

Área de conocimiento de ingeniería y afines.

# “PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DE CARBONATACIÓN EN EL CONCRETO ESTRUCTURAL MEDIANTE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LA MEZCLA CONVENCIONAL ”

Trabajo Monográfico para optar al título de Ingeniero Civil

**Elaborado por:**

Br. Cedrick Nataniel  
Chávez Santamaría  
Carnet: 2017-0009J

Br. Yunieth Scarleth  
Lazo Martínez  
Carnet: 2017-0020J

Br. Carlos Adolfo  
Campos Romero  
Carnet: 2017-0221J

**Tutor:**

Dr. Eddisson Francisco  
Hernández

## Resumen

En este trabajo se evaluaron mezclas de concreto que contenían Dióxido de Titanio, como alternativa constructiva en sustitución de concreto ordinario, para la construcción de estructuras de concreto reforzado. El objetivo de esta investigación fue añadir a la mezcla tradicional de concreto el aditivo a diferentes concentraciones. Los materiales empleados fueron arena Motastepe, grava basáltica de 3/4", cemento Portland "CPO" de la marca canal.

Se elaboraron 48 especímenes de concreto, con dimensiones de 100 mm (4") de diámetro y 200 mm (8") de longitud, lo cuales se curaron a 28 y 60 días en húmedo. Se realizaron mediciones de la resistencia a la compresión, pruebas de sorptividad y medición a los frentes de carbonatación.

Los resultados de resistencia a la compresión a los 28 y 60 días de edad indican que las mezclas que contenían dióxido de titanio, alcanzaron una resistencia menor al control. La sorptividad medida en los concretos con aditivo fue menor en comparación con los de control.

## Summary

In this work, concrete mixtures containing Titanium Dioxide were evaluated as a construction alternative to replace ordinary concrete, for the construction of reinforced concrete structures. The objective of this research was to add the additive at different concentrations to the traditional concrete mix. The materials used were Motastepe sand, 3/4" basaltic gravel, Canal brand "CPO" Portland cement.

48 concrete specimens were made, with dimensions of 100 mm (4") in diameter and 200 mm (8") in length, which were cured for 28 and 60 days wet. Measurements of compressive strength, sorptivity tests and measurement of carbonation fronts were carried out.

The results of compressive strength at 28 and 60 days of age indicate that the mixtures containing titanium dioxide reached a lower resistance than the control. The sorptivity measured in the concretes with additives was lower compared to the control concretes.

## **Dedicatoria**

Principalmente dedicó este trabajo a Dios puesto que nos brinda sabiduría, amor y paciencia, nos ayuda en los momentos más difíciles brindándonos valores que nos fortalezcan no solo como trabajo de grupo, sino como personas. A la vez también dedicamos este trabajo a la UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA por encomendarnos la labor de realizar la presente monografía que amplía nuestra capacidad intelectual, dado que el Dr. Eddisson Francisco Hernández nos brindó su sabiduría en distintos campos del conocimiento, ayudándonos así en varios aspectos que requerimos para el desarrollo de nuestro informe.

Dedico este trabajo a mis padres y demás familiares y amigos puesto que me brindaron apoyo y fortaleza en el desarrollo y transcurso de este, ayudándome a concluir satisfactoriamente lo encomendado.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios en primer lugar por darme la oportunidad de seguir viviendo, a mi madre por su apoyo y amor a mi familia por estar siempre conmigo y mis amigos por hacer que mi vida sea distinta, también se le agradece al Dr. Eddisson Francisco Hernández que como tutor me a orientado apoyado y corregido en mi labor académica con un interés y una entrega han sobrepasado con mucho todas las expectativas que, como alumna, deposito en su persona. Todas estas personas han influido para llenarla y darle sentido a ella por eso siempre les agradezco por ser parte de mi vida.

### **In memoriam**

En honor a mi Papá Jonny Lazo, mi fuente de inspiración y sabiduría. Aunque ya no estes físicamente conmigo tu espíritu y amor siguen guiándome en cada paso de este camino.

¡Con mucho amor!

Yunieth Scarleth Lazo Martínez.

## **Dedicatoria**

Le dedico este trabajo monográfico, primeramente, a Dios por haberme dado las fuerzas y sabiduría para poder llegar al final de esta meta.

A mi abuela, por cuidar de mi durante todos estos años y ser uno de mis apoyos incondicional.

Y sobre todo se lo dedico a mi madre, Karla Romero por apoyarme y darme ánimos desde el primer día, hasta el final, sin el apoyo de ella no hubiera sido posible culminar cumplir esta meta.

## **Agradecimientos**

Primeramente, le doy gracias a Jehová por habernos permitido culminar de manera exitosa nuestra carrera, él nos dio las fuerzas para poder llegar al final.

Agradezco a mis familiares los cuales fueron un apoyo constante en todo el camino hasta llegar al final de esta etapa; Especialmente a mis padres y abuelitas quienes estuvieron a mi lado todo el tiempo dándome ánimos.

Agradezco a mi madre por haberme reglado sus consejos y palabras de ánimo en todo momento, como también por ser mi sustento económico durante todo este tiempo.

A mis compañeros por brindarme su compañía y apoyo durante toda la carrera. A nuestro Tutor doctor Eddisson Hernández quien estuvo pendiente en todo momento de nuestro trabajo monográfico, corrigiéndonos y aconsejándonos.

¡Muchas gracias!

Carlos Adolfo Campos Romero.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi madre y padre, por su amor incondicional, apoyo y sacrificio que hicieron posible cada paso de mi camino para llegar a ser un profesional del cual puedan estar orgullosos. A mi familia, por su comprensión y aliento constante. Este logro es también de ustedes.

Finalmente, quiero dedicar este trabajo a Dios, cuya gracia y guía han sido mi luz en este viaje académico. Su amor incondicional y fortaleza me han sostenido en los momentos de duda y desafío. Sin Su divina providencia, este logro no habría sido posible.

## **Agradecimientos**

Quiero comenzar expresando mi más profundo agradecimiento a Dios, por permitirme ser capaz de alcanzar este logro en mi vida. Que este trabajo sea un testimonio de Su gracia y misericordia.

Mi más sincero agradecimiento a mi familia, especialmente a mi madre, Tatiana Santamaría, por su amor incondicional, sacrificio y constante estímulo. A mi padre Néstor Chávez por su apoyo, ya que, fue fundamental para superar los desafíos y alcanzar este logro académico. A mi hermana, Solange Chávez por sus consejos y enseñanzas que ha podido compartir a largo de nuestras vidas.

A mis compañeros de tesis, Carlos y Yunieth, por su compañía y ánimo y por todas las dificultades que supimos superar. A nuestro tutor, Dr. Ing. Eddisson Hernández, por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Sus conocimientos y consejos fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este logro no habría sido posible sin su generosidad, apoyo y compromiso.

¡Gracias!

Cedrick Nataniel Chávez Santamaría.

# Índice

<b>I. Capítulo I - Generalidades</b> .....	1
<b>1.1 Introducción</b> .....	1
<b>1.2 Planteamiento del problema</b> .....	3
<b>1.3 Justificación</b> .....	5
<b>1.4 Antecedentes</b> .....	6
<b>1.5 Objetivos</b> .....	9
<b>1.5.1 Objetivo General</b> .....	9
<b>1.5.2 Objetivos Específicos</b> .....	9
<b>1.5.3 Hipótesis</b> .....	9
<b>II. Capítulo II – Marco Teórico</b> .....	10
<b>2.1 Cemento Portland</b> .....	10
<b>2.1.1 Cementos Nacionales</b> .....	10
<b>2.1.2 Composición química del cemento portland</b> .....	11
<b>2.2 Agregados</b> .....	13
<b>2.2.1 Agregado Fino</b> .....	13
<b>2.2.2 Agregado Grueso</b> .....	14
<b>2.3 Propiedades de los Agregados</b> .....	14
<b>2.4 Concreto</b> .....	15
<b>2.5 Caracterización de los Materiales</b> .....	17
<b>2.6 Resistencia a la Compresión</b> .....	19
<b>2.7 Absorción Capilar del Concreto</b> .....	20
<b>2.8 Carbonatación</b> .....	21
<b>2.8.1 Efectos de la Carbonatación en el Concreto</b> .....	22
<b>2.9 Titulación con Fenolftaleína</b> .....	22
<b>2.10 Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>)</b> .....	23
<b>2.10.1 Estructura Electrónica y Cristalográfica del TiO<sub>2</sub></b> .....	24
<b>2.10.2 Propiedades Físicas del TiO<sub>2</sub></b> .....	26

2.11	Concreto Fotocatalítico .....	26
2.11.1	Fotocatálisis .....	27
III.	Capítulo III – Caracterización: Métodos y Materiales .....	29
3.1	Cemento.....	29
3.2	Agregados Pétreos.....	34
3.3	Mezcla de Concreto .....	38
3.3.1	Diseño de Experimento .....	38
3.3.2	Diseño y elaboración de mezcla para la elaboración de especímenes.....	39
3.3.3	Propiedades del Concreto Endurecido.....	41
IV.	Capítulo IV – Pruebas Realizadas: Resultados y Evaluación .....	47
4.1	Fraguado .....	47
4.2	Resistencia a la Compresión Axial.....	47
4.3	Sorptividad.....	56
4.3.1	Carbonatación Acelerada en el Concreto Endurecido.....	62
V.	Capítulo V – Costo y Beneficio .....	70
VI.	CAPITULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	82
6.1	Conclusiones .....	82
6.2	Recomendaciones.....	83
VII.	BIBLIOGRAFÍAS .....	84

## Índice de Figuras

Figura 1.	Celdas unitarias de (a) rutilo y (b) Anatasa (Gutarra, 2004) .....	24
Figura 2.	Estructura octaédrica del dióxido de titanio en fase rutilo (Gutarra, 2004).....	25
Figura 3.	Proceso de mineralización de contaminantes orgánicos con nanopartículas de dióxido de titanio (Gonzalez y Tovar, 2004) .....	25
Figura 4.	Curva granulométrica del agregado fino (Fuente: Propia).....	36
Figura 5.	Curva granulométrica del agregado grueso (Fuente: Propia).....	37
Figura 6.	Probetas elaboradas para los ensayos pertinentes (Fuente propia).....	38
Figura 7.	Ensayes de la prueba a compresión Axial (Fuente: Propia).....	41
Figura 8.	Esquema de absorción de agua por capilaridad (Hernández, 2012) .....	43

Figura 9. Espacio hermético y controlado donde se llevó a cabo la prueba de carbonatación acelerada (Fuente: Propia). .....	44
Figura 10. Detector de Dióxido de Carbono LCD (Fuente: Amazon).....	45
Figura 11. Manómetro utilizado para la regulación de dióxido de carbono (Fuente: Propia). .....	45
Figura 12. Corte transversal realizado para las probetas expuestas a dióxido de carbono (Fuente: Propia).....	46
Figura 13. Medición del frente de carbonatación (Fuente: Propia). .....	46
Figura 14. Comparativa de resistencia a la compresión para especímenes de concreto, $a/c=0.60$ a los 28 días. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia). .....	51
Figura 15. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto de control, $a/c=0.60$ a los 28 días (Fuente: Propia). .....	48
Figura 16. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 0.5% de concentración, $a/c=0.60$ a los 28 días (Fuente: Propia). .....	49
Figura 17. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 1.5% de concentración, $a/c=0.60$ a los 28 días (Fuente: Propia). .....	49
Figura 18. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 2.5% de concentración, $a/c=0.60$ a los 28 días (Fuente: Propia). .....	50
Figura 19. Comparativa de resistencia a la compresión para especímenes de concreto, $a/c=0.60$ a los 60 días. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia). .....	55
Figura 20. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto de control, $a/c=0.60$ a los 60 días (Fuente: Propia). .....	52
Figura 21. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 0.5% de concentración, $a/c=0.60$ a los 60 días (Fuente: Propia). .....	53
Figura 22. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 1.5% de concentración, $a/c=0.60$ a los 60 días (Fuente: Propia). .....	53
Figura 23. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 2.5% de concentración, $a/c=0.60$ a los 60 días (Fuente: Propia). .....	54
Figura 24. Sorptividad a diferentes concentraciones. Las barras de error indican una desviación estándar.....	60

