



Revista Ingeniería, Ciencias y Sociedad Vol. 06 – N° 01 (2024) 53–64

# Evaluación del Grado de Carbonatación del Hormigón Producido con Caliza como Agregado Grueso en Ambientes Urbanos del Departamento de Concepción – Py

*Assessment of the Degree of Carbonation of Concrete Produced with Limestone as Coarse Aggregate in Urban Environments of the Concepción Department–Py.*

- Ana Gabriela González Duarte <sup>1</sup>
- Inés Alejandra Villasboa González <sup>2</sup>

## Resumen

El incremento de la construcción de edificios, puentes y otras infraestructuras en el departamento de Concepción ha impulsado la necesidad de investigar la durabilidad del hormigón y su impacto en las emisiones y absorción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a lo largo de su vida útil. Este estudio busca demostrar la viabilidad de desarrollar hormigones utilizando materiales locales, específicamente piedra caliza, que satisfagan las demandas económicas, estructurales y ambientales, contribuyendo así a la mitigación de impactos en el medio ambiente y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Tradicionalmente, se han utilizado áridos basálticos en la construcción, debido a su buen comportamiento y disponibilidad. En este contexto, se ha optado por la piedra caliza como agregado grueso, dado que es abundante en la región y resulta más económica. Para el desarrollo experimental, se fabricaron hormigones con agregados de caliza y basalto, con resistencias de 25 MPa y 35 MPa. Los cuerpos de prueba fueron sometidos a un proceso de carbonatación natural en sectores industriales de Concepción, donde permanecieron estáticos hasta completar el periodo de reposo y exposición. Posteriormente, se evaluó el grado de carbonatación mediante la solución de fenolftaleína. Los resultados evidencian ventajas significativas en el uso de la piedra caliza como agregado grueso, mostrando un comportamiento favorable respecto al proceso de carbonatación en un ambiente urbano agresivo. Se concluye que la incorporación de piedra caliza en la producción de hormigón no solo es viable desde el punto de vista técnico, sino que también contribuye a la sostenibilidad económica y ambiental de las construcciones en la región.

**Palabras clave:** carbonatación, fenolftaleína, hormigón, caliza.

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Concepción, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas, Paraguay, [anaga@facet-unc.edu.py](mailto:anaga@facet-unc.edu.py).

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Concepción, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas, Paraguay, [ines@facet-unc.edu.py](mailto:ines@facet-unc.edu.py).



## Abstract

Given the increase in the number of buildings, bridges, and other types of infrastructure such as refrigeration facilities being constructed in the urban area of the Concepción department, we have seen the need to study the durability of concrete structures and the impact it can have on CO<sub>2</sub> emissions and absorption throughout their entire life cycle. We aim to demonstrate that it is possible to develop concretes using materials native to the Concepción region, specifically limestone, that meet economic, structural, and environmental requirements in order to mitigate environmental impacts and meet the demands established in the Sustainable Development Goals. In our country, basaltic aggregates are the most commonly used due to their good performance and ease of acquisition. For this reason, we adopted basalt as a reference or standard sample when conducting research using limestone as coarse aggregate. Limestone is abundant in the Concepción region, making its use economically beneficial. Furthermore, it has been used in the production of Portland cement and lime for a considerable amount of time, yielding good results. For the experimental development of this work, concretes were manufactured using limestone and basalt as coarse aggregate with typical strengths in structural projects of 25 MPa and 35 MPa respectively. These concretes were subjected to the natural carbonation process within the department of Concepción, specifically in industrial sectors near urban areas. The test specimens remained static until they completed the resting period and exposure to the environment. Subsequently, tests were conducted to evaluate the degree of carbonation using a phenolphthalein solution. Finally, the results have clearly shown some advantages of using limestone as coarse aggregate in construction and its behavior regarding the carbonation process when exposed to an urban and aggressive environment such as an industrial sector.

