



## ABSORCIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) POR CARBONATACIÓN DURANTE EL CICLO DE VIDA

### DE HORMIGONES PRODUCIDOS POR READY MIX CBBA-LPZ.

#### FASE I

#### Resumen

La producción y extracción de componentes para el concreto generan emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), especialmente en la fabricación de cemento, pero a lo largo de su vida útil, el concreto absorbe (CO<sub>2</sub>), a través de un proceso natural llamado carbonatación. A pesar de los desafíos que esta absorción presenta para la durabilidad de las estructuras, este estudio se enfoca en el aspecto positivo de la carbonatación: la absorción de (CO<sub>2</sub>), un gas considerado de efecto invernadero. Mediante mediciones en hormigones cuya antigüedad ronda los 9 años vaciados por la empresa SOBOCE.SA en el departamento de Cochabamba y la Paz, se determina la tasa de absorción de (CO<sub>2</sub>) por carbonatación en dos tipos de lugares.

**Palabras clave:** Producción, extracción, componentes, concreto, emisiones de (CO<sub>2</sub>), fabricación de cemento, vida útil, absorción, carbonatación, durabilidad, estructuras, efecto invernadero, mediciones, hormigones, impacto ambiental.

#### Abstract

The production and extraction of components for concrete generate (CO<sub>2</sub>) emissions, especially in cement manufacturing, but over its lifespan, concrete absorbs (CO<sub>2</sub>) through a natural process called carbonation. Despite the challenges this absorption poses for structural durability, this study focuses on the positive aspect of carbonation: the absorption of (CO<sub>2</sub>), a greenhouse gas. Through measurements on relatively old concrete poured by the company SOBOCE.SA in the departments of Cochabamba and La Paz, the determination of the carbonation absorption rate is conducted in two types of locations.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cemento, esencial en la construcción, registra un consumo global anual solo superado por el agua, pero la industria cementera también es una relevante fuente de emisiones de (CO<sub>2</sub>), contribuyendo alrededor del 7% de las emisiones totales (1). La producción de cemento, a través de la trituración y calcinación de la piedra caliza para generar Clinker, libera aproximadamente el 60% de las emisiones, mientras que el 40% proviene de la combustión de combustibles en plantas cementeras. Aunque el cemento Portland se elige ampliamente por su costo y durabilidad, su producción, que comprende alrededor del 15% del hormigón, es responsable de alrededor del 90% de las emisiones de (CO<sub>2</sub>) relacionadas con este material compuesto.

La carbonatación del hormigón es un proceso químico en el cual el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del aire reacciona con los componentes alcalinos del cemento en la matriz del hormigón. Esta reacción transforma parte del hidróxido de calcio presente en el hormigón en carbonato de calcio, un compuesto sólido. A medida que este proceso avanza a lo largo del tiempo, el hormigón absorbe (CO<sub>2</sub>) y se forma el carbonato de calcio, lo que puede contribuir a la consolidación y endurecimiento del material. Sin embargo, esta reacción también puede afectar la durabilidad de las estructuras de hormigón, ya que puede reducir el nivel de alcalinidad y potencialmente comprometer la protección de las armaduras contra la corrosión en entornos agresivos (2).





## 2. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La importancia del estudio radica en comprender la capacidad de absorción teórica de ( $\text{CO}_2$ ) de hormigones producidos por SOBOCE.SA en la ciudad de La Paz y Cochabamba. El análisis de las emisiones de ( $\text{CO}_2$ ) asociadas a la fabricación de cemento y la posterior absorción de ( $\text{CO}_2$ ) por carbonatación en estructuras de concreto puede proporcionar información valiosa para disminuir el impacto ambiental de esta industria y contribuir a la formulación de estrategias de sostenibilidad.

Al explorar los aspectos positivos y desafíos de la carbonatación, el estudio podría informar sobre prácticas más sostenibles con el medio ambiente y la toma de decisiones informadas en la planificación de proyectos de construcción y desarrollo urbano.

## 3. DETALLES EXPERIMENTALES

### Materiales

Para la elaboración de las muestras de hormigón se usaron materiales como cemento Viacha IP30 en la ciudad de Cochabamba y Viacha IP40 para la ciudad de La Paz, con unas gravedades específicas de 2.94 y 3.06, grava, arena, agua y aditivo SIKA VISCOFLOW 5000. Los hormigones fueron diseñados para alcanzar resistencias comprendidas entre 25 a 35 MPa a los 28 días. La grava empleada de  $\frac{3}{4}$ " fue extraída de la zona de Parotani en el departamento de Cochabamba y en San Roque en la ciudad de La Paz, se usó arena fina de ríos según especificaciones técnicas y se empleó agua potable sin la presencia de algún químico. Las propiedades químicas de los cementos puzolánicos portland empleados en función a especificaciones de la Norma boliviana (NB 011) (3) se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 1: Propiedades químicas del cemento**

Propiedades químicas del cemento	Contenidos	VIACHA IP-30 35 MPa CBBA	VIACHA IP-40 F 4.5 MPa LPZ	Requerimientos según NB 061
		%SiO <sub>2</sub>	29.11	-
	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.55	5.89	-
	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.37	2.77	-
	%CaO	46.7	53.68	-
	%MgO	3.03	2.31	Max% 6
	%K <sub>2</sub> O	2.13	1.81	-
	%Na <sub>2</sub> O	0.83	0.63	-
	%SO <sub>3</sub>	2.46	1.99	Max% 4

Fuente: Elaboración Propia.