Figura 25. Sorptividad para mezcla de concreto de control a los 60 días de edad (Fuente: Propia).....	56
Figura 26. Sorptividad para mezcla de concreto con 0.5% de TiO <sub>2</sub> a los 60 días de edad (Fuente: Propia).....	57
Figura 27. Sorptividad para mezcla de concreto con 1.5% de TiO <sub>2</sub> a los 60 días de edad (Fuente: Propia).....	58
Figura 28. Sorptividad para mezcla de concreto con 2.5% de TiO <sub>2</sub> a los 60 días de edad (Fuente: Propia).....	59
Figura 29. Curva de sorptividad (Fuente: Propia).....	61
Figura 30. Esquematización de toma de mediciones de profundidad de carbonatación en concretos (Fuente: Propia).....	62
Figura 31. Profundidad de carbonatación en concreto de control, a/c=0.60 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia).....	63
Figura 32. Profundidad de carbonatación en concreto con 0.5% de concentración, a/c=0.60 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia).....	64
Figura 33. Profundidad de carbonatación en concreto con 1.5% de concentración, a/c=0.60 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia).....	65
Figura 34. Profundidad de carbonatación en concreto con 2.5% de concentración, a/c=0.60 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia).....	66
Figura 35. Profundidad de carbonatación en especímenes de concreto a diferentes concentraciones, a/c=0.60 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar.....	67

## Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química del cemento portland.....	12
Tabla 2. Propiedades de los agregados.....	14
Tabla 3. Caracterización de los materiales .....	17
Tabla 4. Ensaye de consistencia Normal .....	29
Tabla 5. Tiempos de fraguado para pasta de cemento sin aditivo .....	30

Tabla 6. Tiempos de fraguado para pasta de cemento con 0.5% de concentración de dióxido de titanio .....	31
Tabla 7. Tiempos de fraguado para pasta de cemento con 1.5% de concentración de dióxido de titanio .....	32
Tabla 8. Tiempos de fraguado para pasta de cemento con 2.5% de concentración de dióxido de titanio .....	33
Tabla 9. Peso de muestras de agregado fino.....	34
Tabla 10. Peso de muestras de agregado grueso.....	35
Tabla 11. Caracterización de los agregados pétreos .....	35
Tabla 12. Tabla granulométrica agregado grueso fino .....	36
Tabla 13. Tabla granulométrica agregado grueso 3/4" .....	37
Tabla 14. Cantidad de especímenes por cada prueba y concentración .....	38
Tabla 15. Proporciones para la elaboración de 1.0m <sup>3</sup> de concreto.....	40
Tabla 16. Resumen de concretos a los 28 días expuestos a compresión .....	47
Tabla 17. Resumen de concretos a los 60 días expuestos a compresión .....	51
Tabla 18. Absorción capilar para mezcla control a los 60 días de edad .....	57
Tabla 19. Absorción capilar para mezcla con 0.5% de TiO <sub>2</sub> a los 60 días de edad .....	58
Tabla 20. Absorción capilar para mezcla con 1.5% de TiO <sub>2</sub> a los 60 días de edad .....	59
Tabla 21. Absorción capilar para mezcla con 2.5% de TiO <sub>2</sub> a los 60 días de edad .....	60
Tabla 22. Tabla resumen para concreto control para lecturas de la profundidad de carbonatación .....	63
Tabla 23. Tabla resumen para concretos con 0.5% de TiO <sub>2</sub> para control de lecturas de la profundidad de carbonatación.....	64
Tabla 24. Tabla resumen para concretos con 1.5% de TiO <sub>2</sub> para control de lecturas de profundidad de carbonatación.....	65
Tabla 25. Tabla resumen para concretos con 2.5% de TiO <sub>2</sub> para control de lecturas de profundidad de carbonatación.....	66
Tabla 26. Cantidades para la elaboración de un metro cúbico de concreto sin aditivo.....	70
Tabla 27. Cantidades para la elaboración de un metro cúbico de concreto con 0.5% de concentración de dióxido de titanio en la mezcla .....	70
Tabla 28. Cantidades para la elaboración de un metro cúbico de concreto con 1.5% de concentración de dióxido de titanio en la mezcla .....	71

Tabla 29. Cantidades para la elaboración de un metro cúbico de concreto con 2.5% de concentración de dióxido de titanio en la mezcla .....	71
Tabla 30. Presupuesto para sección estudiantil con mezcla de concreto ordinaria .....	73
Tabla 31. Presupuesto para sección estudiantil con mezcla de concreto con 0.5% de dióxido de titanio añadido .....	75
Tabla 32. Presupuesto para sección estudiantil con mezcla de concreto con 1.5% de dióxido de titanio añadido .....	77
Tabla 33. Presupuesto para sección estudiantil con mezcla de concreto con 2.5% de dióxido de titanio añadido .....	79

# I. Capítulo I - Generalidades

## 1.1 Introducción

La construcción es una de las actividades que ha marcado el desarrollo de la ingeniería civil. Los métodos de construcción se siguen investigando y renovando para un mejor aprovechamiento de los materiales, desde su producción hasta la culminación del proceso al cual están destinados.

Los procesos constructivos se diferencian por la variedad de materiales que se pueden utilizar en ellos, uno de los principales es el concreto reforzado, el cual, es una mezcla homogénea de agregados (arena y grava) con cemento y agua en porciones predispuestas para lograr cierta resistencia. Esto con el objetivo de recubrir las varillas de acero que se encuentran en la parte interna de las estructuras (YURA, 2022).

A medida que los procedimientos constructivos y materiales evolucionan, a su vez, los problemas que acarrearán ciertas prácticas también lo hacen. Centrándose en el concreto reforzado, uno de los principales problemas que lo afectan es la corrosión de las varillas internas. Esta problemática ataca directamente la vida útil de la estructura en cuestión tanto no permitiendo que la misma llegue a trabajar como se previó (Torrez y Cortéz, 2013).

Hay muchos factores que ocasionan corrosión en el acero, uno de los principales es el dióxido de carbono que, por desventaja natural, el concreto por sí solo lo absorbe, debido a factores químicos involucrados lo que permite la formación de carbonato de calcio, que, al entrar en contacto con el acero, genera corrosión

La propuesta de un método de **“REDUCCIÓN DE LA CARBONATACIÓN EN EL CONCRETO MEDIANTE LA ADICIÓN DE DIÓXIDO DE TITANIO EN LA MEZCLA CONVENCIONAL.”**, se plantea gracias a las propiedades físico-mecánicas del aditivo en cuestión. El  $\text{TiO}_2$  al ser expuesto a la luz solar por sí mismo empieza un proceso de fotocatalisis, es decir, empieza a neutralizar diferentes contaminantes

entre ellos el dióxido de carbono y a su vez, es capaz de reducir la porosidad en los elementos conformados con concreto.

El objetivo de este proyecto es reducir la carbonatación en las estructuras y la oxidación producida por el agua con la implementación de dióxido de titanio en la mezcla tradicional del concreto; Para ello se determinaron las concentraciones de contaminantes en el aire que se pueden encontrar de manera natural. Se realizaron pruebas de la capacidad depurativa del dióxido de titanio añadido al concreto en la remoción de contaminantes presentes en el aire. Por último, fue evaluada la porosidad de los elementos expuestos al químico realizando las pruebas de sorptividad y absorción, arrojando resultados que reafirman el beneficio de su aplicación.

Los resultados esperados en esta investigación consisten que el concreto fotocatalítico diseñado presente propiedades físicas y mecánicas (pruebas de compresión axial) similares a las del concreto ordinario según los requerimientos mínimos estipulados por el reglamento que rige la construcción nacional. Así mismo, se espera que, con los resultados de este estudio, este tipo de concreto se tome en cuenta como un material de construcción alternativo para fachadas y elementos estructurales.

## 1.2 Planteamiento del problema

La carbonatación es un problema que afecta a las estructuras de concreto reforzado, ocasionando la pérdida del funcionamiento estructural al reducirse la resistencia a cargas que debe resistir el acero estructural. (Ospino, 2021). “La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral, reduciendo la alcalinidad del concreto que protege al acero de la corrosión” (Ospino, 2021).

Este proceso es generado cuándo el dióxido de carbono de ambientes contaminados (ej. la lluvia ácida) comienza a reaccionar con el hidróxido de calcio del concreto (un derivado de la reacción del cemento con el agua). De dicha reacción se forma el carbonato de calcio, de ahí proviene el nombre “Carbonatación” (Montoya, 2015).

El incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero principalmente de CO<sub>2</sub> es un problema a nivel mundial y sobre todo en las ciudades donde la cantidad de vehículos, fábricas o industrias es alta, ciudades donde la mayoría de las construcciones son de concreto reforzado, lo que supone un problema de seguridad y costo debido a la carbonatación del concreto (Montoya, 2015)

La carbonatación puede causar problemas de corrosión incluso en un concreto de alta calidad: un recubrimiento bajo del concreto y defectos de superficie tales como grietas y pequeños agujeros proporcionan una ruta directa al acero de refuerzo (Osorio, 2021). No pasará mucho tiempo antes de que el acero en el área de esta grieta empiece a corroerse.

Los bordes del recubrimiento de concreto son especialmente susceptibles a la corrosión por carbonatación. Si el acero en estas áreas no tuviera un recubrimiento de concreto adecuado, la carbonatación conduciría a la corrosión y podría causar desportillamiento en los bordes en muy pocos años (Osorio, 2021).

El ámbito de la construcción en Nicaragua; es un campo en desarrollo, siendo el principal elemento constructivo el concreto reforzado, considerando la tendencia en el incremento de las concentraciones de CO2 en el futuro medio y de largo plazo según escenarios de cambio climático (Datosmacro, 2020), supondrá un problema económico y de seguridad en las construcciones a futuro en el país.

### 1.3 Justificación

Actualmente el uso de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en las estructuras a base de cemento está en aumento, debido a sus propiedades fotocatalíticas que se activan al tener contacto con la radiación ultravioleta (Villar, 2020). La propuesta de implementación de dióxido de titanio se debe a que éste es cada vez más común y fácil de utilizar debido a sus beneficios para algunas aplicaciones.

La corrosión del acero podría disminuirse gracias al proceso de fotocatalisis que puede generar el dióxido de titanio, el cual ayuda a eliminar los contaminantes como óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), compuestos orgánicos volátiles (COVs), material particulado (PM), ozono ( $\text{O}_3$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), se encuentran en la atmosfera (Montoya y Manzanares, 2019). A su vez, puede usarse para reducir la oxidación del acero a través de un proceso de permeabilización del concreto que lo recubre.

El acceso a concretos especializados para construcciones de bajo valor económico como viviendas residenciales resulta muy costoso. Sin embargo, en proyectos de alto valor económico su empleo resulta factible dado que es una buena manera de asegurar la inversión a través del tiempo, debido a que incrementa la vida útil de la estructura y reduce los costos de mantenimiento. (Montoya y Manzanares, 2019)

La experimentación con dióxido de titanio como aditivo en pastas de cemento y concretos en esta investigación, tiene como propósito obtener la información necesaria sobre la carbonatación y la capacidad de reducción de la misma que puede generar el  $\text{TiO}_2$  en la mezcla de concreto convencional. Es importante destacar que el uso de este tipo de aditivo podría contribuir en una reducción importante en los gastos por mantenimiento a los diferentes elementos estructurales que pueden sufrir daños o afectaciones debido a la oxidación del acero producida por la carbonatación en el concreto en lugares donde la concentración de  $\text{CO}_2$  es alta.

## 1.4 Antecedentes

Donoso (2018) destaca que el desarrollo industrial, el crecimiento tecnológico, el incremento de la población y todos los influyente en la evolución del ser humano son los factores principales que han ayudado al incremento de los niveles de contaminación del medio ambiente que a su vez provoca que la salud de la población disminuya considerablemente; Investigadores de todo el mundo han hecho posible el desarrollo de tecnologías limpias, también de materiales y procesos de construcción agradables con el medio ambiente, en este caso referimos algunos de los estudios realizados a nivel global con el fin de minimizar los contaminantes del aire a partir de la inclusión de material fotocatalítico.

Montoya y Manzanares (2019) mencionan que después de un proceso de investigación experimental elaborando concretos con residuos industriales de cantera de agregados pétreos, se evaluaron las propiedades fotocatalíticas del concreto adicionado con dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), como reductor de la contaminación del aire por partículas volátiles, a partir de la aplicación de prefabricados para obras de infraestructura vial, dando como resultado final el diseño de una cuneta fotocatalítica.

La adición del dióxido de titanio al concreto afecta la resistencia en medida que aumenta su proporción, sin embargo, gracias a los ensayos hechos se observa que en el rango de adición del 2.50% al 7.50% de  $\text{TiO}_2$  en fase rutilo y anatasa, el diseño de mezcla disminuye su resistencia a la compresión, Pese a esto, el diseño sigue cumpliendo con las condiciones de resistencia de los prefabricados conforme a la Norma Técnica Colombiana, que es 4000 psi (28 MPa). Adicionalmente, se evidencia que, durante los primeros días de fraguado, el concreto adicionado con  $\text{TiO}_2$  acelera el curado del concreto y permite que alcance rangos de resistencia más altos. A medida que aumenta el porcentaje de dióxido de titanio al concreto, aumenta sus propiedades fotocatalíticas, siendo las muestras con 7.50% de adición las que mayor degradación de color y contaminación presentaron.