**Keywords:** carbonation, phenolphthalein, concrete, limestone.

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción civil es actualmente una de las mayores contribuidoras a la generación de residuos y emisiones de CO<sub>2</sub>, siendo responsable de casi el 40% de las emisiones globales de dióxido de carbono. Esta situación provoca diversos problemas ambientales y acelera el cambio climático. Ante esta preocupación, varios países han comenzado a implementar iniciativas para mitigar estos impactos y mejorar la calidad de vida en las zonas urbanas.

Los esfuerzos en el ámbito de la construcción incluyen la incorporación de jardines verticales, sistemas de energía renovable y el uso de nuevos materiales de construcción. Aunque estas técnicas muestran resultados positivos a corto plazo, los costos asociados a su implementación pueden limitar su viabilidad, lo que exige un nuevo enfoque en los sistemas constructivos y materiales con propiedades que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero. La carbonatación, un proceso físico-químico que ocurre entre el CO<sub>2</sub> de la atmósfera y el hidróxido de calcio presente en la matriz del hormigón, implica la captura de CO<sub>2</sub> en los poros del hormigón, y es una de las causas más relevantes del deterioro estructural.

Con el fin de observar este proceso y contribuir a los estudios de durabilidad en las estructuras de hormigón del departamento de Concepción, se han desarrollado hormigones con resistencias habituales en proyectos estructurales para evaluar el grado de carbonatación en estructuras actuales y evidenciar sus impactos.

Teniendo como objetivo la de evaluar el grado de carbonatación del hormigón producido con caliza como agregado grueso en los ambientes urbanos e industriales más concurridos del departamento de Concepción, utilizando el ensayo de fenolftaleína como aproximación cualitativa; y como espáticos la de preparar muestras de hormigón con caliza como agregado grueso y un control con otro tipo de agregado, la exposición de las muestras a ambientes urbanos de la región de Concepción durante diferentes períodos de tiempo, realizar el ensayo de fenolftaleína en las muestras para evaluar el grado de carbonatación en diferentes edades, comparar los resultados obtenidos en las muestras de hormigón con caliza y las de control y analizar los resultados y establecer conclusiones sobre el grado de carbonatación del hormigón producido con caliza como agregado grueso en ambientes urbanos e industriales del departamento de Concepción.

El proyecto se considera viable gracias a la facilidad de obtención de los materiales necesarios para la elaboración del hormigón y al acceso a los lugares específicos para llevar a cabo el estudio experimental.

Evaluación de las deficiencias en el conocimiento del problema. La escasez de estudios a nivel nacional sobre los impactos del calentamiento global y la industrialización en la durabilidad de las estructuras de hormigón y la construcción civil subraya la necesidad de investigar los efectos directos e indirectos del proceso de carbonatación. Esto permitirá demostrar sus impactos en las propiedades del hormigón y los beneficios ambientales que puede ofrecer.

Este trabajo se limitó al departamento de Concepción, lo que facilitó la verificación continua de los cuerpos de prueba sin necesidad de desplazamientos largos. Sin embargo, no se tuvo acceso a una cámara de carbonatación acelerada para realizar ensayos más rápidos como se había planteado inicialmente.

La hipótesis que se sostiene, es el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> en zonas urbanas, atribuible al crecimiento demográfico, tráfico vehicular e industrialización, resulta en el deterioro prematuro de las estructuras de hormigón armado, afectando algunos elementos más de lo esperado. La producción de hormigones con caliza presenta variaciones en diferentes entornos urbanos del departamento de Concepción. Por lo tanto, este trabajo busca observar cómo las características ambientales de diversas áreas de exposición pueden influir en el proceso de carbonatación de los hormigones y en sus propiedades finales, con el fin de proporcionar recomendaciones prácticas para mejorar la durabilidad y el rendimiento del hormigón en la construcción de infraestructuras en la región.

Este trabajo se centra en el estudio de materiales de construcción, enfatizando la importancia de su selección y aplicación en la construcción civil. La investigación aborda el problema delimitado de la durabilidad del hormigón en entornos urbanos, destacando la necesidad de desarrollar soluciones que mitiguen el impacto ambiental de la construcción.