Los 2 tipos de hormigones clasificados según su procedencia se elaboraron siguiendo las siguientes dosificaciones que se muestran en la siguiente tabla

**Tabla 2: Dosificaciones de los hormigones según su resistencia**

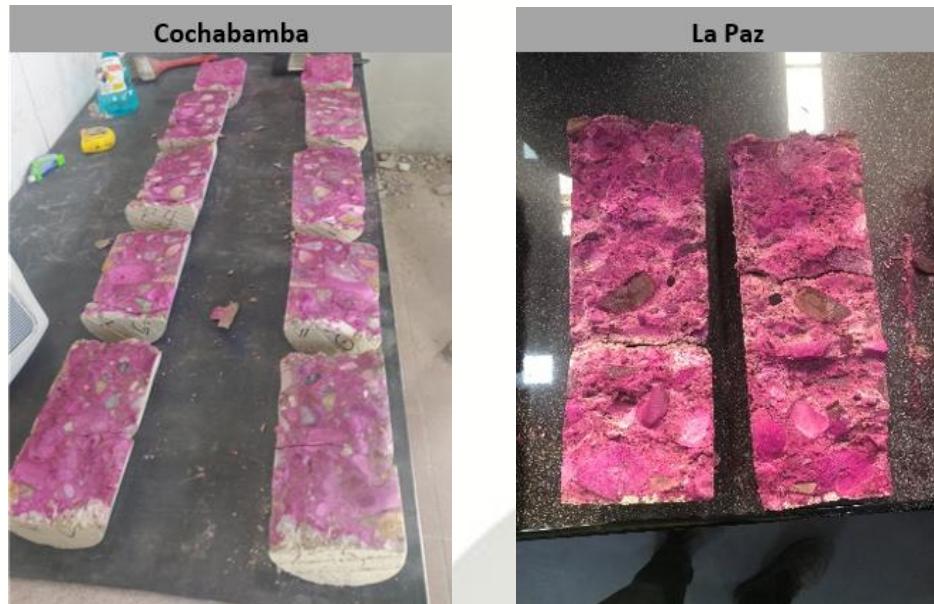
Tipo de hormigón	Materiales							
	Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	Arena (Kg/m <sup>3</sup> )	Grava $\frac{3}{4}$ " (Kg/m <sup>3</sup> )	Gravilla 1 1/2" (Kg/m <sup>3</sup> )	Gravilla 1 " (Kg/m <sup>3</sup> )	Agua (Kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo VISCOF LOW 5000 (Kg/m <sup>3</sup> )	Relación A/C
H-35 CBBA	440	722	361	722	NA	167	1.7	0.38
H-35 LPZ	340	763	477	594	159	175	2.2	0.44

Fuente: Elaboración Propia.

## Especímenes experimentales

Los especímenes de hormigón ensayados en laboratorio fueron extraídos mediante la implementación de extracción de núcleos. Este ensayo se realizó tanto en la ciudad de Cochabamba como en La Paz. En cada departamento se extrajeron 6 núcleos cuyas dimensiones son de 10x20 cm.

**Figura 1: Núcleos cilíndricos extraídos expuestos al indicador de fenolftaleína (Cochabamba y La Paz)**



**Fuente:** Elaboración Propia.

## Equipos de medición

Para la medición de la profundidad de carbonatación se usó un calibre vernier el cual ayudó a aumentar las precisiones de las medidas.

## Reactivos

Disolución de fenolftaleína que contiene 1 gr del indicador en una disolución de 70 ml de etanol y 30 ml de agua desmineralizada.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### I. Análisis de Muestras de Hormigón

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de carbonatación realizadas en las muestras de hormigón de diferentes regionales. Estos datos revelan la profundidad de carbonatación en diferentes puntos de las muestras y cómo esta profundidad varía con el tiempo. El procedimiento para la toma de mediciones de profundidad de carbonatación y el cálculo de la velocidad de la misma está basado en la normativa “BS EN 14630:2006 (Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Test methods — Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method) (4)”

- **Regional READY MIX Cochabamba**

**Tabla 3: Resultados de mediciones de profundidad de carbonatación en la regional de Cochabamba**

Sociedad Boliviana de Cemento S.A.

**INFORME DE ENSAYO DE CARBONATACIÓN**  
**ASESORÍA TÉCNICA CBBA 001/23**



<b>EMPRESA:</b>	SOBOCE.SA. - Planta Ready Mix CBBA	<b>FECHA :</b>	4/7/2023
-----------------	------------------------------------	----------------	----------

<b>DATOS DEL PROYECTO</b>		<b>UNIDAD</b>
T: Tiempo (años)		9
A: Superficie expuesta (m <sup>2</sup> )		0.0079
C: Cantidad de cemento por m <sup>3</sup> de hormigón (Kg/m <sup>3</sup> )		440
CaO: Fracción de la masa de CaO en el cemento		46.7
Mco <sub>2</sub> : Masa molar de CO <sub>2</sub>		44
Mcao: Masa molar de CaO (g/mol)		56
Altura (h) promedio (mm)		200

**Mediciones de Profundidad de Carbonatación**

<b>P1</b> (hm=200 mm)	
Nº	h(mm)
1	4
2	6.5
3	6.8
4	4.5
5	2.6
6	4
7	7
8	6.8
9	2.7
10	4
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>4.89</b>

<b>P2</b> (hm=200 mm)	
Nº	h(mm)
1	3.9
2	3.5
3	3.2
4	3.4
5	2.7
6	3.9
7	3.5
8	3.9
9	4.1
10	7.1
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>3.92</b>

<b>P3</b> (hm=200 mm)	
Nº	h(mm)
1	6.7
2	6.7
3	3.2
4	4.2
5	4.6
6	11.2
7	8.9
8	5
9	5.6
10	8.7
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>6.48</b>

<b>P4</b> (hm=200 mm)	
Nº	h(mm)
1	2
2	6.1
3	8.9
4	9.8
5	5.3
6	1.1
7	4.8
8	8.4
9	6.7
10	7
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>6.01</b>

<b>P5</b> (hm=200 mm)	
Nº	h(mm)
1	3.5
2	7.7
3	7.1
4	18.4
5	20.5
6	24
7	10
8	6.6
9	5
10	12.4
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>11.52</b>

<b>P6</b> (hm=200 mm)	
Nº	h(mm)
1	6.6
2	9.5
3	8
4	7.5
5	7.3
6	5.5
7	5.6
8	6.1
9	8.9
10	7.8
<b><math>\bar{x}</math></b>	<b>7.28</b>

**Fuente:** Elaboración Propia.

- **Regional READY MIX La Paz**

**Tabla 4: Resultados de mediciones de profundidad de carbonatación en la regional de La Paz**

Sociedad Boliviana de Cemento S.A.