El concreto con propiedades fotocatalíticas elaborado a partir de agregados de residuos de cantera, debe tener una adición de  $\text{TiO}_2$  preferiblemente del 5.0% en

fase rutilo por ser más comercial y fácil de conseguir, esta proporción permite que el concreto cumpla con la resistencia y adicionalmente muestra resultados óptimos para la degradación de contaminantes encontrados en el aire, el porcentaje del 7.50% también actúa conforme a los objetivos planteados pero no es una solución viable ya que al haber un 2.50% de diferencia aumentaría su costo de producción.

Chavez y Cortéz (2020) mencionan que un nuevo método para afrontar este problema es la incorporación del fotocatalizador dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$  capaz de desarrollar propiedades controladas por la luz solar como son la purificación del aire y la autolimpieza. Este trabajo busca introducir este componente orgánico al mortero de cemento usado para el tarrajeo de fachadas y elementos estructurales.

En 1970, una investigación de Fujishima (1972) sobre la separación fotocatalítica de agua usando electrodos de dióxido de titanio hizo posible la utilización de las propiedades fotocatalíticas con otros fines.

Desde 1996, se desarrolló los primeros experimentos a base cemento con adición de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en la mezcla del hormigón de la iglesia “Dives in Misericordia” de Roma, Italia, a este nuevo tipo de cemento fue llamado “TX Millennium”, contenía 5.0% de dióxido de titanio, con el cual se pudo apreciar las propiedades fotocatalíticas, consiguiendo la característica autolimpiable al entrar en contacto con la fachada.

En Bélgica se aplicó el proceso fotocatalítico al concreto para pavimento con adición de  $\text{TiO}_2$  mostrando buenos resultados y removiendo contaminantes de la superficie logrando de esta manera la purificación del aire.”

Jimenez y Moreno (2016) concluyen en su ensayo realizado, que la compresión a los 28 días de su muestra, el mortero con 5.0% de  $\text{TiO}_2$  reemplazado en el cemento obtuvo un incremento en la resistencia a la compresión de hasta 6.0%, mientras que los morteros con 7.50% y 8.50% mostraron una disminución de su resistencia, también se encontró que al aumentar la cantidad de  $\text{TiO}_2$  en la mezcla, esta tiende a volverse menos manejable, ya que su proceso de fraguado es bastante rápido. Define que al aumentar la cantidad en porcentaje de  $\text{TiO}_2$ , se muestra un mortero

más seco y se convierte menos trabajable, por lo cual se recomienda el uso de plastificantes para mejorar la mezcla. Teniendo en cuenta el análisis de costos, se encontró que la aplicación con uso de mortero con 5.0% de  $\text{TiO}_2$  en reemplazo del cemento portland, es solo 3.0% más caro que el mortero tradicional.

Otro estudio menciona la efectividad de  $\text{TiO}_2$  para reducir los contaminantes atmosféricos de  $\text{NO}_x$  cuando se mezcla con diferentes variables de  $\text{TiO}_2$  adicionado con hormigón. Los resultados permitieron tendencias y preocupaciones con este desarrollo de tecnología a ser dirigida y probada. No todos los materiales de  $\text{TiO}_2$  tienen capacidades fotocatalíticas para reducir los contaminantes de  $\text{NO}_x$ . El  $\text{TiO}_2$  en la fase anatasa que se fabricó específicamente para ser fotocatalítico. Fueron los únicos materiales de  $\text{TiO}_2$  probados que tuvieron la capacidad de disminuir significativamente Concentraciones de contaminantes de  $\text{NO}_x$  (Hanson, 2014).

En su investigación de fin de master Rodriguez (2015) concluye, que la adición de  $\text{TiO}_2$  a los materiales cementicos no afecta a su capacidad resistente. En cuanto a la resistencia a compresión, no solo no afecta, sino que se observa una ligera mejoría conforme se aumenta la adición de  $\text{TiO}_2$ , también demuestra que tienen propiedades autolimpiantes, por degradación de partículas orgánicas, inducidas por el efecto fotocatalítico de  $\text{TiO}_2$ . Así mismo le confiere propiedades humectantes que favorecen la limpieza de partículas sueltas con la propia agua de lluvia. Pero considera conveniente seguir investigando para tener un mejor conocimiento de las variables que controlan la fotocatalisis sobre los materiales a base de cemento y así poder incrementar el rendimiento de los efectos de autolimpieza, descontaminación y bactericida.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo General

- Proponer una alternativa que permita reducir la carbonatación del concreto mediante la depuración de CO<sub>2</sub> implementando dióxido de titanio como aditivo en la mezcla tradicional.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los materiales pétreos y cemento necesarios para la elaboración de mezclas de concreto.
- Efectuar pruebas de depuración de dióxido de carbono a las muestras de concreto con TiO<sub>2</sub> en diferentes concentraciones.
- Evaluar el efecto que provoca el TiO<sub>2</sub> en las características físico-mecánicas del concreto.
- Determinar el costo de elaboración de mezcla de concreto conteniendo TiO<sub>2</sub>

### 1.5.3 Hipótesis

- El uso de dióxido de titanio en mezclas de concreto reduce la absorción capilar de agua y la profundidad de carbonatación.
- La adición de TiO<sub>2</sub> al concreto, aumenta la vida de servicio de una estructura de concreto reforzado al reducir el coeficiente de carbonatación, inhibiendo la corrosión del acero de refuerzo.

## II. Capítulo II – Marco Teórico

### 2.1 Cemento Portland

En el sentido más amplio, la palabra cemento indica un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, la cual le permite unir fragmentos minerales entre sí para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas (Guzmán, 1986).

En el medio de la construcción, y más específicamente en la fabricación de concreto para estructuras, es reconocido que al mencionar la palabra cemento, implícitamente este se refiere al cemento Portland, el cual tiene la capacidad de fraguar y endurecer en presencia de agua ya que con ella presenta una reacción química. Este proceso se llama hidratación, por lo cual también son llamados cementos hidráulicos. (Guzmán, 1986).

#### 2.1.1 Cementos Nacionales

Los cementos se clasifican en tipos, según sus componentes, y en clases según su resistencia. El número que identifica a la clase corresponde a la resistencia mínima a la compresión, a veintiocho días, expresada en newtons por milímetro cuadrado ( $N/mm^2$ ). Se exceptúan los cementos para usos especiales en que dicha resistencia se refiere a los noventa días.

- Cemento Holcim Fuerte EcoPlanet: Holcim Fuerte EcoPlanet Tipo UG Uso General es un cemento hidráulico desarrollado con la más alta tecnología e innovación, cuenta con sello de calidad ICONTEC ISO 9001 (V.2008)-ISO14001 en el proceso de producción y sello ICONTEC que certifica el estricto cumplimiento de la normatividad vigente NTC 121.
- Cemento Holcim Industrial EcoPlanet: Cemento Industrial EcoPlanet especialmente diseñado para producir concretos más sostenibles y de alta durabilidad gracias a su excelente desarrollo de resistencias (tipo ART), menor calor de hidratación (tipo MCH) y alta resistencia a los sulfatos (tipo ARS).

- **Cemento Holcim Petrolero Fuerte:** El Cemento Petrolero es diseñado bajo los requerimientos de la norma Cumplimiento API Spec10A 25 Ed. y Cumplimiento norma ASTM C114 Grado HSR cumpliendo con los requisitos especificados como tiempo de bombeo, consistencia, agua libre y resistencia mecánica, para aplicación en pozos petroleros.
- **Tipo GU:** El cemento Pórtland tipo I adicionado de uso general tipo GU (General Use). Es adecuado para todas las aplicaciones donde las propiedades especiales de los otros tipos de cemento no sean necesarias. Su uso en concreto incluye pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tubería, productos de concreto prefabricado y otras aplicaciones donde se usa el cemento Pórtland tipo I
- **CANAL PLUS 5000:** es cemento finamente molido de color gris brillante, resultado de la trituración y calcinación de materiales de origen natural: caliza, arcilla, minerales de hierro y pequeñas cantidades de otras materias primas.

### 2.1.2 Composición química del cemento portland

Los principales componentes del cemento Portland son:

- **Silicato tricálcico (C3S).** Es el principal componente obtenido del clinker y es el responsable de la alta resistencia a las edades tempranas en el concreto.
- **Silicato dicálcico (C2S).** Es el componente metastable, de poca resistencia a edades tempranas, pero que va adquiriendo mayores valores a lo largo del tiempo hasta ser comparables con los del C3S.
- **Aluminato tricálcico (C3A).** Reacciona rápidamente al entrar en contacto con el agua, para retrasar el fraguado se le agrega yeso al cemento. No contribuye a mejorar la resistencia del concreto, así mismo las pastas conteniendo mayor cantidad de C3A son sensibles al ataque por sulfatos, sin embargo, durante la cocción del clinker actúa como fundente, posibilitando la combinación de la cal con la sílice.
- **Ferroaluminato tetracálcico (C4AF).** Sin la presencia de este durante el tiempo de cocción las reacciones se harían muy lentas, quizás no se

completarían, por lo que actúa como fundente, por otro lado, no contribuye de manera significativa a la resistencia, además del ser el responsable del color gris de la mezcla.

Los compuestos más significativos en el cemento portland son los silicatos de calcio, y representan el 75.0% del peso del cemento. Éstos al reaccionar con el agua producen hidróxido de calcio y silicatos de calcio hidratados. Los requerimientos de agua para ambos son similares, pero los hidróxidos producidos por el silicato tricálcico son mayores (más del doble) que el silicato dicálcico (Mehta, 1998). En la Tabla 1 se muestran los rangos de los principales óxidos que componen al cemento portland.

Tabla 1. Composición química del cemento portland

<b>Componente</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Número de muestras</b>
<b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>	18.4	21.02	24.50	284
<b>FeO<sub>3</sub> (%)</b>	0.16	2.85	5.78	284
<b>AlO<sub>3</sub> (%)</b>	3.10	5.04	7.56	284
<b>CaO (%)</b>	58.10	64.18	68.00	284
<b>MgO (%)</b>	0.02	1.67	7.10	285
<b>SO<sub>3</sub> (%)</b>	0	2.58	5.35	280
<b>Na<sub>2</sub>O (%)</b>	0	0.24	0.78	263
<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>	0.04	0.70	1.66	280
<b>Álcali equivalente (%)</b>	0.03	0.68	1.24	280
<b>Cloruro (%)</b>	0	0.016	0.047	15

Componente	Mínimo	Promedio	Máximo	Número de muestras
<b>Sr (mg/kg)</b>	0	532	19195	191
<b>Zn (mg/kg)</b>	0	22	321	191
<b>Ti (mg/kg)</b>	0	1059	4196	288
<b>P (mg/kg)</b>	0	389	2139	288
<b>Mn (mg/kg)</b>	0	315	2366	288

Fuente Hewlett (2003)

## 2.2 Agregados

Los agregados, también llamados áridos, son los materiales que están formados por pequeños granos, naturales o artificiales, generalmente inertes, de dimensiones y propiedades adecuadas para uso en obras de ingeniería.

Pueden ser fragmentos originados por acción mecánica generada por el hombre (procesos industriales) o por acción de la naturaleza (arenas y gravas de ríos). (Costa, 2005)

Los agregados finos y gruesos ocupan cerca del 60 al 75% del volumen del concreto e influyen en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las propiedades de la mezcla y economía del concreto. (Pérez, 2000)

### 2.2.1 Agregado Fino

Los agregados finos o arenas consisten en arenas naturales extraída de los ríos, lagos, depósitos volcánicos o arenas artificiales (arenas obtenidas de trituración). Estos agregados abarcan normalmente partículas entre 0.075 y 4.75mm.

La granulometría más deseable para el agregado fino depende del tipo de obra; la granulometría del agregado fino de acuerdo con la norma ASTM C 33, es generalmente satisfactoria para la mayoría de los concretos (Pérez, 2000).

### 2.2.2 Agregado Grueso

El que se usa con mayor frecuencia es la grava. El agregado grueso puede componerse de piedras trituradas, escorias de altos hornos y otras partículas duras similares, que varían en tamaño de 10mm a 75mm (Sotelo y Moreno, 2015).

## 2.3 Propiedades de los Agregados

Tabla 2. Propiedades de los agregados

Propiedad	Definición
<b>Granulometría</b>	La granulometría está definida como la distribución del tamaño de las partículas que constituyen una masa de agregados. Se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra de agregados en fracciones de igual tamaño. La medida de la cuantía de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como granulometría.
<b>Densidad relativa</b>	<p>El peso específico (densidad relativa) es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión).</p> <p>Se usa en ciertos cálculos para la proporción de mezclas y control (por ejemplo, en la determinación del volumen absoluto ocupado por el agregado).</p>
<b>Porcentaje de absorción</b>	Determinar la cantidad de agua que absorbe la arena para concreto, se expresa en porcentaje con respecto al peso de la arena.
<b>Contenido de humedad</b>	Determinar la cantidad de agua que posee una muestra de arena, con respecto al peso seco de la muestra. Esta prueba se lleva a cabo antes de hacer una mezcla con el fin de hacer los ajustes en la cantidad de agua de la mezcla.