Los objetivos del estudio se enfocan en evaluar el grado de carbonatación del hormigón con caliza, considerando su viabilidad en la región de Concepción.

Se analizarán estudios previos sobre la carbonatación y la durabilidad del hormigón, sustentados por teorías que explican el comportamiento de los materiales en contextos urbanos, con la correspondiente citación de fuentes relevantes.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Tipo de Estudio y Enfoque Metodológico**

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, aplicando un diseño experimental para evaluar el grado de carbonatación del hormigón producido con caliza como agregado grueso, en comparación con un control basado en basalto. Las muestras fueron sometidas a ambientes urbanos e industriales del departamento de Concepción, Paraguay, durante un período de exposición prolongado, y los resultados fueron evaluados utilizando técnicas de análisis estadístico descriptivo.

### **Lugar del estudio**

El estudio se llevó a cabo en el departamento de Concepción, Paraguay, específicamente en los distritos de San Lázaro, Belén y Concepción, debido a su relevancia industrial y alta concentración de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Las muestras fueron expuestas a condiciones ambientales locales durante un período de 195 días para observar los efectos de la carbonatación natural.

### **Población y muestra**

La población de estudio está compuesta por las infraestructuras urbanas del departamento de Concepción, que incluyen áreas industriales con alta emisión de CO<sub>2</sub>. La muestra experimental consistió en 64 discos cilíndricos de hormigón de 10 cm de altura. Se elaboraron 16 grupos de probetas con cuatro dosificaciones diferentes de piedra caliza y basalto como control. Las probetas fueron distribuidas en cuatro ubicaciones clave dentro del departamento: la Industria Nacional de Cemento (INC) en San Lázaro, la planta industrial de Heparina en Belén, el recinto portuario Baden S.A., y la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas en Concepción.

### **Materiales y equipos**

Se emplearon los siguientes materiales y herramientas durante el desarrollo del estudio:

- **Hormigón:** Se utilizó piedra caliza como agregado grueso para las muestras experimentales, obtenida de la cantera de San Alfredo, y piedra basáltica como material de control, proveniente de la cantera Itapopó, en las cercanías de Pedro Juan Caballero.
- **Cemento:** Se empleó cemento tipo CF32 de la marca CECON, el más utilizado en la región.
- **Arena:** la arena lavada proviene de la arenera Domofix en Concepción, extraída del río Paraguay.
- **Solución de Fenolftaleína:** Para la medición del grado de carbonatación, se utilizó una solución al 1% de fenolftaleína.
- **Instrumentos de medición:** Se emplearon un calibre Vernier y equipos de laboratorio para la medición de la profundidad de carbonatación y resistencia a la compresión.

### **Procedimiento experimental**

El proceso experimental se estructuró en las siguientes etapas:

- **Recolección y preparación de materiales:** Se obtuvieron las piedras calizas y basálticas de las respectivas canteras y se prepararon en el laboratorio, siguiendo las especificaciones del método ACI para la dosificación de hormigones.
- **Elaboración de probetas:** Se elaboraron probetas de hormigón con caliza y basalto, siguiendo las relaciones agua/cemento estándar para obtener resistencias de 25 MPa y 35 MPa. Las probetas fueron curadas en agua durante 7, 14 y 28 días.
- **Exposición al ambiente:** Las probetas fueron expuestas en las cuatro ubicaciones previamente mencionadas durante 195 días, en condiciones de exposición natural, para evaluar el proceso de carbonatación.
- **Análisis del grado de carbonatación:** Se aplicó la solución de fenolftaleína sobre los discos de hormigón para identificar la profundidad de carbonatación. Las áreas afectadas no cambiaron de color, mientras que las zonas no carbonatadas adquirieron un tono rosado.