**INFORME DE ENSAYO DE CARBONATACIÓN**  
**ASESORÍA TÉCNICA LPZ 001/23**



**EMPRESA:** SOBOCE.SA. - Planta Ready Mix LPZ

**FECHA :** 4/7/2023

DATOS DEL PROYECTO		UNIDAD
T: Tiempo (años)		9
A: Superficie expuesta (m <sup>2</sup> )		0.0079
C: Cantidad de cemento por m <sup>3</sup> de hormigón (Kg/m <sup>3</sup> )		340
CaO: Fracción de la masa de CaO en el cemento		57.97
Mco2: Masa molar de CO <sub>2</sub>		44
Mca0: Masa molar de CaO (g/mol)		56
h promedio (mm)		200

**Mediciones de Profundidad de Carbonatación**

P1 (hm=200 mm)	
Nº	h(mm)
1	5
2	10.15
3	8.16
4	11.14
5	13.13
6	17.16
7	15.33
8	4.58
9	5.7
10	3.31
X	9.366

P2 (hm=200 mm)	
Nº	h(mm)
1	2.96
2	2.65
3	4.55
4	8.57
5	7.89
6	4.08
7	5.03
8	9.76
9	3.95
10	6.8
X	5.624

P3 (hm=200 mm)	
Nº	h(mm)
1	10.09
2	16.43
3	16.3
4	11.63
5	2.48
6	13.8
7	11.52
8	18.09
9	23.38
10	11.53
X	13.525

**Fuente:** Elaboración Propia.

En función a los datos anteriores se puede realizar la estimación de la velocidad de carbonatación mediante el cálculo de la profundidad media y la implementación de la siguiente formula:

$$V_{CO_2} = \frac{X}{\sqrt{t}} \quad [1]$$

Donde:

X: profundidad promedio de carbonatación (mm)

t: tiempo transcurrido (años)

V<sub>CO2</sub>: Velocidad de carbonatación (mm/año)

En función a las profundidades de carbonatación determinadas en la regional de La Paz y Cochabamba, se pudo determinar las velocidades de carbonatación.

- Velocidad de carbonatación regional La Paz (Viacha IP-40)

Reemplazando en la ecuación [1]

$$V(LPZ)_{CO2} = \frac{9.5 \text{ mm}}{\sqrt{9} \text{ años}} = 3.2 \text{ mm/año}$$

- Velocidad de carbonatación regional Cochabamba (Viacha IP-30)

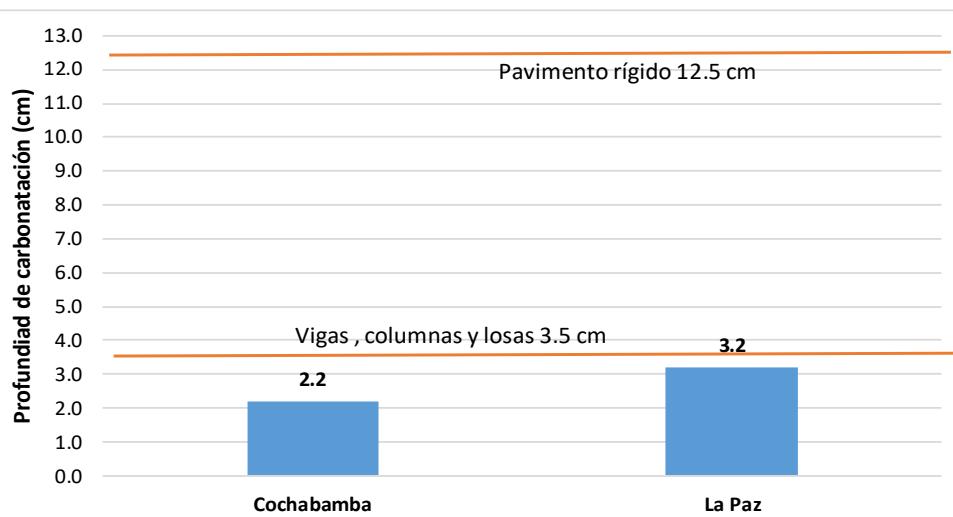
Reemplazando en la ecuación [1]

$$V(LPZ)_{CO2} = \frac{6.7 \text{ mm}}{\sqrt{9} \text{ años}} = 2.2 \text{ mm/año}$$

## II. Evaluación de la Calidad del Hormigón y resistencia a la carbonatación

En esta sección, se analiza la calidad del hormigón en función a la velocidad de carbonatación y si este fenómeno llega hasta el acero de refuerzo durante la vida útil del elemento o posterior a la misma. Para esto en función a la velocidad de carbonatación se estima la profundidad de carbonatación para un periodo de vida útil asumido de 100 años y se compara con recubrimientos también asumidos de elementos de hormigón como ser losas (2.5 cm), vigas-columnas (3.5 cm) y pavimentos rígidos (H/2=12.5 cm). (**Nota:** A pesar que cada elemento estructural en la práctica posee cantidades distintas de cementos en las dosificaciones y la velocidad de carbonatación puede variar, para este estudio se asumirá que todos los elementos tienen la misma dosificación y con la misma cantidad de cemento que los hormigones analizados en Cochabamba y La Paz).

