es característico de mezclas con vacíos interconectados y una distribución granulométrica optimizada. Este comportamiento sugiere que el material evaluado cumple con los parámetros esperados para este tipo de concretos permeables ya que priorizan una rápida infiltración del agua.

La alta permeabilidad observada puede atribuirse a varios factores, entre ellos la baja proporción de finos en la mezcla, la presencia de agregados gruesos de tamaño uniforme, y una

compactación controlada que evita la obstrucción de los canales de flujo. Este tipo de desempeño hidráulico implica que estos especímenes son eficaces para reducir la escorrentía superficial, facilitando la recarga del acuífero y mitigando riesgos asociados a inundaciones urbanas. Además, desde el punto de vista ambiental, estos concretos pueden usarse como estrategias como drenajes sostenibles y el manejo adecuado de los recursos hídricos.

4.4. Comportamiento de la captura de CO₂ y variación en la profundidad de carbonatación

Considerando los mismos diseños de mezcla para concretos permeables y de referencia, dichos especímenes fueron sometidos a pruebas por triplicado de carbonatación por indicador de fenolftaleína, sensor de CO₂ y electroquímicas enfocadas a identificar relaciones entre los parámetros que infieren la carbonatación presente en el concreto y su correlación con la captura de CO₂ presente en el sistema y que es de interés es en esta tesis.

Los diferentes especímenes fueron expuestos a las condiciones de laboratorio, considerando una temperatura de 25 °C, así como humedades relativas entre 65 % - 70 %. Adicionalmente para lograr un equilibrio entre el exterior y el interior de los poros, se consideró un periodo de exposición acelerada en la cámara de carbonatación implementada para el desarrollo de la presente investigación (véase figura 30), antes de ser sometido a la evaluación por fenolftaleína como indicador de carbonatación y determinación de la profundidad de la carbonatación.

En este periodo de exposición se dispusieron en una cámara de carbonatación de diseño propio para el control de CO₂, HR y temperatura. Este tiempo de exposición, es el necesario para que la carbonatación alcance una profundidad lineal a una mayor concentración de CO₂ (5-10 %).

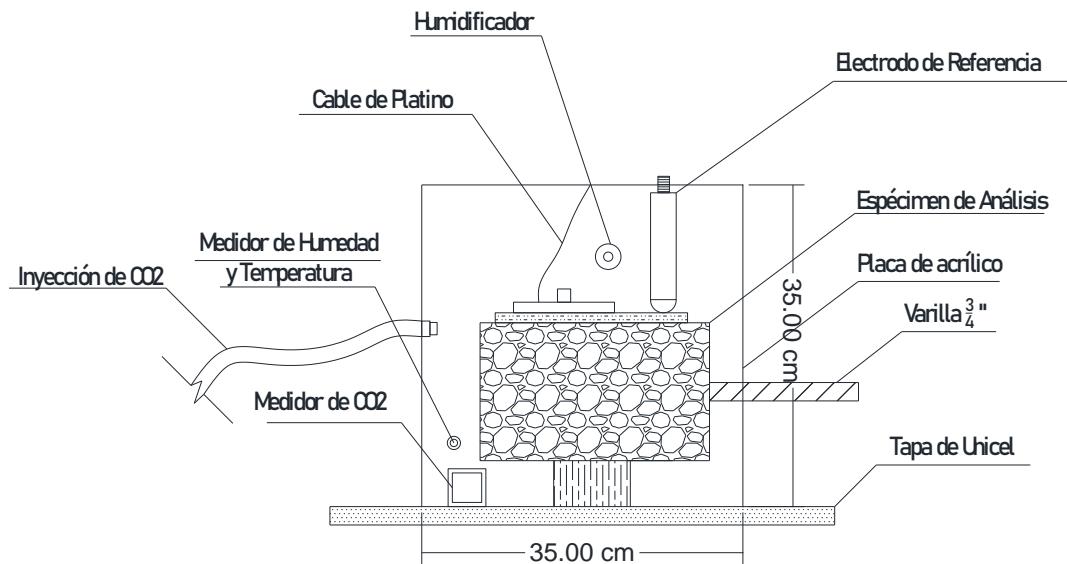


Figura 30. Representación de la cámara de carbonatación acelerada.

La evaluación de la profundidad de carbonatación que se realizó en los núcleos de concreto aplicando la ecuación 3 y 4, basada en el promedio de varias mediciones radiales mediante un vernier, permitió estimar con mayor precisión el avance del frente carbonatado.

Los ensayos de carbonatación mostraron que los núcleos de concreto simple de la serie D (Concreto convencional), alcanzaron profundidades de 1.6 a 2.2 cm, evidenciando comportamiento moderado frente al CO₂ y buena compactación. En los especímenes de la serie B (CM1 al 2 % de carbón activado), los valores fueron dispersos mostrando una saturación completa y hasta 1.8 cm, indicando que la adición de carbón activado puede reducir o aumentar la carbonatación según su homogeneidad con la mezcla. Los núcleos de la serie C (CM2 al 5 % de carbón activado), registraron profundidades de 2.2 a 2.6 cm, lo que sugiere mayor susceptibilidad al CO₂ posiblemente al exceso de finos que no densifica la matriz. Finalmente, la serie A (Muestra Patrón) presentó una profundidad de carbonatación de 1.7 a 2.4 cm, mostrando que, pese a su alta porosidad, su desempeño es similar al concreto simple, aunque más vulnerable a la carbonatación. Los núcleos de concreto permeable, con una mayor porosidad que el concreto convencional, presentaron una profundidad de carbonatación más alta, coherente con un difusivo efectivo de CO₂ mayor, y, por ende, un avance mucho más rápido.

Tabla 16. Resultados de las mediciones de radios en los núcleos de CM1, CM2, Muestra patrón y Concreto convencional mediante el uso de las ecuaciones 3 y 4.

Fotografía del espécimen	Profundidad de carbonatación (mm)
Muestra concreto simple (D1) 	16.13
Muestra concreto simple (D2) 	13.58
Muestra concreto simple (D3) 	22.17
CM1 (B1) 	26.33

CM1 (B2)



Completamente carbonatado

CM1 (B3)



18.58

CM2 (C1)



25.92

CM2 (C2)



22.25

CM2 (C3)



22.33

Muestra Patrón (A1)



18.08

Muestra Patrón (A2)



17.58

Muestra Patrón (A3)



24.42

4.5. Resultados de la captación de CO₂

Apoyados con un sensor de CO₂ e implementación de dispositivo, con especímenes de dimensiones 7 cm x 7 cm x 5 cm se evaluó la captación de dióxido de carbono dentro de las muestras adicionadas con carbón activado y la muestra patrón, se realizó una adaptación que permitió la medición directa de las concentraciones de CO₂ en los puntos de entrada y salida como se mencionó en el capítulo 3 en el apartado 3.7. Prueba de captación de CO₂, Con este dispositivo de medición de partículas de dióxido de carbono se buscó registrar las variaciones entre las mediciones de entrada y salida del sistema de los especímenes de concreto, junto con la captación de este gas, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 17.

Tabla 17. Resultados de la medición de captación de CO₂ en las muestras modificadas 1, 2 y patrón.