## **Instrumentos y Técnicas de Recolección de Datos**

La recolección de datos se realizó mediante observación directa, ensayos de laboratorio y normativa internacional (Código Británico: determinación de la profundidad de la zona carbonatada en hormigones por el método de la fenolftaleína). Se llevaron a cabo ensayos de laboratorio para evaluar las propiedades físicas y el comportamiento de los materiales.

## **Análisis de datos**

Los resultados fueron analizados mediante la comparación de los discos de caliza y basalto, aplicando análisis estadísticos descriptivos. Se evaluaron las diferencias en la profundidad de carbonatación y la resistencia mecánica entre ambos tipos de hormigón, utilizando tablas y gráficos comparativos.

## **Consideraciones Éticas**

Este estudio no involucró experimentación con humanos ni animales, por lo que no se requirieron aprobaciones éticas específicas. No obstante, se siguieron todas las normativas y estándares de seguridad aplicables durante los experimentos de laboratorio y en campo.

## **Procedimientos de Aplicación de Instrumento**

Se propusieron ensayos de laboratorio con dos dosis de basalto (control) y dos dosis de caliza (25 MPa y 35 MPa).

### **1. Método A.C.I para el diseño de mezclas de hormigón**

Para el diseño de la mezcla de concreto se tuvieron en cuenta las características físicas de los materiales. Se realizaron los ensayos de asentamiento y se determinó la trabajabilidad del hormigón siguiendo la Norma UNE-EN 12350-2:2020.

### **2. Resistencia a la Compresión**

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días para determinar las propiedades mecánicas del hormigón.

### **3. Carbonatación Natural**

Los discos de hormigón fueron sumergidos en agua durante 24 horas y luego expuestos al medio ambiente en las ubicaciones mencionadas. Se aplicó una solución de fenolftaleína al 1% a intervalos específicos para evaluar el grado de carbonatación.

### **4. Ensayos de Carbonatación**

Se realizaron dos ensayos de carbonatación, el primero a los 36 días y el segundo a los 70 días, siguiendo procedimientos estandarizados y registrando los resultados obtenidos en el laboratorio.

**Tabla 1. Datos de los agregados.**

DATOS DE LOS AGREGADOS	FINO ARENA	GRUESO		CEMENTO CPII	AGUA
		CALIZA	BASALTO		
P <sub>unit</sub> compactado (kg/m <sup>3</sup> )	----	1496.4	1844	----	----
P <sub>especifico</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2100	2751	2855	----	----
Módulo de fineza	2.6	----	----	----	----
% Absorción	0.5	0.7	0.21	----	----
% Humedad (w)	5.0	1.0	8.0	----	----
P <sub>esp</sub> cemento (kg/m <sup>3</sup> )	----	----	----	3.15	----
P <sub>esp</sub> agua (kg/m <sup>3</sup> )	----	----	----	----	1000

Fuente: Elaboración propia

### 3. RESULTADOS

#### Resumen de dosaje para la elaboración de probetas

La siguiente tabla resume la cantidad de materiales necesarios para la elaboración de 40 probetas de hormigón, según las resistencias especificadas.

**Tabla 2. Cantidad de materiales necesarios para 40 probetas de hormigón**

Materiales	25 MPa (kg)	35 MPa (kg)
Cemento	25.08	29.16
Arena	46.74	43.88
Caliza	63.83	63.83
Agua	10.24	10.37

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3. Dosaje para cada relación A/C**

Materiales	25 MPa (A/C 0.5)	35 MPa (A/C 0.43)	25 MPa (A/C 0.5)	35 MPa (A/C 0.43)
Cemento	0.5	0.6	0.5	0.6
Ag. Fino	0.7	0.7	0.9	0.9
Ag. Grueso	1.7	1.8	1.3	1.3
Agua	0.2	0.3	0.2	0.2

Fuente: Elaboración propia

#### Resumen del ensayo de absorción por capilaridad

Durante el ensayo de absorción por capilaridad, se observó que las probetas de hormigón con caliza como agregado grueso inicialmente aumentaron de peso y luego disminuyeron, quedando por debajo del peso inicial. Por otro lado, las probetas con piedra basáltica también aumentaron de peso, alcanzando un pico, pero no cayeron por debajo del peso inicial. Esto se debe a la penetración del agua, que inicialmente incrementa el volumen y peso, seguido de una disminución por evaporación. La cantidad de agua absorbida depende de la porosidad y permeabilidad del material, así como de la duración del ensayo.