**Figura 2: Grafica de evaluación de calidad y resistencia a la carbonatación**



Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en 100 años, el proceso de carbonatación no llega al acero de refuerzo en ningún elemento, por lo cual, este fenómeno no supondría ningún problema para la integridad estructural de cualquier elemento usualmente expuesto al medio.

### III. Capacidad de absorción de CO<sub>2</sub>

Para el cálculo de la absorción de (CO<sub>2</sub>) por metro cubico se aplicó de la siguiente formula del estudio “Estudio del Efecto Sumidero de CO<sub>2</sub> de los Materiales de Base Cemento (2)”:

$$\frac{kg_{CO_2abs}}{m^3} = \left( \frac{kg_{CO_2abs}}{kg_{cem_{carb}}} \right) * \left( \frac{kg_{cem_{carb}}}{m^3 horm_{carb}} \right) * (m_{horm_{carb}}) * \frac{m^2 horm_{exp}}{m^3 horm} \quad [2]$$

- **Primer término:** Cantidad de (CO<sub>2</sub>) absorbida por kg de cemento en la zona carbonatada.

$$kg_{co_{2abs}} = 0.75 * X * A * C * CaO * \frac{MCO_2}{MCaO} \quad [3]$$

Donde:

C: Cantidad de cemento por metro cubico de hormigón (Kg)

CaO: Fracción de la masa de Oxido de Calcio (CaO)

MCO<sub>2</sub> : Masa molar del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

MCaO : Masa molar del Oxido de Calcio (CaO)

X: Profundidad media de carbonatación (m)

A: Área de superficie carbonatada (diámetro de núcleo 10 cm) (m<sup>2</sup>)

h: Altura de núcleo extraído (m)

- **Segundo termino:** Cantidad de cemento por m<sup>3</sup> de hormigón en la estructura o probeta en cuestión. La cantidad de cemento carbonatado por m<sup>3</sup> de hormigón sin carbonatar, es decir, la dosificación se considera constante en toda la probeta o estructura, aunque la realidad es que la parte externa siempre tiene más pasta que el interior.

- Cantidad de cemento carbonatado del núcleo extraído

$$kg_{cem_{carb}} = C * X * A \quad [3]$$

- Volumen de hormigón carbonatado

$$m^3 horm_{carb} = A * X \quad [4]$$

- **Tercer Término:** Profundidad de carbonatación (X).

- **Cuarto término:** relación entre la superficie expuesta y el volumen del elemento considerado. Al multiplicar este término por la profundidad de carbonatación se obtienen los m<sup>3</sup> de hormigón carbonatado.

- Relación entre la superficie expuesta del núcleo con el volumen del mismo (Viacha IP-30)

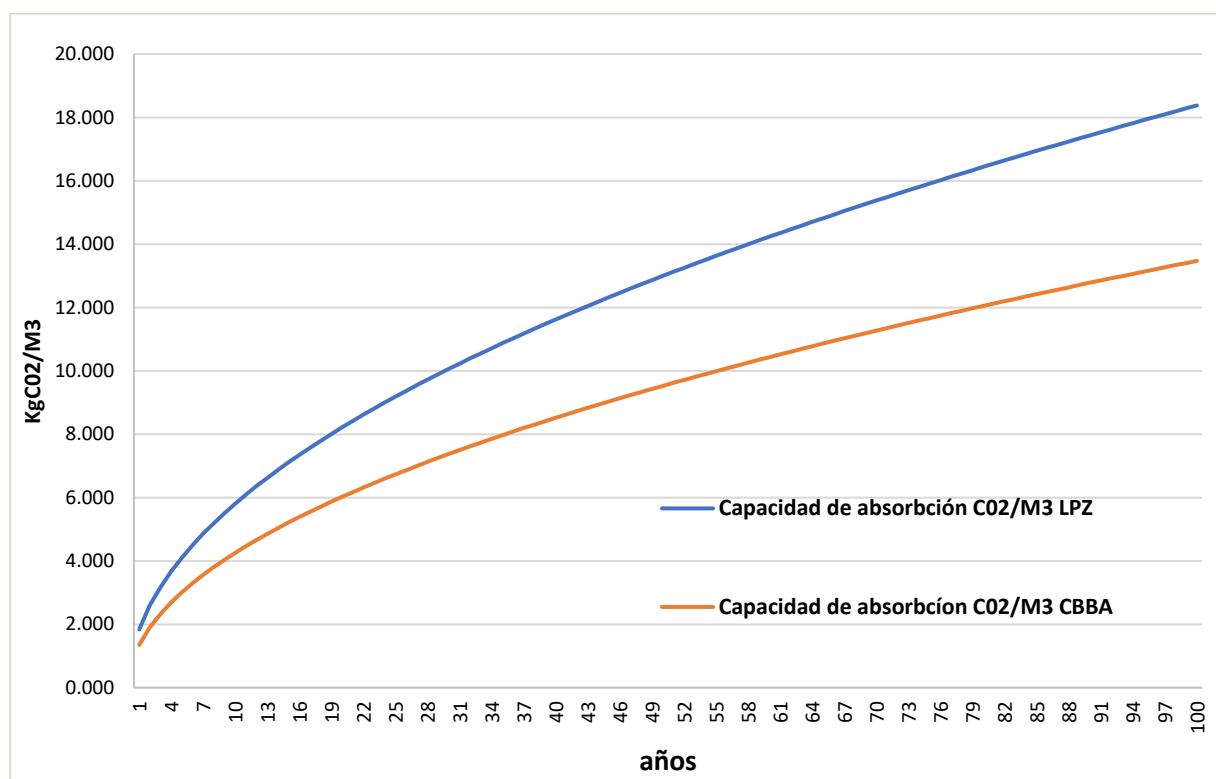
$$\frac{m^2 \text{horm\_exp}}{m^3 \text{horm}} = \frac{A}{A \cdot h}$$

Reemplazando todos los términos en la ecuación 1 se obtiene:

- Cantidad de CO<sub>2</sub> absorbido por m<sup>3</sup> de hormigón en Cochabamba (Viacha IP-30) en 9 años.