Resultados del CM1

Prueba 1

Tiempo de Reacción (seg)	Tiempo de Exposición (seg)	LPS C02	ppm (Equivalente)	Medición Entrada	Medición Salida
40	7	5	527.93	2127	642

Prueba 2

Tiempo de Reacción (seg)	Tiempo de Exposición (seg)	LPS C02	ppm (Equivalente)	Medición Entrada	Medición Salida
43	6	10	1055.85	2413	887

Resultados del CM2

Prueba 1

Tiempo de Reacción (seg)	Tiempo de Exposición (seg)	LPS C02	ppm (Equivalente)	Medición Entrada	Medición Salida
55	8	15	1583.78	3535	1003

Prueba 2

Tiempo de Reacción (seg)	Tiempo de Exposición (seg)	LPS C02	ppm (Equivalente)	Medición Entrada	Medición Salida
64	7	20	2111.70	3876	1145

Resultados de muestra patrón

Prueba 1

Tiempo de Reacción (seg)	Tiempo de Exposición (seg)	LPS C02	ppm (Equivalente)	Medición Entrada	Medición Salida
50	10	15	1583.78	3975	3798

Prueba 2

Tiempo de Reacción (seg)	Tiempo de Exposición (seg)	LPS C02	ppm (Equivalente)	Medición Entrada	Medición Salida
59	9	20	2111.70	3687	3256

Los ensayos piloto confirmaron la eficacia del dispositivo de captación (una celda de flujo con dos placas de acrílico, sellada con membrana plástica y plastilina), que permite inyectar dióxido de carbono a 5 L/s durante 5 minutos y registrar tras 10 minutos de calibración, las concentraciones ppm de entrada y salida mostraron que las mezclas con carbón activado retienen CO₂ de forma constante, donde la CM1 alcanzó una disminución de 68.8 % y 63.2 %; CM2 71.6 % y 70.4 %, en contraste, la muestra patrón alcanzó una disminución de 4.78 % y 11.68 %, aun bajo tiempos y caudal equivalentes. Esta respuesta cuantitativa del dispositivo se correlaciona con los apartados de profundidad de carbonatación ya que las series con carbón activado se ubicaron en rangos moderados de entre 1.6 cm a 2.6 cm, lo que indica una mayor retención de dióxido de carbono.

4.6. Análisis comparativo de las propiedades electroquímicas

Con el propósito de evaluar la influencia de CO₂, principal gas de efecto invernadero, sobre el comportamiento electroquímico del sistema acero-concreto permeable, se realizó un conjunto de evaluaciones en relación a la interacción electroquímica del CO₂ con una superficie metal-concreto permeable mediante la técnica de Potencial a Circuito abierto (OCP, por sus siglas en inglés) y Espectroscopia Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés correspondientes a Electrochemical Impedance Spectroscopy).

Con apoyo de un potenciómetro Biologic SP150, se efectuó el estudio EIS utilizando un sistema de medición consistió en un arreglo de tres electrodos: (i) electrodo de trabajo (EW), representado por la varilla de acero embebida en el

concreto; (ii) electrodo de referencia (ER) de Cu/CuSO₄; y (iii) contraelectrodo (CE) de platino embebido en resina epóxica, circundado por un anillo de acero inoxidable para minimizar caídas óhmicas y garantizar certeza en la medición. Todo este arreglo de tres electrodos fue evaluado in situ dentro de la cámara de carbonatación experimental, diseñada para mantener un ambiente controlado de exposición de CO₂ (véase figura 30), con las condiciones de temperatura de 25 °C, HR del 70 % y una concentración de CO₂ al 10 %. que garantizaran un ambiente saturado de carbonatación sin fugas, una frecuencia senoidal de entre 100 kHz a 10 mHz, con un tiempo de estabilización de 10 minutos.

4.6.1 Potencial a circuito abierto.

Considerando que la medición del potencial a circuito abierto (OCP, por sus siglas en inglés) en concretos reforzados se utiliza como una técnica electroquímica no destructiva para evaluar la probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo. A través de un electrodo de referencia (comúnmente Cu/CuSO₄), se mide el potencial eléctrico que desarrolla el acero embebido respecto a dicho electrodo, lo cual da una indicación del estado pasivo o activo del refuerzo. Por ello, se determinó el potencial de corrosión (E_{corr}) a circuito abierto, utilizando un electrodo de referencia de Cobre y un multímetro de alta impedancia, con una periodicidad de 1 día hasta completar 3 días. El arreglo experimental dentro de la cámara de carbonatación diseñada fue en base al procedimiento descrito por Hemkemeier et al. (2022) y como se muestra en el ejemplo de la figura 31.

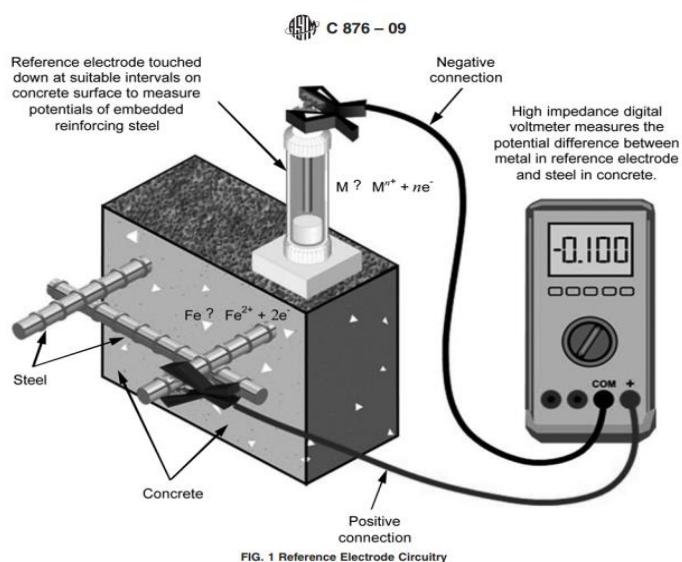
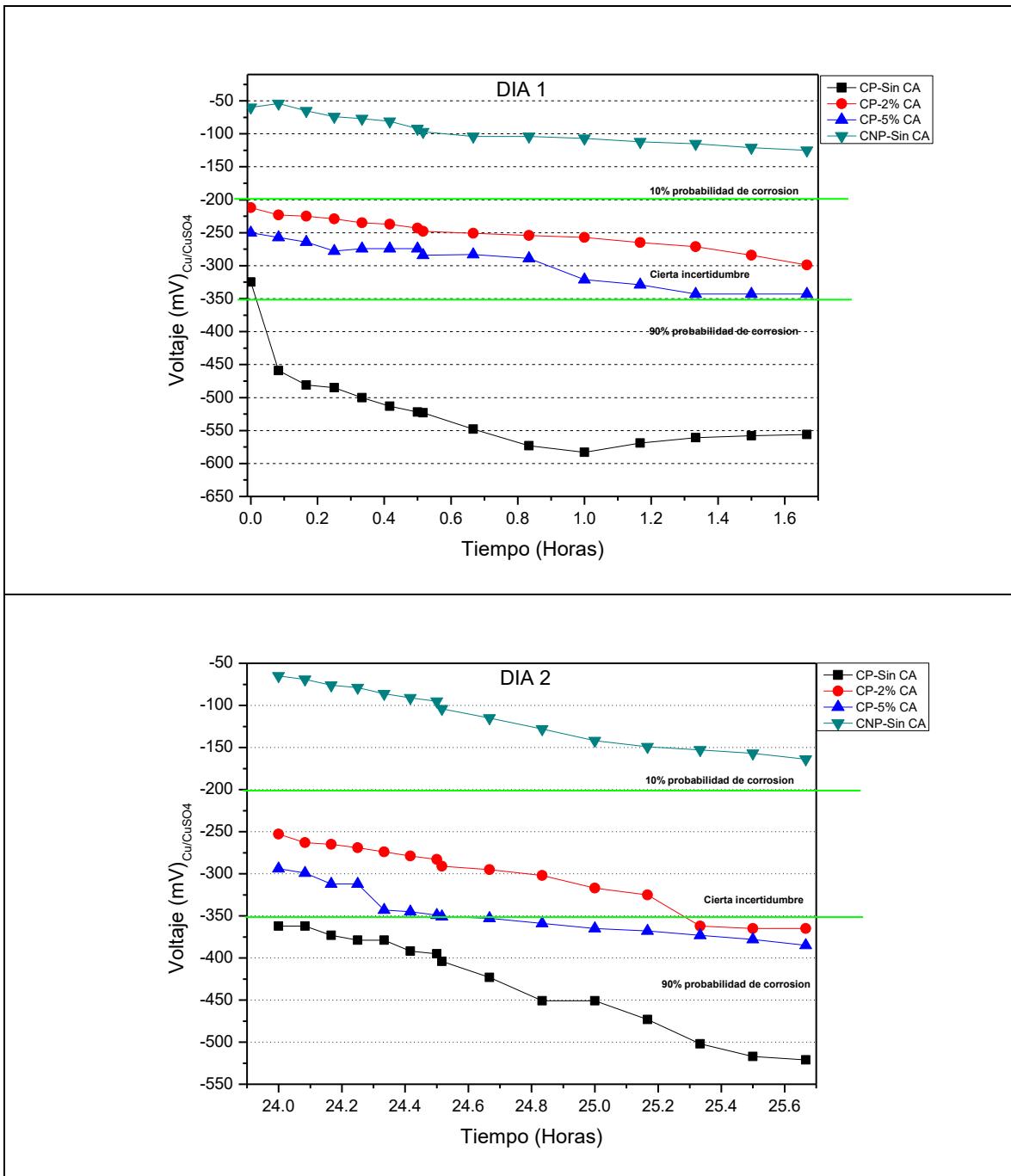