<b>Propiedad</b>	<b>Definición</b>
<b>Peso volumétrico seco suelto y compacto</b>	<p>También llamado peso unitario o densidad de masa, es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado.</p> <p>Volumen ocupado por el agregado y los vacíos entre las partículas; el peso volumétrico aproximado del agregado usado en un concreto normal varía de 1200 kg/m<sup>3</sup> hasta 1760 kg/m<sup>3</sup>.</p>
<b>Sanidad</b>	<p>Es la capacidad de los agregados de absorber los diferentes cambios volumétricos que se producen por las diferentes temperaturas que se pueden presentar durante la elaboración del concreto (calor, congelación, deshielo).</p> <p>Los agregados que se empleen en el concreto deben de estar lo más sano posible para que puedan resistir los cambios externos e internos de temperatura sin sufrir algún daño o fractura por cambios volumétricos (tensión, compresión interna).</p>

Fuente Pérez (2000).

## 2.4 Concreto

El concreto es un material de construcción ampliamente utilizado que se caracteriza por su resistencia, durabilidad y versatilidad. El concreto es un compuesto formado por una mezcla de diferentes componentes que trabajan juntos para crear una masa sólida y resistente (DOMAT, 2023).

La composición básica del concreto consta de cuatro ingredientes principales: cemento, agregados, agua y aditivos. El cemento es el componente clave y actúa como un aglutinante que une los demás materiales. Los agregados se dividen en dos categorías: agregados finos, que consisten en arena, y agregados gruesos, como la grava. Estos agregados proporcionan resistencia estructural y llenan los espacios entre las partículas de cemento. El agua es necesaria para hidratar el

cemento y permitir que se forme una pasta que pueda fluir y unir los materiales. (DOMAT, 2023). Al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (Guzmán, 1986).

El concreto juega un papel fundamental como material de construcción en el mundo moderno debido a su importancia y beneficios significativos. Su resistencia excepcional y durabilidad lo convierten en una opción confiable para una amplia gama de aplicaciones constructivas. Desde la construcción de rascacielos imponentes hasta la creación de sólidas estructuras de infraestructura, el concreto ha demostrado su capacidad para soportar cargas pesadas y resistir las inclemencias del tiempo (DOMAT, 2023).

El principal beneficio del concreto es su larga vida y su poca necesidad de mantenimiento, además de que es el único material que al pasar del tiempo va aumentando su resistencia. (metropolitana, 2011).

## 2.5 Caracterización de los Materiales

Tabla 3. Caracterización de los materiales

ítem	Característica	Concepto
1	<b>Densidad</b>	Suele estar comprendida entre 2-3 g/cm <sup>3</sup> . En la densidad van a influir los minerales integrantes del material, así como el porcentaje del volumen de huecos.
2	<b>Durabilidad</b>	Es el periodo de uso sin deteriorarse y perder sus propiedades. La durabilidad es alta y pueden durar inalterables durante ciento de años. La estructura del material no se altera por la acción de los agentes exteriores (lluvia, vientos, heladas). Solo se modifica la capa más superficial.
3	<b>Dureza</b>	Es la resistencia al rozamiento, rayadura, penetración. La dureza de los materiales pétreos depende mucho de la dureza de los minerales que lo compongan y de la cohesión de la masa de dichos minerales. Para determinar la dureza de los materiales se utiliza la escala de Mohs.
4	<b>Resistencias mecánicas</b>	Tiene muy buena resistencia a compresión (contracción). Se cree que a mayor densidad mayor resistencia a compresión. En cambio, tiene baja resistencia a tracción (estiramiento) y baja resistencia a flexión (tracción y compresión en simultáneo).
5	<b>Propiedades térmicas</b>	Bajo coeficiente de conductividad térmica. Baja conducción del calor o del frío, sin embargo, cuando los materiales pétreos presentan humedad, su conductividad aumentan ligeramente. Las dilataciones o contracciones térmicas solo afectan a la capa superficial, mientras que la masa interna apenas sufre deformación por efecto de la temperatura.
6	<b>Propiedades eléctricas</b>	Los materiales pétreos conducen mal la electricidad, el coeficiente de conductividad eléctrica es muy bajo, aunque en presencia de humedad puede aumentar considerablemente.

ítem	Característica	Concepto
7	<b>Impermeabilidad</b>	<p>Dependiendo del tipo de material pétreo la permeabilidad al agua variará, A mayor cantidad de poros en el material mayor será la permeabilidad. Además, la circulación del agua a través de los poros va aumentando el tamaño de estos al desgastarlos por erosión. A veces el agua lleva partículas en suspensión o disueltas y pueden contribuir a cerrar parte de los poros y disminuir la permeabilidad. Si el material no tiene poros será impermeable.</p>
8	<b>Resistencia a la intemperie</b>	<p>Por ser un material natural, la resistencia a los agentes exteriores es muy alta. Como se sabe, hay multitud de contracciones con piedras o rocas desde hace cientos de años que se mantienen en muy buen estado. El agua de la lluvia, el viento, el oxígeno y los gases de combustión son los agentes que afectan a la durabilidad de los materiales pétreos. La parte que empieza a deteriorarse es la más superficial, por desgaste, desconchamiento etc. Y con los años puede ir profundizando hacia la masa interna del material, en cuanto a las heladas, cuanto mayor sea la porosidad, más expuesto estará el material a saturarse de agua, y mayor presión se producirá en caso de congelación del agua que contenga.</p>
9	<b>Elasticidad</b>	<p>En general, los materiales pétreos no son elásticos, aunque según sean granos o rocas, se pueden presentar ciertas deformaciones elásticas, las piedras son muy poco elásticas, es decir, no se deforman, sino que directamente se rompen, las muestras granulares si pueden tener deformación sobre todo en grandes agrupaciones.</p>
10	<b>Combustibilidad</b>	<p>La resistencia al fuego es variable, pero en general se puede considerar de tipo medio-bajo y menor si el material presenta cierta humedad.</p>

Fuente Escobar (2010).

## 2.6 Resistencia a la Compresión

Las mezclas de concreto se pueden diseñar de tal manera que tenga una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad que cumplan con los requerimientos de diseños de la estructura. La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras. La resistencia a la compresión se mide fracturando probetas cilíndricas de concreto en una máquina de ensayo de compresión (O'Connors, 2020).

La resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida por el área de la sección que resiste la carga y se reporta en unidades de libra-fuerza por pulgadas cuadradas (psi) en unidades corrientes utilizadas en EE. UU. o en megapascuales (MPa). Los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 2.500 psi (17MPa) para concreto residencial hasta 4.000 psi (28 MPa) para estructuras comerciales. Para determinadas aplicaciones se especifican resistencias superiores hasta de 10000 psi (70MPa) y más (O'Connors, 2020).

Los resultados de las pruebas de resistencia, a partir de cilindros moldeados, se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto o para estimar la resistencia del concreto en estructuras. De igual forma, para proyectar la ejecución de obras de construcción.

Algunas sugerencias para realizar pruebas de resistencias son:

Para cumplir con los requerimientos de resistencia de una especificación de trabajo, se aplican los siguientes 2 criterios de aceptación:

- El promedio de 3 ensayos consecutivos es igual o supera a la resistencia especificada,  $f'c$
- Ninguno de los ensayos de resistencia deberá arrojar un resultado inferior a  $f'c$  en más de 500 psi (3.45 MPa); ni ser superior en más de 0.10  $f'c$  cuando  $f'c$  sea mayor de 5.000 psi (35 MPa).

Las probetas cilíndricas para pruebas de aceptación deben tener un tamaño de 6 x 12 pulgadas (150 x 300 mm) ó 4 x 8 pulgadas 100 X 200 mm), cuando así se especifique. Para este caso se proyectará el uso de probetas con las dimensiones del segundo caso anteriormente mencionado.

## 2.7 Absorción Capilar del Concreto

La absorción capilar de agua en concreto está determinada por la sorptividad, la cual se define como la capacidad que éstos tienen para absorber agua a través de sus poros capilares, favorecido por las interconexiones en su interior, por lo tanto, es considerada como un indicativo de permeabilidad en concretos (AI, 2004).

Principio: El agua penetra en los materiales porosos por capilaridad, es decir, porque los poros tienden a “absorber” el agua. Cuando más finos los poros, más absorbentes son. Pero al ser finos, sólo puede entrar una cantidad relativamente escasa de agua. Por el contrario, poros más anchos, absorben menos, pero, al ser anchos, en ellos puede penetrar más agua (Cedrola, 2009).

La curva de absorción capilar se realiza colocando muestras en un contenedor que tiene un fondo de agua, de manera que sólo puedan absorber el agua por una de las caras (la inferior que está en contacto con el líquido). Las muestras se pesan a intervalos de tiempo crecientes y los resultados se grafican. De ellos se obtiene el coeficiente de absorción capilar.

Una vez que se llega al máximo de absorción la muestra se sumerge totalmente en agua y, a las 24 horas de inmersión total, se pesa. Luego de pesada la muestra, se deja al aire en una bandeja y se vuelve a pesar a intervalos crecientes. Los datos se grafican y se puede obtener la velocidad de secado y el contenido crítico de agua.

Cómo el agua es uno de los factores más relevantes en el deterioro de materiales, es importante conocer el comportamiento del material con relación al líquido. Sobre todo, cuando es preciso usar distintos materiales que deben estar en contacto, tal como la piedra y el mortero, pues si tienen comportamientos muy diferentes, un material se deteriorará mucho más rápido que el otro. Por lo tanto, es deseable que el comportamiento entre ellos sea lo más similar posible, de manera que sean

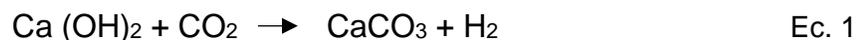
compatibles frente a este agente de deterioro. Las curvas de absorción capilar de agua y las de secado serán diferentes dependiendo de la porosidad total del material y del tipo de poros (diámetro del poro) y de la cantidad de poros de cada diámetro presente.

## 2.8 Carbonatación

La carbonatación es un proceso físico-químico complejo, va modificando lentamente la estructura del concreto, comprometiendo así sus propiedades físicas, por lo general el fenómeno avanza desde el exterior penetrando a través de los poros del concreto hasta despasivar al acero de refuerzo (Vidaud, 2012).

Es un proceso natural que se produce cuando el CO<sub>2</sub> presente en el ambiente reacciona con el agua o la humedad retenida, reduciendo su pH (Molins, 2022). La carbonatación en el concreto es debido al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en el ambiente en forma de gas anhídrido carbónico; máximo en zonas urbanas o en zonas con elevados niveles de contaminación. Con el tiempo, el hormigón comienza con el denominado proceso de carbonatación, aunque no nos damos cuenta de este fenómeno hasta que las consecuencias comienzan a ser visibles (Molins, 2022).

La carbonatación es un tipo de reacción ácida que puede causar un impacto negativo en la durabilidad del concreto (Vidaud, 2012). Se trata de un proceso lento, que resulta de una reacción química en la que el hidróxido de calcio (Ca (OH)<sub>2</sub>), presente en la pasta de cemento, reacciona con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera, y forma carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>); tal y como se representa a continuación en la Ecuación 1



El mecanismo de reacción ácida por el cual se produce la carbonatación genera un descenso del pH en el concreto, lo que provoca la destrucción de la capa pasivante, y con ello una aceleración en la corrosión del acero. Según los especialistas, se establece un valor crítico para el pH, alrededor de 9.5; por debajo del cual empieza

a darse la despasivación y ya no se le puede garantizar protección a la armadura dando puerta a la corrosión por carbonatación (Vidaud, 2012).

### 2.8.1 Efectos de la Carbonatación en el Concreto

Uno de los principales efectos negativos que resultan a partir de la carbonatación interna del concreto es la oxidación de las armaduras de acero de refuerzo. Este proceso ocasiona un aumento de su volumen, provocando tensiones internas en la estructura del concreto que se traduce en forma de fisuras y grietas hasta una inminente fractura o que el elemento falle por completo (Molins, 2022).

### 2.9 Titulación con Fenolftaleína

Las valoraciones o titulaciones son un método basado en la medición de la cantidad de un reactivo de concentración conocida, llamado sustancia patrón que se consume por una muestra incógnita llamada analito (LabsLand, 2022).

La Fenolftaleína es un compuesto químico inorgánico que se obtiene por reacción del fenol ( $C_6H_5OH$ ) y el anhídrido ftálico ( $C_8H_4O_3$ ), en presencia de ácido sulfúrico.