Empleando la ecuación [2] y usando la profundidad de carbonatación como variable en función del tiempo, se pudo obtener la siguiente grafica para calcular la curva de absorción de los hormigones estudiados para un periodo de vida útil de 100 años.

**Figura 3: Grafica de absorción de CO<sub>2</sub> para un periodo de vida útil de 100 años.**



Fuente: Elaboración Propia.

En función a los datos obtenidos de la anterior gráfica se puede estimar que lo largo de la vida útil de los hormigones estudiados se presentara una absorción para la vida útil de hormigón en la ciudad de la Paz elaborado con cemento Viacha IP 40 de **18.38 Kg de CO<sub>2</sub>** por metro cubico de hormigón. Por otro lado para el hormigón de la ciudad de Cochabamba el cual esta compuesto por cemento Viacha IP 30, a lo largo de su vida útil absorberá aproximadamente **13.47 Kg de CO<sub>2</sub>** por metro cubico de hormigón.

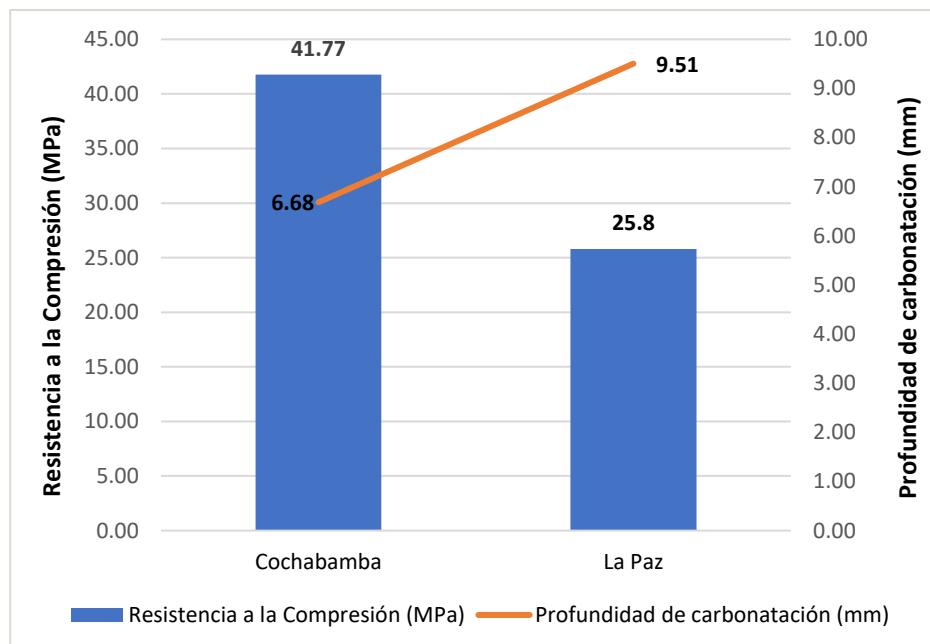
#### IV. Análisis paramétrico

En esta sección se analizará la interacción de ciertos parámetros respecto a la capacidad de carbonatación de los hormigones de cada regional.

- **Profundidad de carbonatación vs resistencia a la compresión.**

El parámetro de resistencia a la compresión está ligado a lo que es la impermeabilidad del hormigón y a la calidad del mismo. Por lo cual, se realizó la comparación entre la profundidad de carbonatación con la resistencia alcanzada en cada regional.

**Figura 4: Grafica comparativa entre la profundidad de carbonatación vs la resistencia a la compresión**



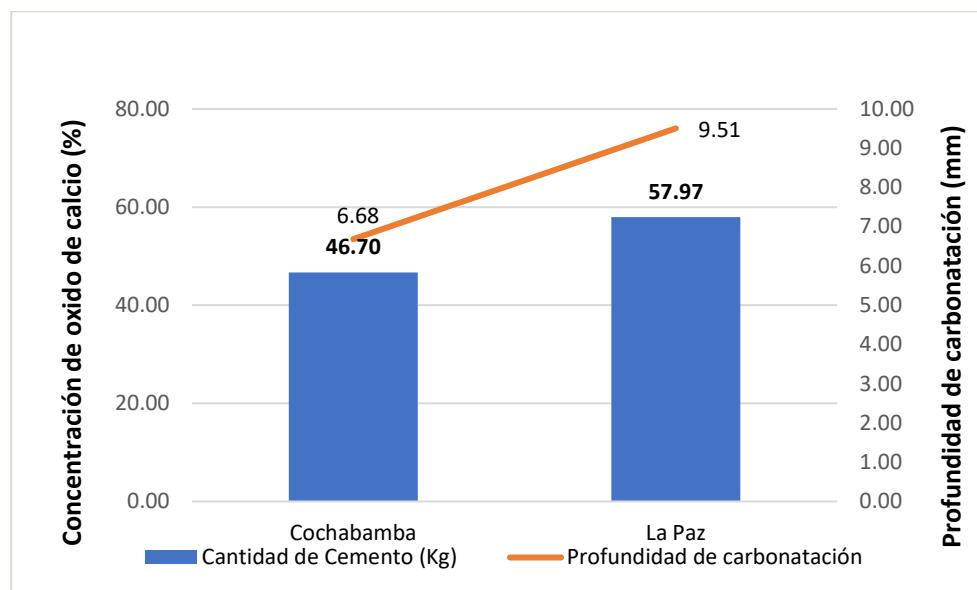
**Fuente:** Elaboración Propia.