Figura 31. Medición de potencial a circuito abierto de especímenes de concreto armado convencionales y permeables.

En la norma ASTM C876-09 (“Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”), se establece el procedimiento para realizar esta medición y se definen los criterios de interpretación:

- Potenciales más positivos que -200 mV (Cu/CuSO₄): indican que existe una alta probabilidad de que el acero NO esté corroído.
- Potenciales más negativos que -350 mV (Cu/CuSO₄): señalan una alta probabilidad de que el acero esté en estado activo de corrosión.
- Valores intermedios (entre -200 y -350 mV): la condición de corrosión es incierta y deben considerarse mediciones adicionales.

Considerando lo anterior, se presentan los resultados obtenidos en el presente estudio, destacando que el concreto permeable sin carbón activado (CP-Sin CA), carbonatado en la cámara, presentó un comportamiento mucho más susceptible a la corrosión (más activo), con valores más negativos a -350 mV, ubicándose en la zona de 90% de probabilidad de corrosión en comparación con el resto de los especímenes, seguido del concreto permeable con el 5 % y 2 % de adición de carbón activado respectivamente (CP-2 % CA y CP-5 % CA), los cuales fueron pasando de la zona de valores intermedios (entre -200 y -350 mV) a la zona de alta probabilidad de corrosión al avance de los días de exposición. El espécimen con mayor resistencia a la corrosión, ubicándose en potenciales pasivos, valores más positivos a -200 mV, ubicándose en la zona con un 10 % de probabilidad de corrosión, fue para el concreto convencional sin adición de carbón activado (CNP-Sin CA) (véase figura 32).



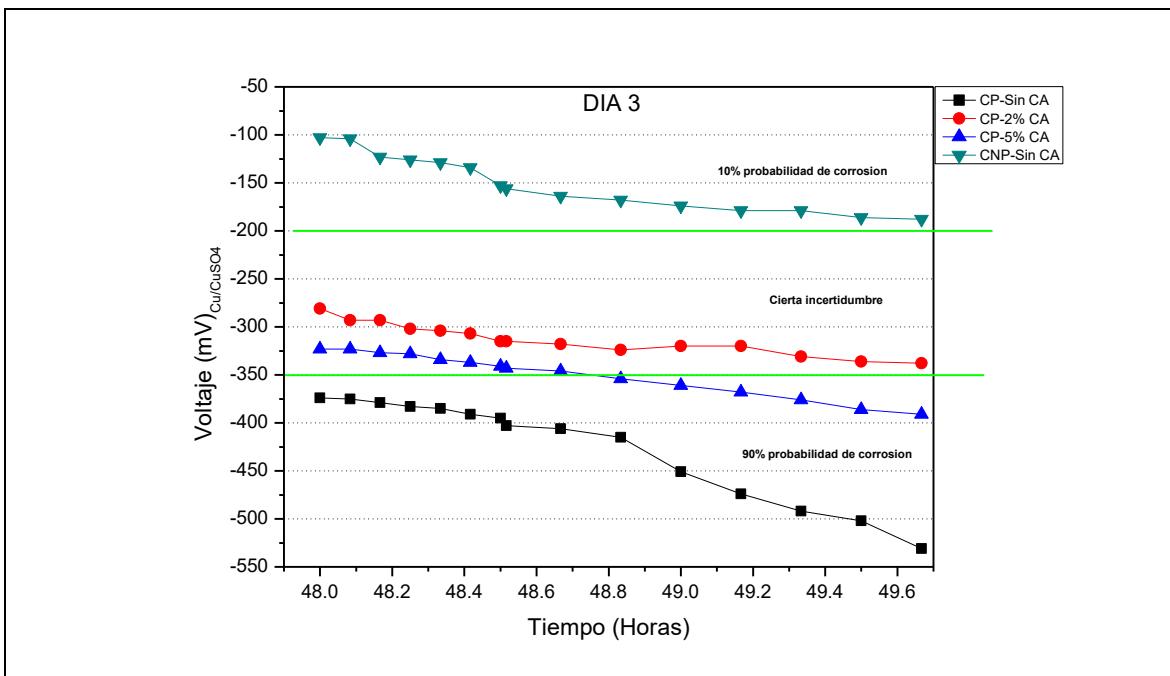


Figura 32. Potencial de corrosión Ecorr, a potencial de circuito abierto de varillas de acero embebidos en concretos convencionales y permeables sin y con adición de carbón activado (2 y 5 %).

Era de esperar que el concreto permeable sea más susceptible a la corrosión, pero para los propósitos de trabajo esto fortalece la participación del carbón activado y porosidad del concreto como captadores de CO₂. En condiciones de exposición a ambientes saturados en CO₂, la disolución del gas en los poros del concreto genera ácido carbónico, lo que provoca una disminución del pH y la consecuente desestabilización de la capa pasiva protectora del acero de refuerzo. Este fenómeno se refleja en desplazamientos del potencial de corrosión hacia valores más negativos (≤ -350 mV vs. Cu/CuSO₄), los cuales, de acuerdo con la norma ASTM C876-09, se asocian a una alta probabilidad de corrosión activa. La adición de carbón activado en mezclas de concreto ha mostrado influir en este proceso, ya que su elevada área superficial y capacidad de adsorción permiten la captación de CO₂ en la matriz porosa.