La Fenolftaleína se utiliza para realizar muchas pruebas y análisis, ya que su propiedad primaria es la de cambiar de color en función del pH del elemento al que se le aplica. Es muy útil para detectar la existencia de sangre en las escenas de un crimen y para detectar la profundidad de carbonatación del concreto en las construcciones.

La solución indicadora que se utiliza es una solución al 1.0% de fenolftaleína en alcohol; Se puede realizar por rociado o por aplicación con gotero. (Ycaza, 2011). El PH del concreto es del orden de 12.50 y es lo que provee al acero de un ambiente protegido de la oxidación y corrosión del acero. Conforme baja el pH del concreto debido a la carbonatación activada por el medio ambiente en que se encuentra la estructura el riesgo de oxidación del acero aumenta en presencia del oxígeno y la humedad.

## 2.10 Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>)

El dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) es una sustancia brillante de color blanco utilizada principalmente como colorante en una amplia gama de productos cotidianos. También posee una serie de cualidades menos conocidas que lo convierten en un agente extremadamente útil e importante en nuestra lucha contra el cambio climático y el cáncer de piel (Global Composites, 2022).

El dióxido de titanio es un compuesto inorgánico blanco que se ha utilizado durante aproximadamente 100 años en una vasta cantidad de productos diversos. Se depende de él por sus propiedades no tóxicas, no reactivas y luminosas, que aumentan de manera segura la blancura y luminosidad de muchos materiales (TDMA, 2021)

Es muy apreciado por su resplandeciente color blanco, su capacidad de dispersar la luz y su resistencia a los rayos ultravioleta, el TiO<sub>2</sub> es un ingrediente común que está presente en cientos de productos cotidianos, aporta beneficios notables para la economía y mejora la calidad de vida (Global Composites, 2022).

Más allá de pinturas, revestimientos catalíticos, plásticos, papel, productos farmacéuticos y protector solar, algunas aplicaciones menos conocidas incluyen envases y tintas comerciales para impresión. El TiO<sub>2</sub> también se encuentra en cosméticos, pastas dentales y alimentos. Debido a sus diversas propiedades, se ha descubierto que también es útil para muchas aplicaciones ecológicas diferentes. Como fotocatalizador, el TiO<sub>2</sub> se puede agregar a pinturas, cementos, ventanas y baldosas para descomponer contaminantes ambientales. Como nanomaterial, también se puede usar como un catalizador en sistemas de gases de escape para automóviles, camiones y plantas de energía, minimizando así su impacto ambiental (TDMA, 2021).

### 2.10.1 Estructura Electrónica y Cristalográfica del TiO<sub>2</sub>.

El dióxido de titanio TiO<sub>2</sub> estequiométrico es prácticamente un aislante debido a que tiene un ancho de banda de 3,2 eV. Sin embargo, por razones termodinámicas, su estructura es deficiente en oxígenos, lo cual origina estados localizados cerca de la banda de conducción dándole características de semiconductor. (Gutarra, 2004)

Las dos fases más frecuentes del dióxido de titanio son el rutilo y la anatasa. Ambos son tetragonales y contienen seis y doce átomos respectivamente por celda unitaria. Cada átomo de oxígeno está coordinado con tres átomos de titanio. En las dos fases, el octaedro TiO<sub>6</sub> está ligeramente distorsionado, con las distancias Ti-O apicales mayores que las distancias Ti-O ecuatoriales. La distorsión es ligeramente mayor en anatasa que en rutilo. En la Figura 1 se observa fases frecuentes del dióxido de titanio.

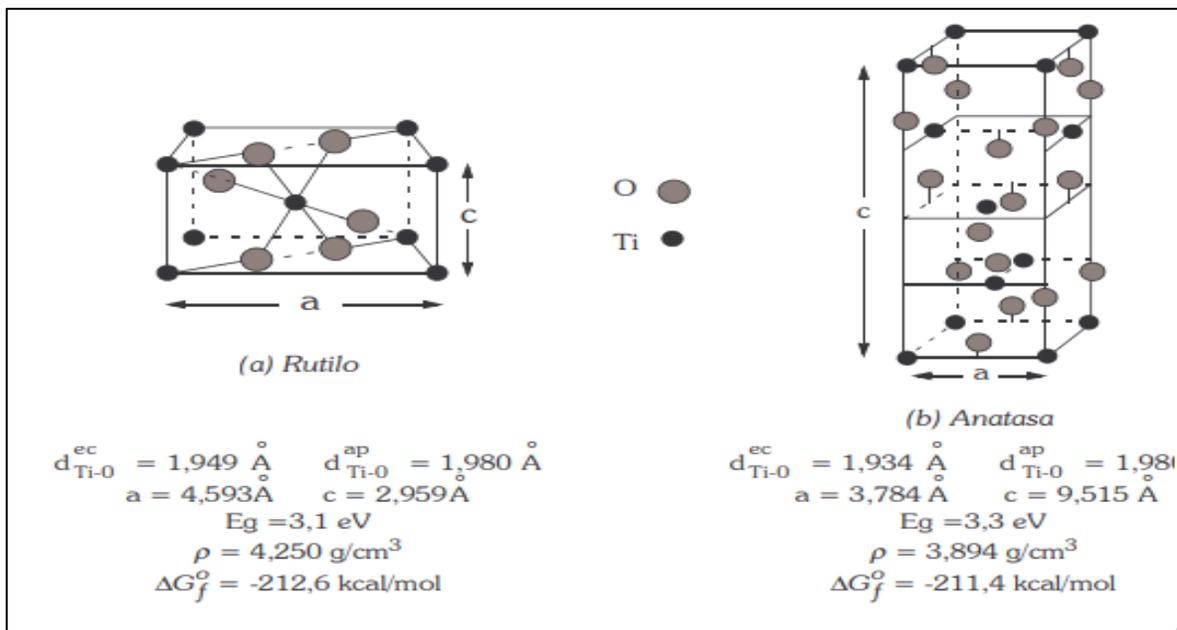


Figura 1. Celdas unitarias de (a) rutilo y (b) Anatasa (Gutarra, 2004)

Las estructuras cristalinas de las fases anatasa y rutilo pueden visualizarse alternativamente como cadenas de octaedros TiO<sub>6</sub> compartiendo dos lados para rutilo y cuatro para anatasa. Como se observa en la Figura 2, este ordenamiento espacial presenta canales entre los octaedros por los cuales podrían difundirse iones en un proceso de intercalación. Como se verá más adelante, la difusión de

iones de Li por estos canales está directamente relacionado con el electrocromismo del dióxido de titanio.

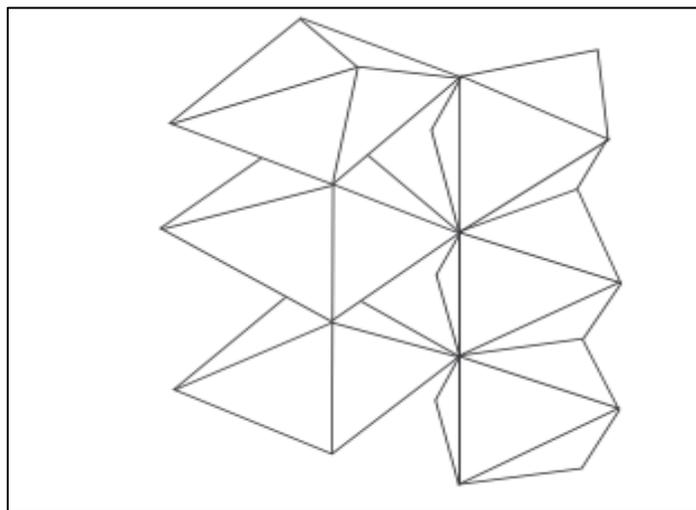


Figura 2. Estructura octaédrica del dióxido de titanio en fase rutilo (Gutarra, 2004)

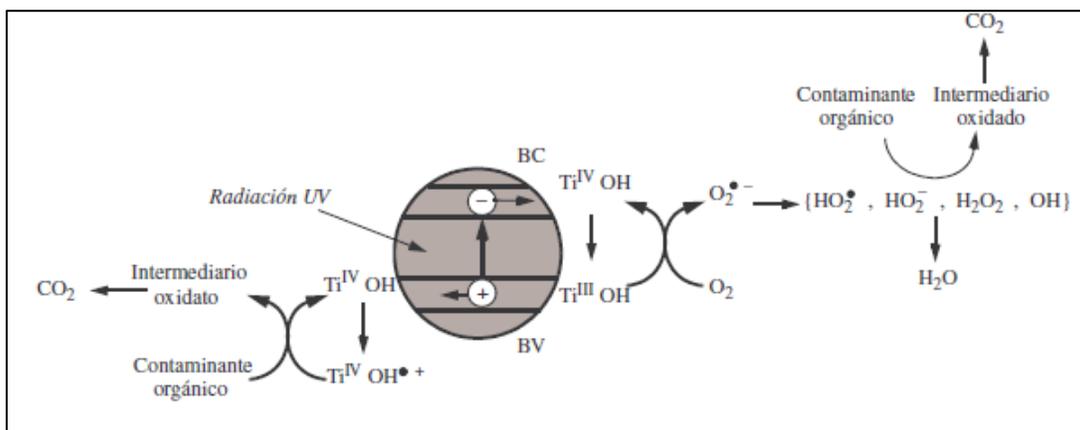


Figura 3. Proceso de mineralización de contaminantes orgánicos con nanopartículas de dióxido de titanio (Gonzalez y Tovar, 2004)

### 2.10.2 Propiedades Físicas del TiO<sub>2</sub>

El dióxido de titanio tiene una serie de características únicas que lo hacen ideal para muchas aplicaciones diferentes. Tiene un punto de fusión extremadamente alto de 1 843°C y un punto de ebullición de 2 972°C, por lo que ocurre naturalmente como un sólido, e incluso en forma de partículas, es insoluble en agua. El TiO<sub>2</sub> también es un aislante (TDMA, 2021).

El TiO<sub>2</sub> absorbe la luz UV. Esta propiedad hace que parezca blanco brillante bajo la luz, a diferencia de otros materiales blancos que pueden verse ligeramente amarillos. también tiene un índice de refracción muy alto (su capacidad para dispersar la luz), incluso más alto que el diamante. Esto lo convierte en una sustancia increíblemente brillante y un material ideal para uso en diseño estético.

Otra propiedad crucial del TiO<sub>2</sub> es que puede mostrar actividad fotocatalítica bajo luz UV. Esto lo hace efectivo para la purificación ambiental, para diferentes tipos de revestimientos protectores, esterilización y superficies antivaho, e incluso en terapia contra el cáncer (TDMA, 2021).

### 2.11 Concreto Fotocatalítico

El concreto fotocatalítico es una tecnología basada en partículas de dióxido de titanio que se puede aplicar al cemento blanco o gris sin afectar su desempeño. Se puede utilizar en cualquier tipo de concreto, con la única diferencia de que es capaz de eliminar sustancias adheridas a su superficie que puedan causar algún tipo de contaminación. Este proceso es conocido como fotocátalisis: cuando la luz solar llega a la superficie, los contaminantes más orgánicos y algunos inorgánicos son neutralizados y luego, gracias a la lluvia, la superficie es lavada removiendo las partículas contaminantes. Así las fachadas se mantienen limpias y no requieren la aplicación de químicos potencialmente dañinos, con el respectivo ahorro de costos por mantenimiento (Silva, 2020).

Este proceso es conocido como fotocátalisis, cuando la luz solar llega a la superficie, los contaminantes más orgánicos y algunos inorgánicos son neutralizados, se transforma las sustancias que ensucian los edificios o contaminan el aire, en

productos sin impacto alguno para el medio ambiente y la salud de las personas y luego, gracias a la lluvia, la superficie es lavada removiendo estas partículas. Así las fachadas se mantienen limpias y no requieren la aplicación de químicos potencialmente dañinos, con el respectivo ahorro de costos por mantenimiento (Silva, 2020).

El concreto fotocatalítico que además de purificar el aire, es capaz de eliminar sustancias adheridas a su superficie que puede causar algún tipo de contaminación o deterioro al propio concreto, así las fachadas se mantienen limpias y no requieren la aplicación de químicos potencialmente dañinos (Montoya y Manzanares, 2019).

### 2.11.1 Fotocatálisis

Es un fenómeno natural por el cual una sustancia acelera la velocidad de una reacción. El principio de la fotocatalisis se aplica desde hace más de 10 años a distintos materiales (vidrio, cerámica y, más recientemente, aglomerantes hidráulicos como el cemento) para conseguir este efecto “autolimpiante”. La reacción fotocatalítica que tiene lugar en la superficie del concreto (Silva, 2020).

Cuando se habla de fotocatalisis se hace referencia a una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato. En la química, la fotocatalisis es la aceleración de una fotorreacción en presencia de un catalizador (Chang, 2006).

La fotocatalisis implica la combinación de la fotoquímica con la catálisis. Ambos, luz y catalizador, son necesarios para alcanzar o acelerar una reacción química. Así, la fotocatalisis puede ser definida como la aceleración de una fotorreacción mediante un catalizador (Chang, 2006).