En función a la gráfica anterior se puede observar claramente que ante una mayor resistencia a la compresión, existe una menor profundidad de carbonatación. Esto debido que a una mayor resistencia el índice de poros presentes disminuye.

- **Profundidad de carbonatación vs óxido de calcio (CaO)**

Al tener dos cementos diferentes como ser el VIACHA IP 30 Y EL VIACHA IP 40, se decidió enfatizar en la comparación de composición de óxido calcio y no así en la cantidad de cemento empleada en cada dosificación.

**Figura 5: Grafica comparativa entre la profundidad de carbonatación vs la concentración de óxido de calcio**



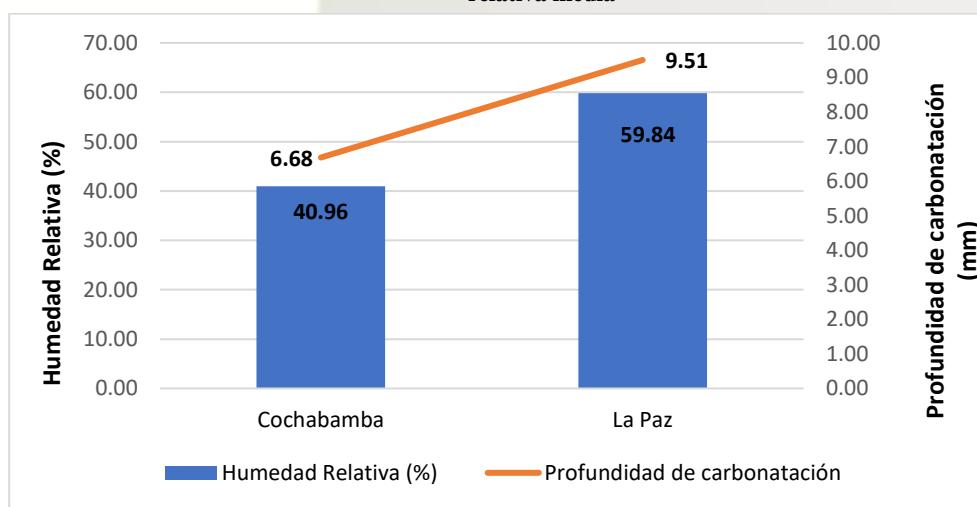
Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado se puede observar claramente que las muestras de la regional de Ready Mix La Paz que contienen el cemento Viacha IP-40 poseen un mayor contenido de óxido de calcio (ver tabla 2) a diferencia del Viacha IP-30 empleado en ese entonces en la regional de Cochabamba, lo cual generó una mayor profundidad de carbonatación por consecuente una mayor absorción de CO<sub>2</sub>.

- **Profundidad de carbonatación vs Humedad relativa.**

Se efectuó una recopilación de los datos históricos de humedad relativa de la base de datos del SENHAMI, con la finalidad de compararlos con la profundidad de carbonatación alcanzada de cada región (5).

**Figura 6: Grafica comparativa entre la profundidad de carbonatación vs humedad relativa media**



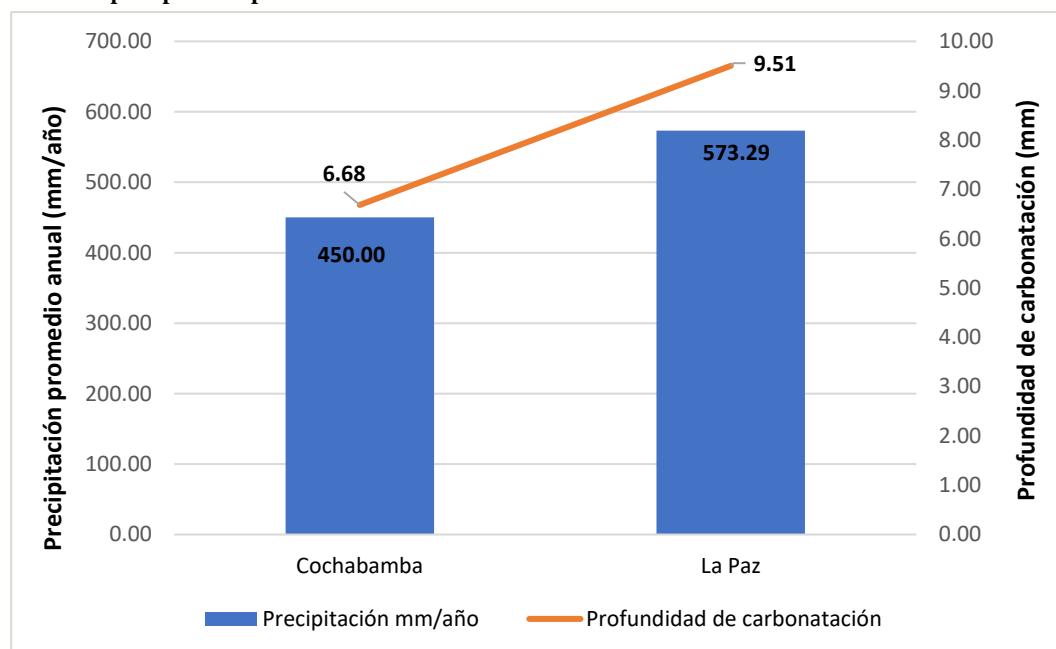
Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en la Figura N°6 la humedad relativa del medio influye en gran manera en lo que es el desarrollo de la carbonatación en el hormigón. Al presentarse una mayor humedad relativa en el medio, genera que las condiciones de reacción sean mejores entre el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del medio y el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) presente en el cemento. Debido a esto se da una mayor generación de carbonato de calcio.