Si bien esta retención puede retardar parcialmente la carbonatación, también modifica la distribución de especies iónicas y la conductividad del sistema, lo que se traduce en lecturas de potencial más negativos y, por tanto, en una interpretación electroquímica de mayor susceptibilidad a corrosión (Cho y Kim, 2020).

4.6.2 Impedancia de espectroscopía electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés)

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica no destructiva aplicada en concretos reforzados para evaluar el estado de corrosión del acero embebido y la durabilidad del sistema. Consiste en aplicar una señal alterna en un rango de frecuencias y analizar la respuesta del material, lo que permite determinar la resistencia a la polarización (relacionada con la velocidad de corrosión) y la resistividad y capacitancia del concreto, vinculadas a su porosidad, grado de saturación y capacidad de transporte iónico (McCarter, 1996). Los resultados suelen representarse en diagramas de Nyquist, que muestran la relación entre resistencia y reactancia, y en diagramas de Bode, tanto en su variante de módulo de impedancia como en la de ángulo de fase, lo que facilita la interpretación de procesos de transferencia de carga y difusión de especies. De esta manera, la EIS permite identificar la estabilidad de la capa pasiva del acero y la influencia de agentes agresivos como CO_2 , siendo una herramienta clave para diagnosticar la integridad del concreto y predecir su desempeño a largo plazo (Lazanas & Prodromidis, 2023).

Con apoyo de un potenciómetro Biologic SP150, se realizó un estudio EIS utilizando como electrodos de trabajo (EW), las varillas embebidas en los cilindros de concreto permeable e identificados de acuerdo a la cantidad de aditivo de carbón activado presente y sin aditivo como; CP-Sin CA (concreto permeable sin carbón activado), CP-2 % CA (concreto permeable con 2 % de carbón activado), CP-5 % CA (concreto permeable con 2 % de carbón activado) y CNP-Sin CA (Concreto no permeable sin carbón activado); un electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) como electrodo de referencia (ER) y como contraelectrodo un alambre de platino de contacto embebido en resina epóxica y circundado por anillo de acero inoxidable para evitar caídas óhmicas para garantizar certeza en la medición, todo este arreglo de tres electrodos fue evaluado en la cámara de carbonatación diseñada y adaptada para evaluar *in situ* en un ambiente carbonatado (ver figura 30), con las condiciones de temperatura, HR y al 10 % de CO_2 que garantizan un ambiente saturado de carbonatación sin fugas. Se manejó un pulso sinusoidal de 10 mV con respecto al potencial de corrosión de la varilla (E_{corr}) y un intervalo de frecuencias de 10 mHz hasta 100 kHz. Se presenta el diagrama Bode en su presentación de módulo de fase y ángulo de fase (véase figura 33 y 34), así como el diagrama Nyquist (véase figura 35), después de colocar los especímenes en un proceso de carbonatación en la cámara diseñada y posteriormente realizar la medición de EIS.

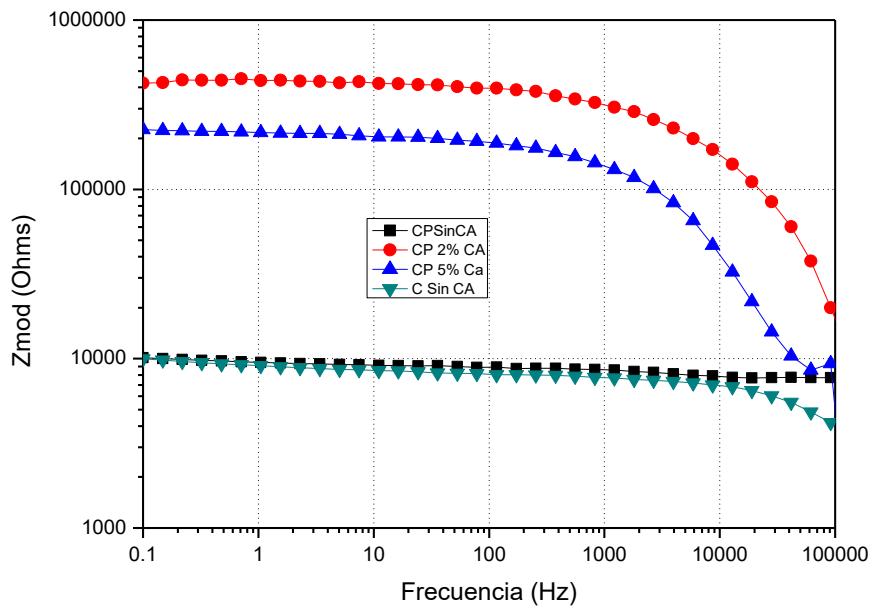


Figura 33. Módulo de fase de EIS de especímenes de concreto reforzado en cámara de carbonatación diseñada.

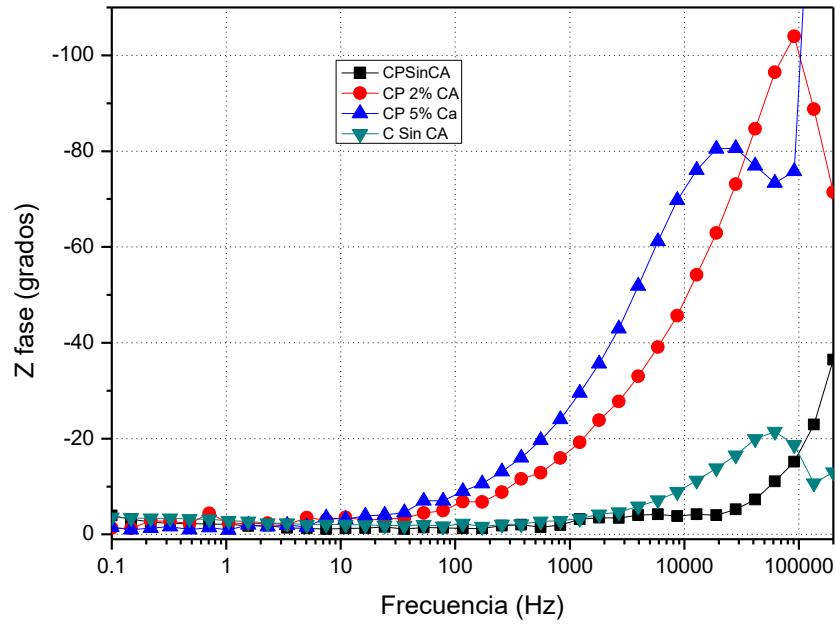


Figura 34. Ángulo de fase de EIS de especímenes de concreto reforzado en cámara de carbonatación diseñada.