### Resumen de propiedades mecánicas

Los resultados del ensayo de resistencia mecánica indicaron una resistencia a compresión comparable entre las probetas con piedra caliza y las de piedra basáltica bajo las mismas condiciones.

**Tabla 4. Comparación entre propiedades mecánicas de hormigones elaborados con los agregados basalto y caliza.**

Relación A/C	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Caliza	Basalto
0.5	7 días 25 MPa	173.95	182.79
0.43	7 días 35 MPa	236.16	244.44
0.5	14 días 25 MPa	245.16	243.54
0.43	14 días 35 MPa	297.97	294.95
0.5	28 días 25 MPa	284.20	275.25
0.43	28 días 35 MPa	374.10	369.88

Fuente: Elaboración propia

### Resumen de muestras expuestas al ambiente

Las muestras expuestas durante diferentes períodos mostraron un desarrollo progresivo de la carbonatación.

**Tabla 5. Exposición al ambiente durante 36 días.**

#### COMPARACION DE SECCION CARBONATADA DE LOS AGREGADOS

AGREGADO GRUESO	RESISTENCIA MPa	RELACION A/C	UBICACIONES			
			INC-VALLEMI	PIH-BELEN	BADEN S.A.	FACET
CALIZA	25	0,5	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS
	35	0,43	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS
BASALTO	25	0,5	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS
	35	0,43	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS

Fuente: Elaboración propia

Como las muestras de estudio estuvieron expuestas al ambiente tan solo 36 días a la intemperie, era esperado un resultado sin indicios de carbonatación; no así la superficie externa en contacto directo con la atmosfera de la muestra, donde se encontró totalmente carbonatada.

Esto también aplica al segundo ensayo realizado a los 70 días.

**Tabla 6. Exposición al ambiente durante 70 días.**

AGREGADO GRUESO	RESISTENCIA MPa	RELACION A/C	UBICACIONES			
			INC-VALLEMI	PIH-BELEN	BADEN S.A.	FACET
CALIZA	25	0,5	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS
	35	0,43	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS
BASALTO	25	0,5	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS
	35	0,43	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS	S/CAMBIOS

Fuente: Elaboración propia

Los discos almacenados en la Industria Nacional de Cemento – Vallemi, Planta Industrial de Heparina – Belén y el Recinto Portuario Badén S.A. – Concepción son los que están más expuestos a un ambiente agresivo en comparación con el que estuvo ubicado en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas, por lo que son más propensos a presentar mayor profundidad carbonatada como se presenta a continuación.

Después de 130 días de exposición, se registraron indicios claros de carbonatación en las probetas.

**Tabla 7. Exposición al ambiente durante 130 días.**

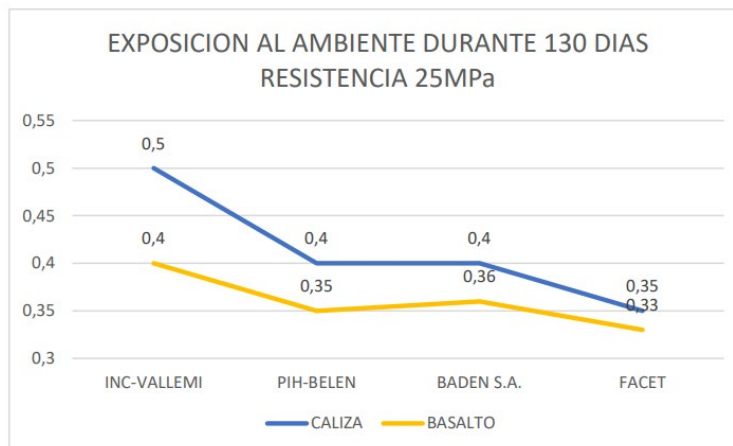
AGREGADO GRUESO	RESISTENCIA MPa	RELACION A/C	UBICACIONES			
			INC-VALLEMI	PIH-BELEN	BADEN S.A.	FACET
CALIZA	25	0,5	0,5	0,4	0,4	0,35
	35	0,43	0,51	0,51	0,5	0,4
BASALTO	25	0,5	0,4	0,35	0,36	0,33
	35	0,43	0,55	0,5	0,51	0,49