Durante el proceso fotocatalítico ocurren tanto reacciones de oxidación como de reducción, por lo que no sólo se puede aplicar la fotocatalisis a la oxidación de compuestos orgánicos, sino también a la reducción de iones inorgánicos y a la reducción de otros compuestos orgánicos (Chang, 2006).

La fotocatalisis es la propiedad de ciertos materiales de promover reacciones químicas en presencia de luz ultravioleta, que de otro modo serían imposibles o muy lentas. (Gutarra, 2004)

El efecto fotocatalítico del dióxido de titanio se puso en evidencia desde 1972 cuando Honda y Fujishima descubrieron que, expuesto al sol, el dióxido de titanio podía producir la disociación fotocatalítica del agua. Este efecto se basa en la absorción de la pequeña fracción de radiación ultravioleta contenida en el espectro electromagnético solar (4.0%), para provocar una reacción de oxidación. (Gutarra, 2004)

### III. Capítulo III – Caracterización: Métodos y Materiales

#### 3.1 Cemento

El cemento que se empleó en la elaboración de los especímenes fue cemento portland ordinario “CPO” de la marca Canal, que cumple con la norma técnica nicaragüense NTON 12 006-11.

Se le realizaron pruebas al cemento con el fin de caracterizar los componentes del concreto, para ello a las muestras de cemento se le realizaron los siguientes ensayos.

- Consistencia normal
- Tiempos de fraguado
- Gravedad específica

$$\text{Consistencia normal: } \frac{W_{\text{agua}}}{W_{\text{cemento}}} \times 100 \quad \text{Ec. 2}$$

$$\text{CN} = \frac{192.4 \text{ ml}}{650 \text{ gr}} \times 100$$

$$\text{CN} = 29.6\%$$

Los resultados se muestran en Tabla 4.

Tabla 4. Ensaye de consistencia Normal

Ensayo No	% de agua	Temperatura del agua °C	Penetración (mm)
1	29	21.3	7
2	230	21.3	11
3	29.6	21.2	10

Fuente Propia.

Tiempos de Fraguado:

- Consistencia normal: 29.6%
- Volumen de agua: 192.4ml

Tabla 5. Tiempos de fraguado para pasta de cemento sin aditivo

Lectura	Tiempo transcurrido (min)	Penetración (mm)
1	0	
2	30	40
3	45	40
4	60	40
5	75	39
6	90	39
7	105	38
8	120	38
9	135	37
10	150	35
11	165	27
12	180	17
13	195	8
14	210	4
15	225	2
16	240	1
17	255	1
18	270	0

Fuente Propia.

Tiempo de fraguado inicial: 60 minutos

Tiempo de fraguado Final: 4 horas y 30 minutos

$$\text{Peso Específico: } \frac{\text{masa del cemento}}{\text{vol. final} - \text{vol. inicial}}$$

Ec. 3

$$\text{Peso Específico: } \frac{64\text{gr}}{22.63\text{cm}^3 - 0.1\text{cm}^3}$$

Peso específico: 2.84 gr/cm<sup>3</sup>

Tabla 6. Tiempos de fraguado para pasta de cemento con 0.5% de concentración de dióxido de titanio

Lectura	Tiempo transcurrido (min)	Penetración (mm)
1	0	0
2	30	40
3	45	40
4	60	40
5	75	40
6	90	40
7	105	40
8	120	40
9	135	39
10	150	39
11	165	39
12	180	38
13	195	38
14	210	32
15	225	23
16	240	14
17	255	7
18	270	3
19	285	0

Fuente Propia.

Tabla 7. Tiempos de fraguado para pasta de cemento con 1.5% de concentración de dióxido de titanio

<b>Lectura</b>	<b>Tiempo transcurrido (min)</b>	<b>Penetración (mm)</b>
1	0	0
2	30	40
3	45	40
4	60	40
5	75	40
6	90	40
7	105	40
8	120	40
9	135	39
10	150	39
11	165	39
12	180	39
13	195	39
14	210	38
15	225	36
16	240	28
17	255	19
18	270	10
19	285	6
20	300	3
21	315	0
22	330	0

Fuente Propia.

Tabla 8. Tiempos de fraguado para pasta de cemento con 2.5% de concentración de dióxido de titanio

<b>Lectura</b>	<b>Tiempo transcurrido (min)</b>	<b>Penetración (mm)</b>
1	0	0
2	30	40
3	45	40
4	60	40
5	75	40
6	90	40
7	105	40
8	120	40
9	135	39
10	150	39
11	165	39
12	180	39
13	195	39
14	210	38
15	225	36
16	240	28
17	255	19
18	270	10
19	285	6
20	300	3
21	315	0

Fuente Propia.

### 3.2 Agregados Pétreos

Para la obtención de las muestras de agregados finos y gruesos se realizó su caracterización según la norma ASTM D 75 (ASTM, 2015).

La arena utilizada en esta experimentación fue extraída del cerro Motastepe, el tamaño máximo usado de la grava fue 3/4". La caracterización de los agregados se realizó de acuerdo a las normas ASTM C 33 (Análisis granulométrico de la grava), ASTM C 125, ASTM C 70, C 127 y C 566 (absorción, densidad relativa y contenido de humedad) y ASTM C 29 (peso volumétrico seco suelto y compacto).

Tabla 9. Peso de muestras de agregado fino

<b>Agregado fino</b>			
<b>Peso volumétrico seco suelto (gr)</b>		<b>Peso volumétrico seco compacto (gr)</b>	
<b>M1</b>	1757.66	<b>M1</b>	2006.87
<b>M2</b>	1838.86	<b>M2</b>	2017.14
<b>M3</b>	1947.83	<b>M3</b>	1876.85
<b>M4</b>	1157.70	<b>M4</b>	1372.05
$\Sigma$	6702.05	$\Sigma$	7272.91

Fuente Propia.

$$PVS(S, C) = \frac{(\text{peso arena} + \text{peso cilindro}) - (\text{peso cilindro})}{(\text{Volumen cilindro})} \quad \text{Ec. 4}$$

$$PVSS = \frac{(6705.5\text{gr} + 2204.72\text{gr}) - (2204.72 \text{ gr})}{4.495 \times 10^{-3} \text{m}^3} = 1491 \text{ kg/m}^3$$

$$PVSC = \frac{(7272.91\text{gr} + 2204.72\text{gr}) - (2204.72 \text{ gr})}{4.495 \times 10^{-3} \text{m}^3} = 1618 \text{ kg/m}^3$$

$$\% \text{Absorción Arena} = \frac{1583.1 \text{ kg/m}^3 - 1491 \text{ kg/m}^3}{1491 \text{ kg/m}^3} \times 100$$

$$\% \text{Absorción Arena} = 6.18\%$$

$$M_f = \frac{0 + 13 + 42 + 69 + 85 + 92}{100} = \frac{301}{100}$$

$$M_f = 3.01$$

Tabla 10. Peso de muestras de agregado grueso

<b>Agregado grueso</b>			
<b>Peso volumétrico seco suelto (gr)</b>		<b>Peso volumétrico seco compacto (gr)</b>	
<b>M1</b>	1830.16	<b>M1</b>	2021.43
<b>M2</b>	1877.43	<b>M2</b>	2073.65
<b>M3</b>	2007.29	<b>M3</b>	2217.07
<b>M4</b>	263.47	<b>M4</b>	291.01
$\Sigma$	5978.35	$\Sigma$	6603.16

Fuente Propia.

$$PVSS = \frac{(5978.35\text{gr} + 2204.72\text{gr}) - (2204.72\text{ gr})}{4.495 \times 10^{-3} \text{m}^3} = 1330 \text{ kg/m}^3$$

$$PVSC = \frac{(6603.16\text{gr} + 2204.72\text{gr}) - (2204.72\text{ gr})}{4.495 \times 10^{-3} \text{m}^3} = 1469 \text{ kg/m}^3$$

$$\% \text{Absorción Grava} = \frac{1351.5 \text{kg/m}^3 - 1330 \text{kg/m}^3}{1330 \text{kg/m}^3} \times 100$$

$$\% \text{Absorción Grava} = 1.62\%$$

En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos para la caracterización de materiales realizada a partir del procedimiento de cálculo.

Tabla 11. Caracterización de los agregados pétreos

<b>Agregado</b>	<b>P.V.S.S (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>P.V.S.C (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorción (%)</b>	<b>Densidad Relativa</b>	<b>Módulo de Finura</b>
<b>Arena</b>	1491	1618	6.18	2.82	3.01
<b>Grava</b>	1430	1549	1.62	2.88	

Fuente Propia.

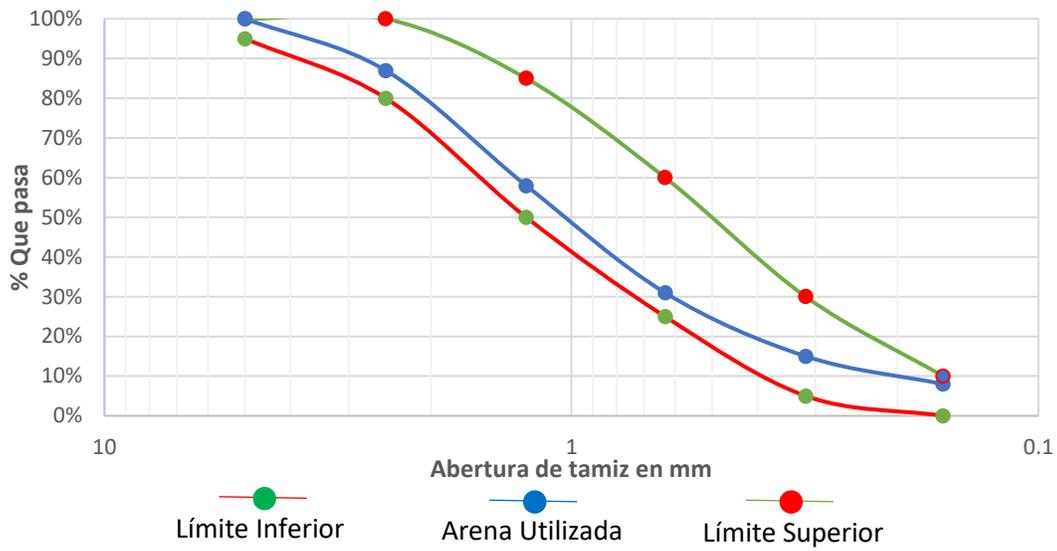


Figura 4. Curva granulométrica del agregado fino (Fuente: Propia).

Tabla 12. Tabla granulométrica agregado grueso fino

Tamiz	mm	%Que pasa	%Retenido	%retenido acumulado
N° 4	5	100	0	0
N° 8	2.5	87	13	13
N° 16	1.25	58	29	42
N° 30	0.63	31	27	69
N° 60	0.315	15	16	85
N° 100	0.16	8	7	92
Bandeja			8	

Fuente Propia.

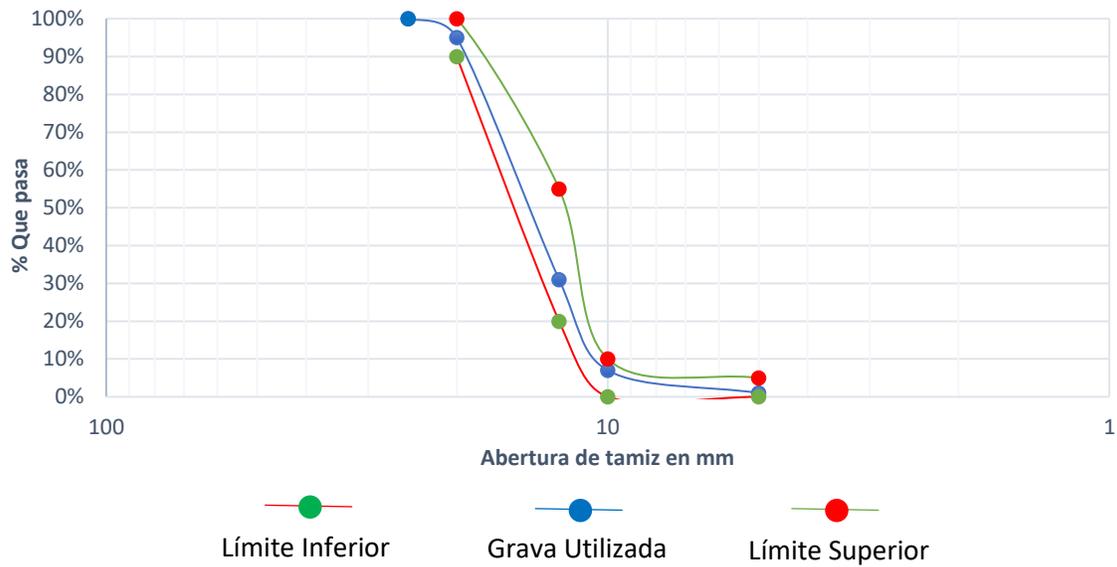


Figura 5. Curva granulométrica del agregado grueso (Fuente: Propia).