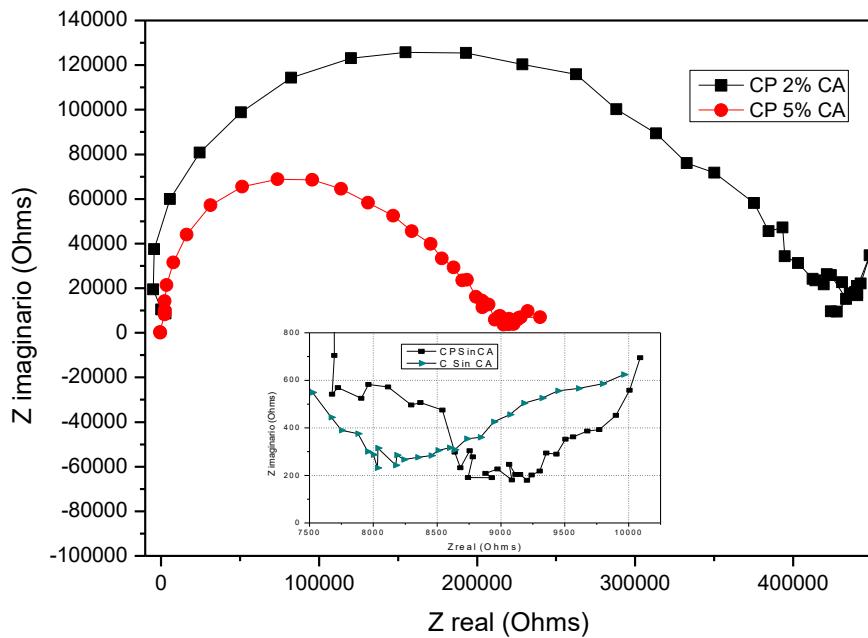


Figura 35. Diagrama de Nyquist de EIS de especímenes de concreto reforzado en cámara de carbonatación diseñada.

En el desarrollo experimental de los especímenes de concreto permeable con adición de carbón activado como material captador de CO_2 , se logró obtener información inicial a través de ensayos de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Estos resultados representan un primer acercamiento valioso para comprender el comportamiento electroquímico del material y su potencial como sistema funcional de captura y almacenamiento de CO_2 .

Si bien los tiempos disponibles para la experimentación no permitieron extender los períodos de medición tanto como sería deseable para este tipo de especímenes, los datos obtenidos evidencian tendencias que respaldan la viabilidad de este enfoque. De manera particular, se comprobó que la cámara diseñada para la medición cumple adecuadamente con los requerimientos básicos de un sistema de registro *in vivo*, ofreciendo una alternativa de bajo costo, reproducible y de fácil implementación en entornos de laboratorio.

Este desarrollo constituye un avance significativo, ya que abre la posibilidad de realizar estudios electroquímicos de mayor duración en trabajos futuros, sin depender de equipos de alto costo ni de espacios especializados que suelen limitar este tipo de investigaciones. La cámara,

al ser un prototipo adaptable, puede ser mejorada y escalada para permitir evaluaciones prolongadas, lo que contribuiría a fortalecer el análisis de la durabilidad, capacidad de adsorción de CO₂ y desempeño a largo plazo de concretos permeables modificados con adiciones activas.

En conjunto, aunque los resultados presentados en esta fase son preliminares, confirman la factibilidad técnica del método propuesto y sientan las bases para continuar con estudios más profundos que integren la evaluación electroquímica a largo plazo, consolidando así el papel del carbón activado en concretos como una estrategia sustentable para la mitigación de emisiones de CO₂.

4.7. Discusión técnica y viabilidad práctica de uso en el sector construcción

Los resultados obtenidos durante esta investigación, demostraron que la incorporación de carbón activado en mezclas de concreto permeable puede aportar beneficios funcionales adicionales, más allá de su capacidad de infiltración de agua, pasando a ser también un sistema de captación de CO₂.

Técnicamente las probetas de concreto mostraron una buena permeabilidad, revenimiento, resistencia a la compresión, profundidad de carbonatación, captación de CO₂ y buenos resultados de EIS, que, desde el punto de vista de durabilidad, es adecuado para su uso en ambientes hostiles.

En cuanto a su viabilidad práctica, este concreto podría aplicarse en elementos no estructurales como pavimentos permeables, camellones, banquetas o andadores en el ámbito hidráulico, mientras que en el de captación de dióxido de carbono puede ser usado además como un filtro en fábricas de ladrillos al aire libre, donde existe una gran producción de este gas de invernadero, pudiendo servir como un filtro por el cual el humo producido pueda pasar.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Conclusiones Generales

Los resultados obtenidos en este estudio demostraron la viabilidad técnica de desarrollar un concreto permeable modificado con carbón activado, capaz de mantener sus propiedades hidráulicas y mecánicas, a la vez que ofrece un rendimiento respetuoso con el medio ambiente. Las mezclas con adiciones de carbón activado de 2 % y el 5 % en volumen total de cemento mantuvieron una estructura estable con poros interconectados y una trabajabilidad adecuada, lo

que confirma la posibilidad de incorporar este material adsorbente en matrices cementantes sin comprometer su funcionalidad.

Durante la fase de diseño y dosificación, se seleccionó una mezcla con una relación agua/cemento de 0.35, lo que garantiza la cohesión de la mezcla y una adecuada dispersión de los agregados. El análisis granulométrico confirmó que una proporción predominante de agregados gruesos de 19 mm de espesor, acompañada de una cantidad mínima de finos, promueve la conectividad de los poros y, en consecuencia, una eficiente infiltración de agua. Si bien el módulo de finos se situó por debajo de los límites reglamentarios, su comportamiento hidráulico confirmó que esta configuración granulométrica es funcional en hormigones permeables destinados a la mitigación de aguas pluviales y ambientales.

En ensayos mecánicos, las resistencias promedio obtenidas fueron de 58.9 kg/cm² para la mezcla patrón, 57.3 kg/cm² para el concreto con 2 % de carbón activado y 36.6 kg/cm² para la mezcla con 5 %. Estos valores se encuentran dentro de los límites aceptables para elementos no estructurales y demuestran que la adición de carbón activado en proporciones moderadas no altera significativamente la resistencia a la compresión. La evaluación hidráulica arrojó coeficientes de permeabilidad de 1.94 cm/s, 1.59 cm/s y 1.49 cm/s, respectivamente, lo que sitúa a todas las mezclas en el rango de alta permeabilidad. Estos resultados confirman que el material mantiene su capacidad de drenaje y es adecuado para sistemas de infiltración urbana como aceras, ciclovías, isletas y pasos peatonales.

Las pruebas de adsorción de dióxido de carbono identificaron una retención promedio del 68 % al 71 % en mezclas con carbón activado, en comparación con valores inferiores al 12 % en la muestra estándar. Este comportamiento confirma la capacidad de adsorción del adsorbente, combinada con su elevada área superficial y estructura microporosa. Las pruebas con fenolftaleína mostraron profundidades de carbonatación de 1.7 a 2.4 cm para la muestra estándar, de 2.2 a 2.6 cm para el hormigón con carbón activado al 5 % y de 1.6 a 2.2 cm para el concreto convencional, lo que demuestra una mayor difusión de CO₂ en mezclas más porosas. Estos resultados confirman que el carbón activado no solo promueve la adsorción de gases en la superficie, sino que también modifica el comportamiento de difusión del sistema cemento-carbón, sin causar un deterioro prematuro del material.