Fuente: Elaboración propia

El hormigón de 25MPa con caliza como agregado grueso presento un ligero aumento en la profundidad carbonatada en comparación con el hormigón de 25MPa hecho con piedra basáltica. La misma situación se dio con el hormigón hecho con piedra basáltica de 35MPa con respecto al de 35MPa.

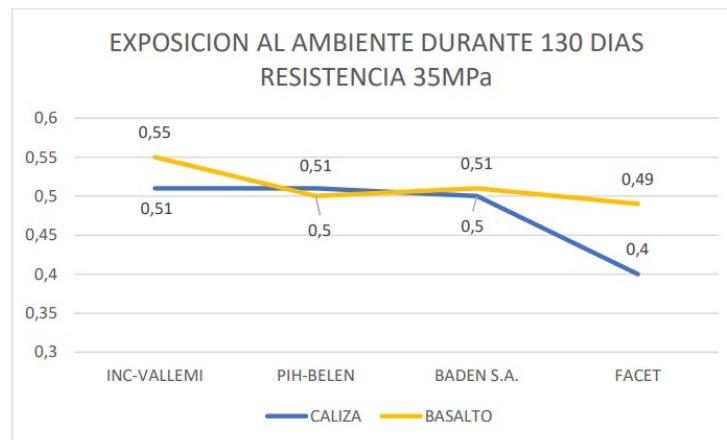


**Figura 1. Exposición de discos de prueba de 25MPa de resistencia al ambiente natural durante 130 días.**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 2. Exposición de discos de prueba de 35MPa de resistencia al ambiente natural durante 130 días.**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8. Exposición al ambiente durante 195 días**

**COMPARACION DE SECCION CARBONATADA DE LOS AGREGADOS**

AGREGADO GRUESO	RESISTENCIA MPa	RELACION A/C	UBICACIONES			
			INC-VALLEMI	PIH-BELEN	BADEN S.A.	FACET
CALIZA	25	0,5	0,7	0,65	0,6	0,55
	35	0,43	0,65	0,65	0,55	0,5
BASALTO	25	0,5	0,68	0,6	0,58	0,53
	35	0,43	0,65	0,68	0,56	0,51

Fuente: Elaboración propia

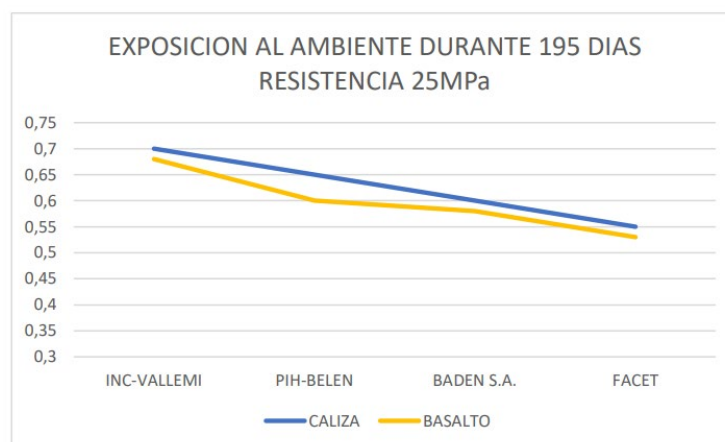
Finalmente, el último grupo de discos expuestos al ambiente nos mostraron los siguientes resultados:

Teniendo un leve cambio en comparación con los discos expuestos a los 130 días, éstos últimos presentaron indicios de carbonatación  $\text{pH} < 9.5$ , con una profundidad que ronda entre los 0.50 y 0.70 cm medidas desde el borde del disco.