- **Profundidad de carbonatación vs Precipitación promedio anual.**

Para complementar a los datos de humedad relativa se realizó una recopilación de datos de precipitación promedio anual (2).

**Figura 7: Grafica comparativa entre la profundidad de carbonatación vs precipitación promedio anual.**



**Fuente:** Elaboración Propia.

Complementando finalmente, ante una mayor precipitación anual en el medio existe un mayor porcentaje de humedad relativa, correlacionándose este punto con el anterior.

## V. Factores de exposición

Para realizar el cálculo del hormigón el cual está expuesto a carbonatación se tuvo que promediar distintos factores de exposición al medio en función a la estructura.

**Tabla 5: Factores de exposición al medio según tipo de estructura**

Estructura	(%) Porcentaje expuesto
Puentes y pasos	30
Pavimentos	10
Vigas y Pilares	24
Aceras, Bordillos	33
Muros	21
<b>Promedio</b>	<b>24</b>

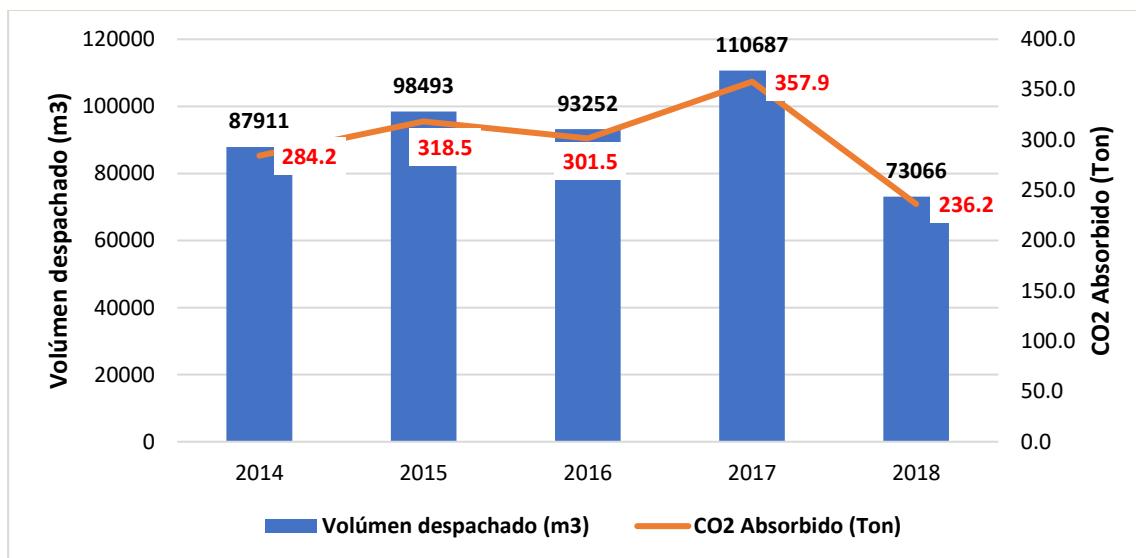
**Fuente:** Elaboración Propia.

## V. Absorción histórica de CO<sub>2</sub> del concreto producido en las READY MIX CBBA Y LPZ.

En función a la capacidad calculada de absorción de kilogramos de CO<sub>2</sub> por metro cubico para un periodo de 100 años en ambas regionales, se pretende estimar el volumen de CO<sub>2</sub> que se absorberá por hormigones vaciados en un periodo específico de 5 años. En el caso de Cochabamba se escogió el periodo entre 2014 y 2018, debido a que el cemento que se empleó para las muestras del estudio es del tipo Viacha IP-30, el cual se empleó hasta 2018 en la región. Por otro lado, se escogió en regional de La Paz el periodo más reciente de 2019 a 2023.

- ANALISIS DE ABSORCIÓN POR CARBONATACIÓN DE CO<sub>2</sub> DE LA REGIONAL READY MIX COCHABAMBA DE VOLUMENES DESPACHADOS EN EL PERIODO 2014-2018**

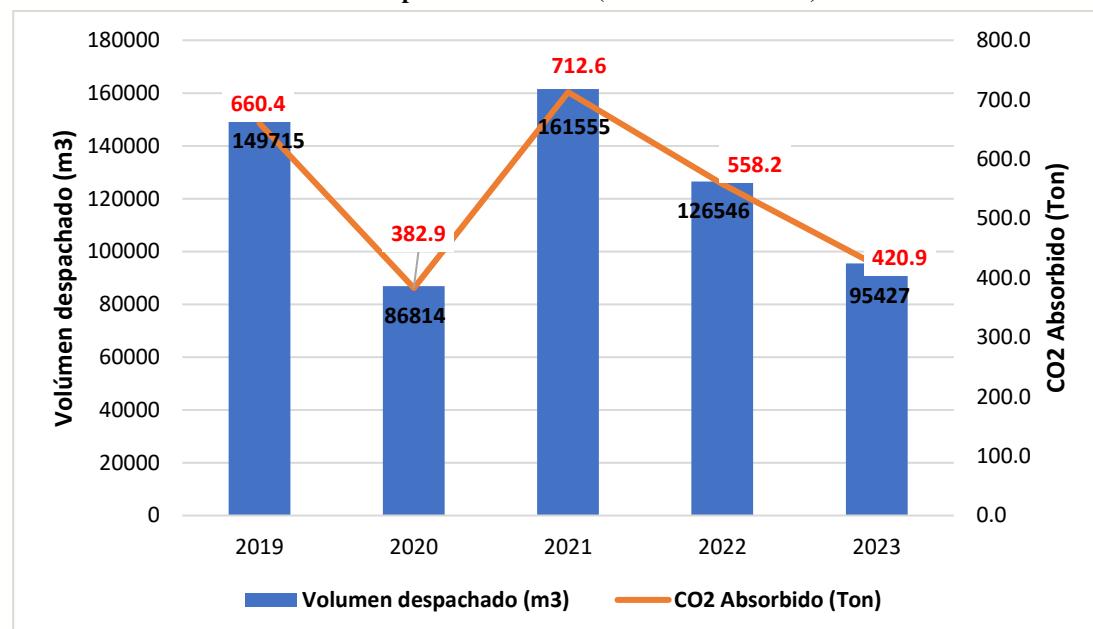
**Figura 8: Grafica comparativa entre el volumen despachado vs toneladas de CO<sub>2</sub> Absorbido por carbonatación (CBBA-VIACHA IP30).**