El análisis electroquímico mostró que los valores del potencial de corrosión (Ecorr) se desplazaron hacia valores más negativos a medida que aumentaba el porcentaje de carbón activado, alcanzando -350 mV en comparación con el electrodo de Cu/CuSO₄ en una mezcla al 5 %. Este fenómeno se explica por la mayor porosidad y conductividad iónica, que facilitan la difusión del dióxido de carbono y el electrolito dentro del concreto. Sin embargo, estos resultados no implican una pérdida estructural esperada, sino más bien un cambio esperado en el entorno electroquímico debido a la naturaleza del material. Las pruebas de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) confirmaron que las mezclas mantuvieron una resistencia a la polarización estable, lo que indica que la presencia de carbón activado no causó corrosión activa ni debilitó la integridad dieléctrica del sistema acero-hormigón.

En general, el hormigón infiltrado con un 2 % de carbón activado logró el mejor equilibrio entre resistencia mecánica, permeabilidad y capacidad de adsorción de CO₂. Aumentar la concentración al 5 % incrementó la difusión de gases y produjo valores de Ecorr más negativos, lo que indica una microestructura más abierta y conductora, adecuada para la captura de gases, pero menos propicia para la resistencia estructural. En general, los resultados confirman que la incorporación controlada de carbón activado es técnicamente viable y ambientalmente beneficiosa, y ofrece una alternativa sostenible que contribuye simultáneamente a la gestión del agua de lluvia y a la mitigación del cambio climático mediante la captura de carbono.

5.2. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda ampliar los períodos de exposición de los núcleos en la cámara de carbonatación para analizar su comportamiento ante ciclos prolongados de humedad y concentración de dióxido de carbono, así como reproducir condiciones ambientales diversas, como entornos urbanos, industriales y marinos. Resulta pertinente desarrollar un protocolo estandarizado para cuantificar la captación de este gas de invernadero en materiales cementantes que incorporen parámetros de flujo, temperatura, presión y tiempo de exposición, con el fin de obtener resultados comparables entre investigaciones.

Desde un enfoque práctico, sería conveniente aplicar este concreto en proyectos piloto de pavimentos permeables y áreas urbanas con una alta escorrentía, para validar su desempeño en condiciones reales y de esa manera contar con datos reales respecto a su funcionamiento.

Por último, se recomienda continuar con las investigaciones enfocadas en la evaluación económica y ambiental del material, considerando su potencial para incorporar carbones activados de origen biogénico y consolidar así su aporte a la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático.

Referencias

- American Concrete Institute. (2010). *Report on pervious concrete* (ACI 522R-10).
- Arvizu Juvera, A. W., Ayala Moreno, J. P., & Guzmán Grijalva, H. M. (2025). Infraestructura verde para prevención de inundaciones en conjuntos habitacionales de interés social en zona árida. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (17), 85–100. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i17.318>
- American Society for Testing and Materials International. (1999). *Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete* (ASTM C876-91).
- American Society for Testing and Materials International. (2015). *Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete* (ASTM C876-15).
- American Society for Testing and Materials International. (2023). *Standard practice for verification of algorithm and equipment for electrochemical impedance measurements* (ASTM G106-89).
- Barreto Sandoval, G. F., Mota, L., Pieralisi, R., & De Souza Risson, K. D. B. (2023). Influence of coarse aggregate granulometry on clogging in pervious concrete. *Revista ingeniería de construcción*, 38(2), 198–204. <https://dx.doi.org/10.7764/ric.00062.21>
- Banco Bilbao Vizcaya Argentaria Research. (18 de enero de 2024). Emisiones y fuentes de los gases de efecto invernadero. *BBVA Research*. <https://www.bbvarsearch.com/publicaciones/mexico-emisiones-y-fuentes-de-los-gases-de-efecto-invernadero/>
- Betancurt Romero, H. M., Lapo Calderón, B. G., & Ayala Armijos, J. H. (2022). Evaluación de la obtención de carbón activado a partir de lodos de depuradoras de aguas residuales de la comunidad de Valencia: revisión bibliográfica. *Ingeniería Industrial*, 43, 1–15. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2022.n43.5959>
- Bui, H., Delattre, F., & Levacher, D. (2023). Métodos experimentales para medición de carbonatación. *Applied Sciences*, 13(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app13042533>
- Buitrago, L. N. A., & Rosas Acero, J. E. (2021). *Evaluación teórica, aplicaciones y proceso constructivo del concreto permeable para ser implementado como capa de rodadura en una vía* [Tesis de licenciatura]. Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.umng.edu.co/bitstreams/821e90b3-a836-41bc-84db-debf3e93e809/download>

-
- Campos Silva, A. R., Fajardo, G., & Mendoza-Rangel, J. M. (2016). Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado. *Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo*, 8(2), 14–34. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112016000200014
 - Camacaro Vásquez, A. X., Picón Mercado, L. F., Sánchez Gómez, M. A., de Rincón, O. T., & Millano González, V. (2023). Evaluación de los daños por corrosión de una estructura de concreto armado expuesta a un ambiente costero-industrial. *Técnica*, 47(2), 1–15. <https://doi.org/10.22209/rt.v46a15>
 - Carrasco Contreras, A. L. (2025). *Elaboración de concreto permeable para mejorar el drenaje en zonas inundables en la ciudad de Chachapoyas* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. <https://hdl.handle.net/20.500.14077/4516>
 - Cabrera Ramos, S. J., & Cuyubamba Cainicela, A. L. Y. (2023). *Optimización de la eficiencia de adsorción de carbón activado modificando las condiciones de reactivación química en la planta de beneficio Paltarumi SAC* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional del Centro del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/10177>
 - Cementos Mexicanos. (2025). Manual del constructor de CEMEX (Capítulo V: Mezclas de concreto, tabla de dosificación). *CEMEX México*.
 - Chinè-Polito, Bruno, Cuevas-Kauffmann, Rommel, Jiménez-Salas, Ronald, & Ortiz-Quesada, Giannina. (2019). Estudio experimental de la carbonatación del concreto. *Tecnología en marcha*, 32(2), 68–81. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v32i2.4350>
 - Coila Mamani, R. J., & Condori Alejo, K. A. (2024). *Diseño de concreto permeable para mejorar el sistema de drenaje en zonas de inundación* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/4917>
 - Comisión Nacional del Agua. (2021). Estadísticas del agua en México 2021. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>
 - Cruz-Bello, G. M., Galeana-Pizaña, J. M., & González-Arellano, S. (2023). Urban growth in peri-urban, rural and urban areas: Mexico City. *Buildings and Cities*, 4(1), 1–16. <https://doi.org/10.5334/bc.230>
 - Cruz, F., & Arana, C. (2021). *Evaluación de la resistencia mecánica de un concreto permeable ordinario frente a concretos permeables elaborados con un aditivo superplastificante y*

relaciones a/c menores, para su uso en pavimentos urbanos; Arequipa – 2021, [Tesis de licenciatura]. Universidad Continental, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/10415>