El hormigón de 25MPa con caliza como agregado grueso presentó un ligero aumento en la profundidad carbonatada en comparación con el hormigón de 25MPa hecho con piedra basáltica. La misma situación se dio con el hormigón hecho con piedra basáltica de 35MPa con respecto al de 35MPa.

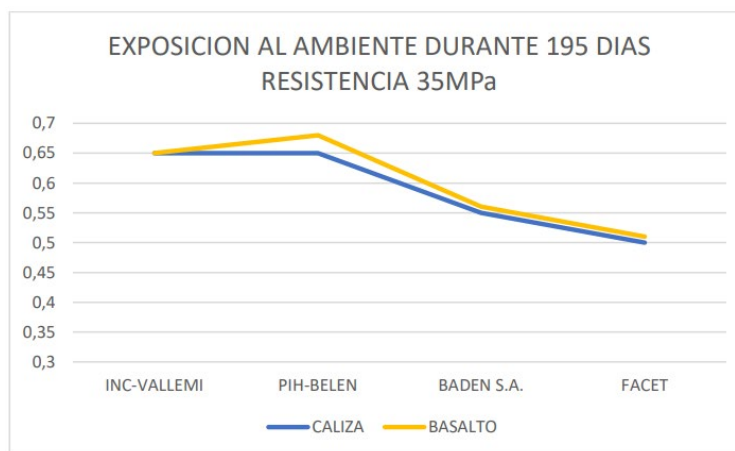
En estos discos había mucha acumulación de polvo por la cara y los laterales debido al tiempo que estuvo estacionado, por lo que requirió realizar una buena limpieza con brocha seca con el fin de eliminar cualquier impureza que pudiera afectar y cambiar los resultados. También después de realizar los cortes a los discos, éstos fueron limpiados nuevamente, debido a que el polvo resultante del corte puede alterar los resultados e imposibilitar la visualización de la zona carbonatada.

**Figura 3. Exposición de discos de prueba de 25MPa de resistencia al ambiente natural durante 195 días.**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 4. Exposición de discos de prueba de 35MPa de resistencia al ambiente natural durante 195 días.**



Fuente: Elaboración propia

#### 4. CONCLUSIONES

Se elaboraron probetas de hormigón utilizando caliza como agregado grueso y basalto como muestra patrón, siguiendo las dosificaciones adecuadas obtenidas del método de la Norma ACI. Se realizaron pruebas al hormigón fresco utilizando el Cono de Abrams para alcanzar un asentamiento esperado de 4 cm y las resistencias habituales de 25 y 35 MPa.

Un total de 16 discos de 10 cm de altura y 15 cm de diámetro fueron expuestos en cuatro ubicaciones determinadas: Vallemi, Belén, Baden y Facet. En cada ubicación, se colocaron cuatro discos que estuvieron en contacto con el ambiente urbano-industrial, siguiendo la indicación de no manipular las muestras ni permitir su contacto con el terreno natural.

Se llevó a cabo el ensayo de fenolftaleína en las edades de 36, 70, 130 y 195 días. A lo largo de estas diferentes edades, no se encontraron variaciones significativas en los discos elaborados con piedra caliza de 25 y 35 MPa, así como en los de basalto. La diferencia mínima se observó a los 130 y 195 días, donde la profundidad carbonatada osciló entre 0.33 y 0.70 cm.

En términos de durabilidad, el hormigón fabricado con piedra caliza como agregado grueso no mostró afectación significativa en el ensayo de carbonatación durante la exposición natural de 195 días en un entorno industrial y urbano.