Fuente: Elaboración Propia.

- ANALISIS DE ABSORCIÓN POR CARBONATACIÓN DE CO<sub>2</sub> DE LA REGIONAL READY MIX LA PAZ EN DE VOLUMENES DESPACHADOS EN EL PERIODO 2019-2023**

**Figura 9: Grafica comparativa entre el volumen despachado vs toneladas de CO<sub>2</sub> Absorbido por carbonatación (LPZ-VIACHA IP40).**



Fuente: Elaboración Propia.

## 5. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este estudio sobre la carbonatación en dos ciudades distintas revelan relaciones esenciales entre diversos factores y la profundidad de carbonatación en estructuras de concreto. Se ha encontrado que la precipitación, la concentración de óxido de calcio, la resistencia a la compresión y la humedad relativa influyen significativamente en este proceso, por lo cual de cada parámetro analizado se debe extraer una conclusión que nos permita tener un panorama de dicho proceso.

- **Efecto de la Precipitación en la Profundidad de Carbonatación:**

Se ha identificado una correlación positiva entre la cantidad de precipitación y la profundidad de carbonatación. La humedad generada por la precipitación proporciona las condiciones necesarias para un aumento en la profundidad de carbonatación.
- **Efecto de la Concentración de Óxido de Calcio en la Profundidad de Carbonatación:**

Los hallazgos sugieren que existe una relación positiva entre la concentración de óxido de calcio y la profundidad de carbonatación. Esto podría indicar que un mayor contenido de óxido de calcio en el concreto aumenta su susceptibilidad a la carbonatación.
- **Efecto de la Resistencia a la Compresión en la Profundidad de Carbonatación:**

Resulta interesante destacar que a medida que aumenta la resistencia a la compresión del concreto, disminuye la profundidad de carbonatación. Esta relación plantea interrogantes y merece un análisis más profundo para identificar si se debe por la disminución de permeabilidad o a factores como el tipo de agregado empleado.
- **Efecto de la Humedad Relativa en la Profundidad de Carbonatación:**

El estudio revela que una mayor humedad relativa en el entorno favorece el proceso de carbonatación. Esto enfatiza la importancia de la disponibilidad de agua en el aire del medio.

- **ABSORCIÓN DE CO<sub>2</sub>**

En función a los datos obtenidos de cada regional, se pudo evidenciar que los hormigones analizados pudieron absorber cantidades de CO<sub>2</sub>, como ser en la ciudad de Cochabamba, los hormigones producidos por Ready Mix en el periodo de 2014-2018 absorbieron un estimado de 49.9 toneladas de CO<sub>2</sub>, mientras que en la ciudad de La Paz fueron de 91.2 toneladas de CO<sub>2</sub> en el periodo de 2019-2023. Se debe recalcar que se emplearon diferentes tipos de cemento y los volúmenes de despacho son completamente distintos. Por lo cual generaron distintas tasas de absorción.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

### 1. Agencia Internacional de energía. [En línea]

[https://www.google.com/search?q=agencia+internacional+de+energ%C3%ADa+at%C3%BD+C3%BCmica&sca\\_esv=581793872&sxsrf=AM9HkKmLLXB\\_HB4U-KwN-5z6kiw41Da69w%3A1699835846735&source=hp&ei=xm9RZYO2KrzO1sQP2ayxyAI&iflsig=AO6bgOgAAAAAZVF91mmpO5zdCwdcezd3e9GDO77Zf66O&gs\\_ssp=e](https://www.google.com/search?q=agencia+internacional+de+energ%C3%ADa+at%C3%BD+C3%BCmica&sca_esv=581793872&sxsrf=AM9HkKmLLXB_HB4U-KwN-5z6kiw41Da69w%3A1699835846735&source=hp&ei=xm9RZYO2KrzO1sQP2ayxyAI&iflsig=AO6bgOgAAAAAZVF91mmpO5zdCwdcezd3e9GDO77Zf66O&gs_ssp=e).

### 2. Estudio del Efecto sumidero de CO<sub>2</sub> de los materiales de base Cemento. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETCC).

### 3. clasificación de los cementos, por tipos y categorías resistentes. Norma Boliviana del Cemento (NB 011). La paz : s.n., 2012.

### 4. EUROPEAN STANDARS. EUROPEAN STANDARS. EUROPEAN STANDARS. [En línea] 2006. [Citado el: 23 de Noviembre de 2023.] <https://www.en-standard.eu/bs-en-14630-2006-products-and-systems-for-the-protection-and-repair-of-concrete-structures-test-methods-determination-of-carbonation-depth-in-hardened-concrete-by-the-phenolphthalein-method/>.

### 5. SENAMHI. SENAMHI. [En línea] <https://senamhi.gob.bo/index.php/inicio>.