- Cho, S., Lee, N., & Kim, M. O. (2020). A comprehensive review on CO₂ utilization in cement and concrete: From microstructural transformations to structural applications. *Case Studies in Construction Materials*, 23(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05265>
- Culque, P. E., & Sanchez, E. L. (2023). *Resistencia a la compresión axial del concreto f'c=210 kg/cm², con reemplazo de carbón de piedra y carbón activado, en porcentajes de 4 %, 6 % y 8 %* [Tesis de licenciatura]. Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/37068>
- Cuervo-Robayo, A. P., Ureta, C., Gómez-Albores, M. A., Meneses-Mosquera, A. K., Téllez-Valdés, O., & Martínez-Meyer, E. (2020). One hundred years of climate change in Mexico. *PLOS ONE*, 15(4), 14- 20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209808>
- El Economista. (19 de diciembre de 2022). ¿Cómo hacer a la construcción más amigable con el medio ambiente? En México, esta industria es responsable de 50% de las emisiones contaminantes?. *El Economista*. <https://www.eleconomista.com.mx/econohabitat/Como-hacer-a-la-construccion-mas-amigable-con-el-medio-ambiente-En-Mexico-esta-industria-es-responsable-de-50-de-las-emisiones-contaminantes-20221219-0070.html>
- El Sol de Hidalgo. (18 de junio de 2024). Inspeccionan concreto permeable para el Ben Gurión. *El Sol de Hidalgo*. <https://oem.com.mx/elsoldehidalgo/local/inspeccionan-concreto-permeable-para-el-ben-gurion-13567505>
- Félix, E. F., Carrazedo, R., & Possan, E. (2017). Parametric analysis of carbonation process in reinforced concrete structures through Artificial Neural Networks. *Revista ALCONPAT*, 7(3), 302–316. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.245>
- García Cabal, D. (2022). *Diseño de un equipo a escala laboratorio para la captura de CO₂ atmosférico mediante materiales absorbentes* [Tesis de licenciatura] Universidad de Chile.
- Gamry Instruments. (s.f). *Decrease battery testing time using multisine EIS* [Manual técnico]. <https://www.gamry.com>
- Gamry Instruments. (s.f). *Getting started with electrochemical corrosion measurement* [Manual técnico]. Gamry Instruments. <https://www.gamry.com>

-
- Hemkemeier, T. A., Almeida, F. C. R., Sales, A., & Klemm, A. J. (2022). Corrosion monitoring by open circuit potential in steel reinforcements embedded in cementitious composites with industrial wastes. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01042. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01042>
 - Hu, M., Zhang, X., Siu, Y. L., Li, Y., Tanaka, K., Yang, H., & Xu, Y. (2018). Flood mitigation by permeable pavements in Chinese sponge city construction. *Revista MDPI*, 10(2), 172. <https://doi.org/10.3390/w10020172>
 - Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2024). *Informe de gestión gubernamental 2018–2024*. https://www.imta.gob.mx/gobmx/2024/Informe_Consolidado_29-08-2024_Firma_Electronica.pdf
 - International Organization for Standardization. (2015). *Testing of concrete—Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete—Accelerated carbonation method* (ISO 1920-12:2015). <https://www.iso.org/standard/57932.html>
 - Juárez Cardozo, J. (2019). *Construcción de un sistema de captación de agua pluvial mediante el uso de concreto permeable* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/09/Construcción-de-un-sistema-de-captación-de-agua-pluvial-mediante-el-uso-de-concreto-permeable.pdf>
 - Kaur, P., Park, J.-S., & Sekhon, S. S. (2021). From coconut shell biomass to oxygen reduction reaction catalyst: Tuning porosity and nitrogen doping. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111173. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111173>
 - La Jornada. (12 de noviembre de 2021). México, entre los 13 países que más dióxido de carbono emiten. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/11/12/mexico-entre-los-13-paises-que-mas-dioxido-de-carbono-emiten/>
 - Lazanas, A. C., & Prodromidis, M. I. (2023). Electrochemical impedance spectroscopy—A tutorial. *ACS Measurement Science Au*, 3(2), 162–193. <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciam.2c00070>
 - Li, X., Zhang, Y., & Jiang, H. (2021). Recent advances in the development and application of permeable concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 270, 121934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121934>
 - Liu, D., Liu, D., Gao, J., Yang, Y., Ding, Y., Guo, C., Zhang, X., Xia, Z., & Xu, W. (2022). Influence of addition of two typical activated carbons on fertility properties and mechanical

-
- strength of vegetation concrete under freeze-thaw conditions. *Science of The Total Environment*, 838, 156446. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156446>
- Marsh, H. and Rodriguez-Reinoso, F. (2006) Activated carbon. *Elsevier Science & Technology Books* (pp. 536).
 - McCarter, W. J. (1996). The a.c. impedance response of concrete during early hydration. *Journal of Materials Science*, 31(1), 24–31. <https://doi.org/10.1007/BF01113402>
 - Merah, A. (2024). Methods of concrete accelerated carbonation test: A review. *Discover Civil Engineering, Springer Nature*, 3(1), 1–53. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00057-z>
 - Moretti, L., Di Mascio, P., & Fusco, C. (2020). Porous concrete for pedestrian pavements: Mix design and testing. *Water*, 11(10), 2105. <https://doi.org/10.3390/w11102105>
 - Muñoz Morales, O., & Henao Aristizabal, M. C. (2023). *Revisión bibliográfica de rehabilitación de estructuras en concreto afectadas por carbonatación* [Tesis de maestría] Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/37743>
 - Murray-Tortarolo, Guillermo N. (2021). Seven decades of climate change across Mexico. *Atmósfera*, 34(2), 217–226. <https://doi.org/10.20937/atm.52803>
 - Nazeer, M., Kapoor, K., & Singh, P. (2020). Pervious concrete: A state-of-the-art review. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/357203866_Pervious_concrete_a_state-of-the-art_review
 - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2014). *Industria de la construcción – Concreto – Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos* (NMX-C-083-ONNCCE-2014).
 - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2018). *Industria de la construcción – Agregados – Métodos de ensayo para determinar las propiedades de los agregados para concreto hidráulico* (NMX-C-111-ONNCCE-2018).
 - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2016). *Industria de la construcción – Agua para concreto – Especificaciones y métodos de prueba* (NMX-C-122-ONNCCE-2016).
 - Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2010). *Industria de la construcción – Concreto hidráulico – Determinación del revestimiento del concreto fresco* (NMX-C-156-ONNCCE-2010).

- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2016). *Industria de la construcción – Concreto – Elaboración y curado de especímenes de ensayo* (NMX-C-159-ONNCCE-2016).
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2009). *Industria de la construcción – Concreto – Extracción y ensaye de núcleos de concreto a la compresión* (NMX-C-169-ONNCCE-2009).
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2019). *Industria de la construcción – Agregados – Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para los ensayos* (NMX-C-170-ONNCCE-2019).
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2017). *Industria de la construcción – Cementos hidráulicos – Especificaciones y métodos de prueba* (NMX-C-414-ONNCCE-2017).
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2016). *Industria de la construcción – Concreto hidráulico – Durabilidad – Determinación de la profundidad de carbonatación en concreto endurecido mediante el uso de un indicador ácido-base* (NMX-C-515-ONNCCE-2016).
- Organización de las Naciones Unidas. (2020). Informe sobre la situación mundial de las ciudades 2020: La transformación de nuestras ciudades para un futuro mejor. *ONU-Hábitat*. https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report_es.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%28outdoor%29-air-quality-and-health>
- Organización de las Naciones Unidas. (2009). Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: Progress report, 2008. *Photochemical & Photobiological Sciences* (pp. 13–22). <https://doi.org/10.1039/b820432m>
- Ortiz-Marqués, A., Caldevilla, P., Goldmann, E., Safuta, M., Fernández-Raga, M., y Górski, M. (2025). Porosidad y permeabilidad en materiales de construcción como parámetros clave para su durabilidad y rendimiento: una revisión. *Buildings* (pp. 15-18). <https://doi.org/10.3390/buildings15183422>
- Padrón, R., Rodríguez, C., Gómez, A., García, A., & González, C. L. (2013). El carbón activado, un material absorbente. [Tesis de licenciatura] Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.