Desde una perspectiva económica, el uso de piedra caliza en la ciudad de Concepción resulta más viable que el de piedra basáltica, dado que esta última proviene de un lugar más distante, lo que incrementa el costo de envío en comparación con la caliza, generando un ahorro de 50,000 gs/m<sup>3</sup> en la compra.

Para obtener una visualización más precisa de la profundidad carbonatada, sería ideal exponer los discos durante un período mínimo de cinco años. Alternativamente, la utilización de una cámara acelerada podría proporcionar resultados equivalentes a 10 a 20 años de exposición en tan solo 7 a 9 días. Sin embargo, esta opción no fue viable debido a dos factores importantes: el alto costo de construcción, operación y puesta en funcionamiento de la cámara, y la posibilidad de realizar la prueba en una entidad ajena. Como resultado, solo se pudieron obtener datos a partir de la exposición natural.

Estas conclusiones se derivan del análisis exhaustivo de los resultados obtenidos. La sección se ha presentado de manera clara y precisa, evitando repeticiones con los datos presentados en secciones anteriores.

#### REFERENCIAS

- 360enconcreto. (2023). Carbonatación del concreto: ¿cómo detenerla? [Blog]. Recuperado de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/carbonatacion-del-concreto-como-detectarla/>
- Aperador, W. M. d. (2009). Steel corrosion behaviour in carbonated alkali-activated slag concrete. *Corrosion Science*, 51(9), 2027-2033.
- Aunión, J. A., & Planelles, M. (2019). Cumbre del Clima.
- Castría, N. d. (2016). Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido.

- Chávez-Ulloa, E., López, T. P., Trujeque, J. R., Pérez, F. C., & Carrillo, J. B. (2010). Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*.
- Fernández, C. S. (2014). Carbonatación a fondo: Proceso y factores. *Patología, Rehabilitación y Construcción*.
- Giovambattista, A., Traversa, L., & Di Maio, A. (1997). Análisis sobre los métodos acelerados empleados para la evaluación del hormigón y sus materiales constituyentes. *Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, N° 4*.
- González, E., & Alloza, A. M. (2011). Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.
- Iloro, F. H., Sota, J., & Ortega, N. (2012). Influencia del tipo de cemento en el proceso de carbonatación acelerada de morteros. *VIII CINPAR Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras*. La Plata, Argentina.
- Jianguo, D., Akira, Y., F. H., W., H, Y., & Peng, Z. (2010). Protección superficial del hormigón. *The Hong Kong Polytechnic University*.
- Maison. (2016). Ventajas y desventajas de la piedra caliza. [Blog]. Recuperado de <https://www.consejosytrucos.net/noticias-462302/ventajas-desventajas-de-la-piedra-caliza/>
- Miranda, R., & Vallejos, C. (2012). Estudio y Caracterización de la piedra caliza para su utilización como agregado grueso en el hormigón. Asunción, Paraguay.
- Montani, R. (2000). La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C.*
- Montoya, J. (2009). *Hormigón Armado*. Barcelona: Gustavo Gili, SL.
- Parada, I. (2022). Qué es la Fenolftaleína. YuBrain.
- Paredes, J., Prieto, J., & Santos, E. (s.f.). Corrosión del acero en elementos de hormigón armado.
- Piqueras, V. Y. (2018). La captura de dióxido de carbono: La carbonatación del hormigón. *poliBlogs*.
- Possan, E. (2010). Modelagem da carbonatacao e previsao de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano. Tesis doctoral. Porto Alegre.
- Properties, M. (s.f.). Caliza. Recuperado de [https://material-properties.org/es/piedra-caliza-tabla-de-materiales-aplicaciones-precio/#google\\_vignette](https://material-properties.org/es/piedra-caliza-tabla-de-materiales-aplicaciones-precio/#google_vignette)
- Structuralia. (2022). Que es la carbonatación del hormigón y cómo prevenirla. [Blog]. Recuperado de <https://blog.structuralia.com/carbonataci%C3%B3n-del-hormig%C3%B3n-y-c%C3%B3mo-prevenirla>