Tabla 13. Tabla granulométrica agregado grueso 3/4"

Tamiz	abertura en mm	% que pasa	menor	Mayor
1	25	100		100
3/4	20	95	90	100
1/2	12.5	31	20	55
3/8	10	7	0	10
N°4	5	1	0	5

Fuente Propia.

### 3.3 Mezcla de Concreto

#### 3.3.1 Diseño de Experimento

La cantidad de especímenes realizados para llevar a cabo la fase experimental se determinó con base en las diferentes pruebas a las cuales iban a ser sometidos y a las diferentes concentraciones de  $\text{TiO}_2$  adicionadas a la mezcla convencional (Tabla 14).

Tabla 14. Cantidad de especímenes por cada prueba y concentración

Pruebas	0%	0.5%	1.5%	2.0%
Prueba de compresión	6	6	6	6
Carbonatación Acelerada	3	3	3	3
Prueba de Absorción	3	3	3	3

Fuente Propia.

Las dimensiones de estos cilindros fueron de 100 mm de diámetro x 200 mm de largo. Se elaboró la cantidad de 48 especímenes, 24 para pruebas de resistencia a la compresión (6 por cada mezcla), 12 para la prueba de carbonatación acelerada y 12 para la prueba de absorción (3 por cada mezcla).



Figura 6. Probetas elaboradas para los ensayos pertinentes (Fuente propia).

### 3.3.2 Diseño y elaboración de mezcla para la elaboración de especímenes

Se diseñó un tipo de concreto con una relación a/c= 0.60 que representa el concreto de uso ordinario. El diseño de esta mezcla se elaboró con base en el método de diseño volúmenes absoluto del ACI (Kosmatka, 2004). Sin embargo, debido a que ensayos preliminares no se alcanzó la resistencia mecánica esperada, por cual, se hizo un ajuste al diseño quedando como se muestra en la Tabla 15.

$f'c$  = Resistencia a la compresión a los 28 días = 210kg/cm<sup>2</sup>  $f'c' = 294$  Kg/cm<sup>2</sup>

R = Revenimiento = 3"

Porcentaje de aire atrapado = 2.5% (Tomado de la Tabla 6.6.3 del ACI)

Volumen unitario de agua = 216lt/m<sup>3</sup> (Tomado de la Tabla 6.6.3 del ACI)

R a/c = Relación agua cemento = 0.59  $\approx$  0.6 (Tomado de la Tabla 6.3.4 del ACI)

Peso específico del agregado grueso = 2.88gr/cm<sup>3</sup> (Calculado a partir de la caracterización de materiales)

Peso específico del agregado fino = 2.82gr/cm<sup>3</sup> (Calculado a partir de la caracterización de materiales)

$$Wc = \text{Peso de cemento} = \frac{\text{Vol Unitario de Agua}}{R a/c} \quad \text{Ec. 5}$$

$$Wc = \frac{216}{0.56} = 385.71 \text{ Kg}$$

$$Vc = \text{volumen de cemento} = \frac{\text{Peso del Cemento}}{\text{Peso Seco del Cemento}} \quad \text{Ec. 6}$$

$$Vc = \frac{385.71 \text{ Kg}}{2.84 \times 1000} = 0.135 \text{ m}^3$$

Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto = 0.60m<sup>3</sup>  
(Interpolado desde la tabla 6.3.6 del ACI)

$Wg = \text{Peso de agregado grueso} = 1469 \text{ kg/m}^3 \times 0.60 \text{ m}^3 = 881.4 \text{ Kg}$

$Vg = \text{volumen de agregado grueso} = \frac{881.4 \text{ Kg}}{2888.94} = 0.305 \text{ m}^3$

$Va = \text{Volumen de agregado fino} = 1 \text{ m}^3 - 0.135 \text{ m}^3 - 0.216 \text{ m}^3 - 0.025 \text{ m}^3 - 0.305 \text{ m}^3$   
 $= 0.319 \text{ m}^3$

$$W_a = 0.319\text{m}^3 \times 2.82\text{gr/cm}^3 \times 1000 = 899.58\text{kg}$$

Tabla 15. Proporciones para la elaboración de 1.0m<sup>3</sup> de concreto

<b>Materiales</b>	<b>Cantidades</b>
<b>Agregado grueso (kg)</b>	881.40
<b>Agregado fino (kg)</b>	899.58
<b>Cemento (kg)</b>	385.71
<b>Agua (kg)</b>	216.0

Fuente Propia.

La elaboración de la mezcla, se realizó de forma manual, usando una carretilla Con una capacidad de 6.0ft<sup>3</sup> y un par de palas comunes. Para la compactación uniforme de los cilindros se utilizó una varilla de punta redonda aplicando 15 golpes a los alrededores de los cilindros y 10 golpes distribuidos en el centro. La mezcla se caracterizó en estado fresco mediante pruebas de revenimiento y temperatura de la misma.

Temperatura = 24.6 °C

Revenimiento = 8cm

### 3.3.3 Propiedades del Concreto Endurecido

#### 3.3.3.1 Resistencia a la Compresión Axial

La resistencia a la compresión axial de los especímenes de concreto se determinó a las edades de 30 y 60 días, esta prueba fue realizada empleando una prensa hidráulica ELE Accu-Tek250 con capacidad de 10,000 psi, de acuerdo con el procedimiento de ensaye descrito en la norma ASTM C39 (ASTM, 2015) ubicada en el laboratorio UNI RUPAP. Se ensayaron 24 cilindros, 6 para cada concentración de  $TiO_2$  y 6 testigos.



Figura 7. Ensayes de la prueba a compresión Axial (Fuente: Propia).

### 3.3.3.2 Absorción Capilar

Para la obtención de la curva de absorción capilar se colocaron muestras de concreto en un contenedor que tiene un fondo de agua, de manera que sólo puedan absorber el agua por una de las caras (la inferior que está en contacto con el líquido). Las muestras se pesaron a intervalos de tiempo crecientes y los resultados se graficaron. De ellos se obtuvo el coeficiente de absorción capilar.

Con los datos graficados se obtuvo la velocidad de secado y el contenido crítico de agua.

Los materiales utilizados en el ensayo fueron:

- Cuba plástica, de fondo plano, con tapa, de unos 60 x 30 x 15 cm
- Muestras cilíndricas (10 x 10cm) de cada mezcla a ensayar
- Balanza (Sensibilidad 0,01 g)
- Agua
- Varillas de vidrio
- Cronómetro y reloj
- Calculadora

Las pruebas de sorptividad se realizaron en especímenes con 60 días de edad, el procedimiento para determinar la absorción capilar se hizo según (Hall, 1989). Los especímenes fueron de 100 mm de diámetro x 100 mm de altura, fueron secados al horno durante 48 horas a una temperatura de 105 °C, posteriormente se dejaron enfriar y se les aplicó resina epóxica en la cara curva, dejando libre una cara transversal para la prueba de absorción, se procedió a dejarlas durante un periodo de 24 horas a temperatura ambiente para proporcionar el secado de la resina, luego de esto se realizó la prueba.

Se colocaron las muestras en un recipiente de plástico con soportes en la cara inferior para que los especímenes no tuvieran contacto con el fondo permitiendo así una libre absorción del agua. El nivel de agua fue mantenido entre 2 mm y 5 mm por encima de la cara inferior de la muestra. Las lecturas del peso de cada muestra se realizaron a los 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 240, 480, 1440 y 2880 minutos, para

proceder a pesar las muestras se retiraban del recipiente y con una toalla húmeda se procedía a secar el exceso de agua que tenía sobre su superficie, posteriormente pesándolos en una báscula de precisión de 0.01g.

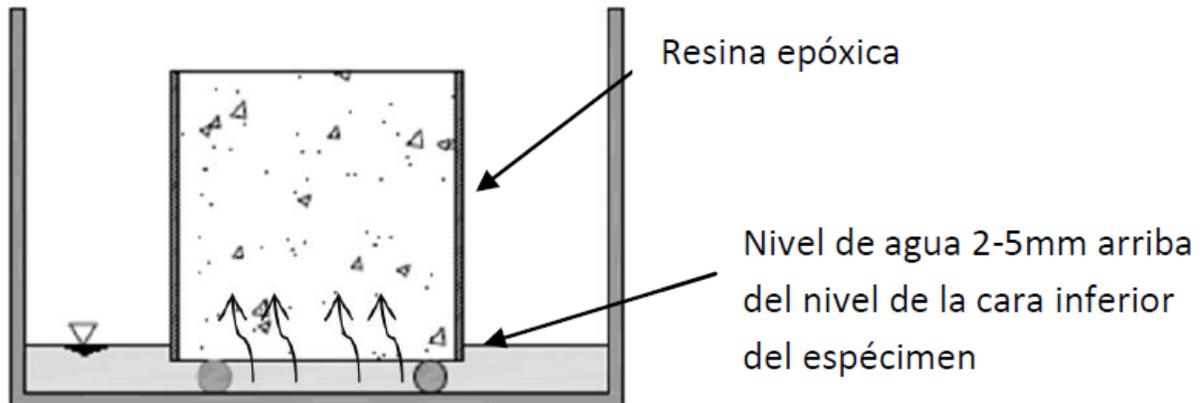


Figura 8. Esquema de absorción de agua por capilaridad (Hernández, 2012)

La sorptividad se calculó con la ecuación:

$$S = \frac{i}{t^2} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

$i$  = incremento en peso  $\text{g/mm}^2$  a partir del contacto con el agua.

$t$  = tiempo en minutos (tiempo en el cual se determinó el peso del espécimen).

$s$  = sorptividad medida en  $\text{mm/min}^{0.5}$

### 3.3.3.3 Carbonatación Acelerada

La prueba de carbonatación acelerada se llevó a cabo en 12 especímenes de concreto como se especifica en la Tabla 14 con 120 días de edad, los cuales fueron cortados a la mitad y colocados en una caja elaborada a base de láminas de acrílico con juntas selladas con silicona industrial. De este modo se evitó algún tipo de fuga, haciendo del espacio interior completamente hermético como se aprecia en la Figura 9.



Figura 9. Espacio hermético y controlado donde se llevó a cabo la prueba de carbonatación acelerada (Fuente: Propia).

Los especímenes quedaron única y completamente expuestos al dióxido de carbono durante un período de 30 días, el cual se le estuvo suministrando de manera controlada mediante una manguera por un pequeño orificio, el cual fue sellado posterior a introducir la manguera que trasladaba el CO<sub>2</sub> desde el tanque de suministro hacia la caja. Para medir la concentración de CO<sub>2</sub> se empleó un sensor de la marca Hilitand, precisión de 1ppm y rango de 400-5000ppm. La concentración usada de CO<sub>2</sub> fue de 5000 ppm (Figura 10).



Figura 10. Detector de Dióxido de Carbono LCD (Fuente: Amazon).

El suministro de CO<sub>2</sub> fue controlado mediante un manómetro analógico con rango de 0-28000Kpa y 0-4000psi (Figura 11).



Figura 11. Manómetro utilizado para la regulación de dióxido de carbono (Fuente: Propia).

Se empleó el método CPC18 RILEM (RILEM, 1988) para determinar el avance del frente de carbonatación en los especímenes, que consiste en rociar fenolftaleína al 1.0% en alcohol (indicador) sobre la superficie de la muestra. Para ello se realizó un corte transversalmente al espécimen empleando cincel, para, posteriormente aplicarle fenolftaleína, lográndose apreciar instantáneamente el avance del frente de carbonatación.



Figura 12. Corte transversal realizado para las probetas expuestas a dióxido de carbono (Fuente: Propia).

Se pudo observar que el área carbonatada permaneció sin cambio de color, por el contrario, el área libre de contaminación cambió a un color rosado brillante, esto debido a que posee un pH mayor a 9.0; Este cambio apreciable muestra cuán profundamente progresó la carbonatación en el interior del concreto.



Figura 13. Medición del frente de carbonatación (Fuente: Propia).

## IV. Capítulo IV – Pruebas Realizadas: Resultados y Evaluación

### 4.1 Fraguado

Antes de realizar las mezclas de concreto se evaluó la reacción química entre el Dióxido de titanio con el cemento, de cómo afecta su fraguado. Se elaboraron 4 mezclas de pastas de cemento, un control y tres con diferentes concentraciones de  $\text{TiO}_2$  (0.5%, 1.5% y 2.5%). Se observó que el tiempo de fraguado inicial de las pastas que contenían dióxido de Titanio, en relación con su concentración, aumentó con respecto al control, esto se puede apreciar con mayor claridad en la Tabla 5, 6, 7 y 8; En donde se muestra el resumen de lecturas tomadas para las diferentes mezclas.