-
- Quintana Alfaro, N. L. (2023). Implementación y aplicación de técnicas experimentales para el análisis de procesos de carbonatación lenta y acelerada en concretos dopados [Tesis de postgrado] Universidad Nacional Federico Villareal. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/7872>
 - Rahmon, S. A. (2023). Carbonation of composite cement under different relative humidity [Tesis doctoral] University of Leeds. <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/33885/>
 - Ramírez, W., Mayacela, M., Contreras, L., Shambi, A., Ramírez, F., & Chacón, J. (2023). Mechanical properties of permeable concrete reinforced with polypropylene fibers for different water–cement ratios. *Buildings*, 14(9), 2935. <https://doi.org/10.3390/buildings14092935>
 - Sandoval Chambi, A. N. (2021). Análisis de diseños de concreto permeable como alternativa en la construcción de pavimentos rígidos empleando agregados de la ciudad de Juliaca - 2019 [Tesis de licenciatura] Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/5251>
 - Scott, M. (11 de junio de 2025). Cement: Building a green path in a hard industry. *Reuters*. <https://www.reuters.com/sustainability/decarbonizing-industries/cement-hard-industry-crack-down-emissions-2025-06-11/>
 - Sevilla, U. D. (2011). Manual del carbón activo. *Aguapedia*. <https://aula.aguapedia.org>
 - Shawnim, P., & Mohammad, F. (2019). Porosity, permeability and microstructure of foamed concrete through SEM images. *Journal of Civil Engineering*, 10(2), 22–33. <https://doi.org/10.33736/jcest.1434.2019>
 - Singh, H. P., Sharma, K., Sakale, R., & Kushwah, S. K. (2016). Mejora de la resistencia del hormigón permeable con diferentes proporciones de agua-cemento y aditivos. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5(1), 465–470. <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV5IS010465>
 - Totosaus, A. Y. G. (2024). Emisiones de CO₂ equivalente generadas por actividades relacionadas a centros de datos en México. *Repositorio Nacional de Ciencia y Tecnología*. https://www.researchgate.net/publication/388526680_Emisiones_de_CO2_equivale [das por actividades relacionadas a centros de datos en Mexico](https://www.researchgate.net/publication/388526680_Emisiones_de_CO2_equivale)
 - Vollpracht, A., Gluth, G. J. G., Rogiers, B., Uwanuakwa, I. D., Phung, Q. T., Villagrán Zaccardi, Y., Thiel, C., Vanoutrive, H., Etcheverry, J. M., Gruyaert, E., Kamali-Bernard, S., Kanellopoulos, A., Zhao, Z., Martins, I. M., Rathnarajan, S., & De Belie, N. (2024). Report of

RILEM TC 281-CCC: insights into factors affecting the carbonation rate of concrete with supplementary cementitious materials revealed from data mining and machine learning approaches. *Materials and Structures*, 57(9), 1–57. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02465-0>

- Zhu, H., Wen, C., Wang, Z., & Li, L. (2020). Study on the permeability of recycled aggregate pervious concrete with fibers. *Materials*, 13(2), 321. <https://doi.org/10.3390/ma13020321>
- Zhu, X., Guo, Y., & Tian, L. (2018). CO₂ adsorption on carbon-based materials via physical adsorption: Influencing factors, adsorption mechanisms and modeling. *Environmental Science & Technology*, 52(14), 14–52. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01974>

Referencias bibliográficas de figuras

- Alnahhas, F. (2023). Carbonatación en el hormigón. *Prontubeam*. <https://www.prontubeam.com/Ingenieria-en-las-redes/Carbonatacion-del-hormigon>
- Campos Silva, A. R., Fajardo San Miguel, G., & Mendoza-Rangel, J. M. (2016). Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 8(2), 14–34. <https://www.researchgate.net/publication/312492025>
- Cementos Mexicanos (2025). Concreto Pervia. *CEMEX México*. <https://www.cemexmexico.com/productos/concreto/pervia-concreto-premezclado>
- Cementos Mexicanos. (2023). Estadio con concreto permeable Vertua. *CEMEX México*. <https://www.cemex.com/es/w/el-estadio-bryant-denny-de-la-universidad-de-alabama-es-renovadp-con-concreto-permeable-al-agua-vertua-de-cemex>
- CJE Ingenieros. (2018). *Corrosión en elementos estructurales de concreto*. <https://www.cjeingenieros.com/end-potencial-de-corrosion/>
- Cruz Cerro, G. J. F., Velásquez Yucra, M., Contreras, J. S., Solís Veliz, J. L., Gómez León, M., & Keiski, R. (2016). Estudio de carbones activados impregnados con quitosano y su comparación con carbones comerciales. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(3), 373–384. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2016000300012&lng=es&tlang=es
- FDM Environment Makers. (s. f.). Cámara climática portátil de 25 litros. *Dellamarca.it*. <https://www.dellamarca.it/es/para-que-se-utiliza-la-camara-de-carbonatacion/>

-
- Granados Cristancho, Y. A. (2015). *Importancia de los ensayos TGA y DSC en el estudio de las propiedades térmicas de mezclas asfálticas* [Tesis de pregrado] Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
 - Osorio, J. D. (2023). Imagen sobre carbonatación del concreto. *360 en Concreto*. <https://360enconcreto.com/blog/detalle/carbonatacion-del-concreto-como-detectarla/>
 - Ortiz, C. (s. f.). Diagrama esquemático de celda utilizada para los análisis de EIS y Tafel en: Caracterización mediante espectroscopía de impedancia electroquímica de películas anódicas sobre Al 2024-T3. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/28321614>
 - Roa-Rodríguez, G., Aperador-Chaparro, W., & Delgado-Tobón, E. (2015). Diseño de un sistema de monitoreo remoto para la evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado bajo ataque de iones cloruro. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(4), 565–572. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.008>
 - VerdeCreto. (2020). *Aplicación de concreto permeable en Av. Eduardo Molina*. <https://verdecreto.com.mx/>
 - VerdeCreto. (2020). *Aplicación de concreto permeable en Soyaló, Chiapas*. <https://verdecreto.com.mx/>
 - Zhao, Z., Hao, S., Hao, P., Sang, Y., Manivannan, A., Wu, N., & Liu, H. (2015). Lignosulphonate–cellulose derived porous activated carbon for supercapacitor electrode. *Journal of Materials Chemistry*, 3(27), 14088–14094. <https://doi.org/10.1039/C5TA02770E>
 - 911 Metallurgist. (2024). *Equipo analizador de mineralogía XRD de laboratorio*. <https://metalurgia.911metallurgist.com/equipo-analizador-de-mineralogia-xrd-de-laboratorio/>