### 4.2 Resistencia a la Compresión Axial

En la Tabla 16 se presentan los datos obtenidos de los ensayos de la resistencia a la compresión de todas las mezclas a los 28 días de edad. Destacando el valor promedio para cada mezcla, su desviación estándar y el error.

Tabla 16. Resumen de concretos a los 28 días expuestos a compresión

Concentración de $\text{TiO}_2$	Lectura (lb/pulg <sup>2</sup> )			Promedio	Desviación Estándar	Error
	A-01	A-02	A-03			
0.0%	2753.47	2740.34	2760.07	2751.30	10.04	0.37
Concentración de $\text{TiO}_2$	Lectura (kg/cm <sup>2</sup> )			Promedio	Desviación Estándar	Error
	B-01	B-02	B-03			
0.5%	2636.87	2578.50	2592.47	2602.62	30.48	1.17
Concentración de $\text{TiO}_2$	Lectura (kg/cm <sup>2</sup> )			Promedio	Desviación Estándar	Error
	C-01	C-02	C-03			
1.5%	2530.04	2512.79	2505.44	2516.09	12.63	0.50
Concentración de $\text{TiO}_2$	Lectura (kg/cm <sup>2</sup> )			Promedio	Desviación Estándar	Error
	D-01	D-02	D-03			
2.5%	2258.90	2298.39	2243.36	2266.88	28.37	1.25

Fuente Propia.

En la Figura 1 se muestran los resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial de los concretos con relación  $a/c=0.60$ , curado en húmedo por 7 días a la edad de 28 días, de la mezcla control. Se observa que el valor de los tres especímenes es similar.

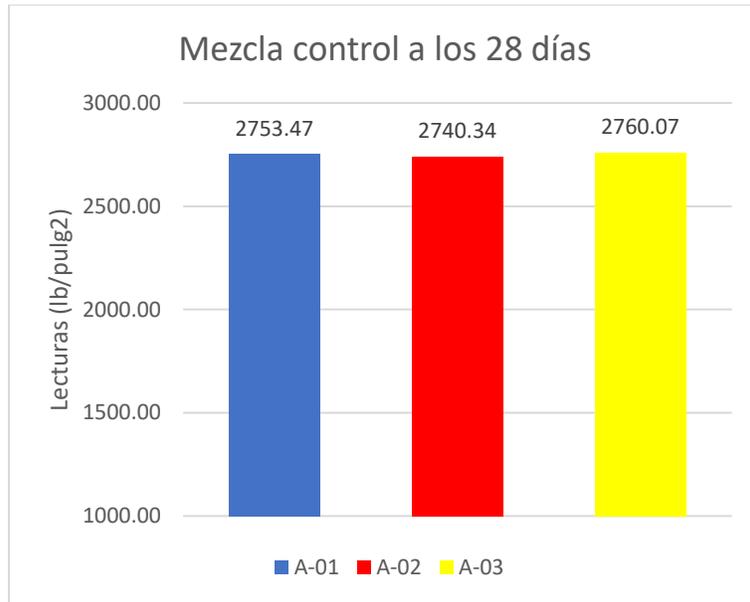


Figura 14. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto de control,  $a/c=0.60$  a los 28 días (Fuente: Propia).

En la Figura 15 se muestran los resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial de los concretos con relación  $a/c=0.60$ , curado en húmedo por 7 días a la edad de 28 días, de la mezcla con 0.5% de  $TiO_2$  añadido. Se observa que el valor de los tres especímenes es similar.

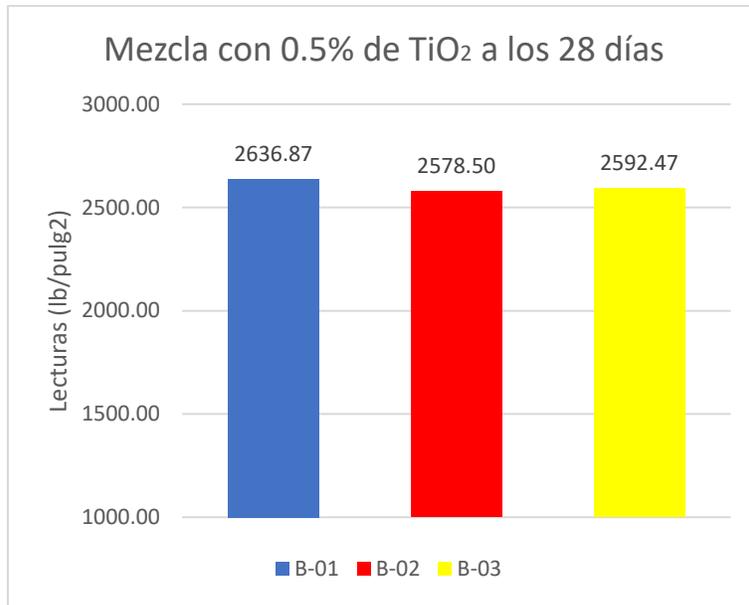


Figura 15. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 0.5% de concentración, a/c= 0.60 a los 28 días (Fuente: Propia).

En la Figura 16 se muestran los resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial de los concretos con relación a/c=0.60, curado en húmedo por 7 días a la edad de 28 días, de la mezcla con 1.5% de TiO<sub>2</sub> añadido. Se observa que el valor de los tres especímenes es similar.

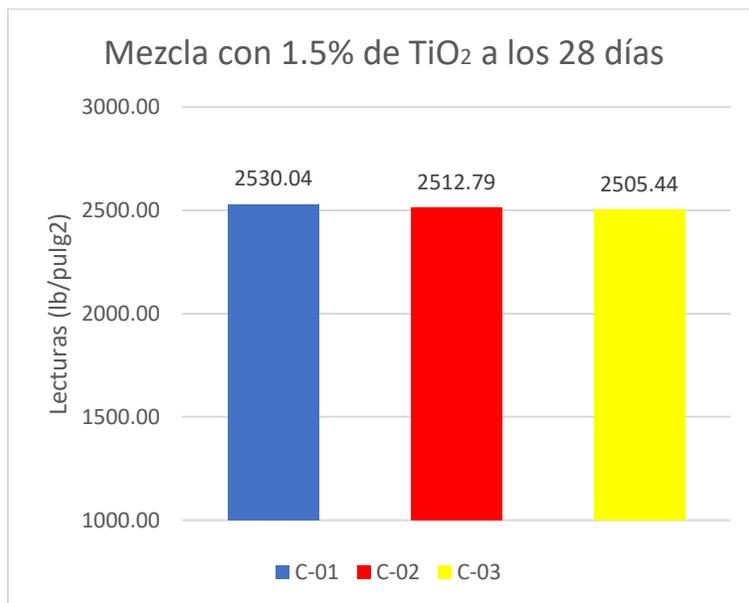


Figura 16. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 1.5% de concentración, a/c= 0.60 a los 28 días (Fuente: Propia).

En la Figura 17 se muestran los resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial de los concretos con relación  $a/c=0.60$ , curado en húmedo por 7 días a la edad de 28 días, de la mezcla con 2.5% de  $TiO_2$  añadido. Se observa que el valor de los tres especímenes es similar.

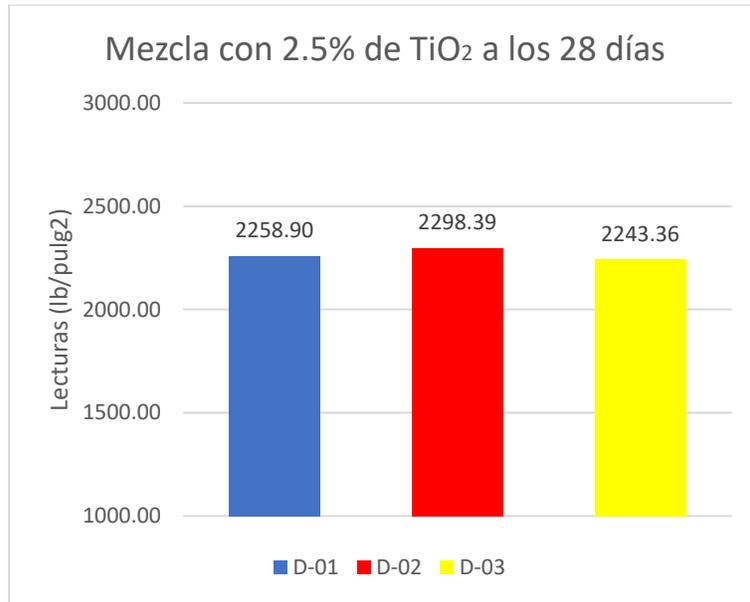


Figura 17. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 2.5% de concentración,  $a/c= 0.60$  a los 28 días (Fuente: Propia).

En la Figura 18 se muestra el valor promedio de la resistencia a la compresión axial de los concretos con relación  $a/c=0.60$  a la edad de 28 días. Se observa que el mayor valor de las cuatro mezclas fue el control. Las mezclas que contienen dióxido de titanio en diferentes concentraciones (0.5%, 1.5% y 2.5%) presentaron menores valores de resistencia con respecto a la muestra control en proporciones del 5.40% (0.5%  $TiO_2$ ), 8.54% (1.5%  $TiO_2$ ) y 17.60% (2.5%  $TiO_2$ ). Se puede considerar que la mezcla hasta con 1.5% de dióxido de titanio la resistencia a la compresión es similar a la del control, estadísticamente la diferencia no es significativa.

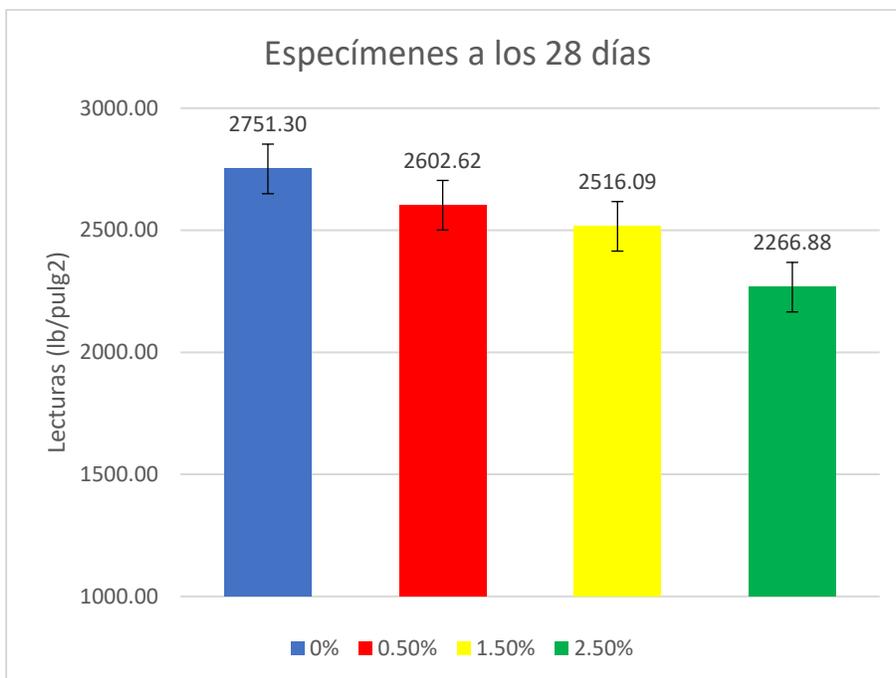


Figura 18. Comparativa de resistencia a la compresión para especímenes de concreto, a/c= 0.60 a los 28 días. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia).

En la Tabla 17 se presenta el resumen de los datos obtenidos de los ensayos de la resistencia a la compresión de todas las mezclas a los 60 días de edad. Destacando el valor promedio para cada mezcla, su desviación estándar y el error.

Tabla 17. Resumen de concretos a los 60 días expuestos a compresión

Concentración de TiO <sub>2</sub>	Lectura (lb/pulg <sup>2</sup> )			Promedio	Desviación Estándar	Error
	A-01	A-02	A-03			
0.0%	2982.77	2880.79	2904.62	2922.73	53.34	1.83
Concentración de TiO <sub>2</sub>	Lectura (kg/cm <sup>2</sup> )			Promedio	Desviación Estándar	Error
	B-01	B-02	B-03			
0.5%	2826.78	2785.62	2801.09	2804.50	20.79	0.74
Concentración de TiO <sub>2</sub>	Lectura (kg/cm <sup>2</sup> )			Promedio	Desviación Estándar	Error
	C-01	C-02	C-03			
1.5%	2694.21	2759.22	2669.66	2707.70	46.28	1.71
Concentración de TiO <sub>2</sub>	Lectura (kg/cm <sup>2</sup> )			Promedio	Desviación Estándar	Error
	D-01	D-02	D-03			
2.5%	2448.72	2388.63	2417.01	2418.12	30.06	1.24

Fuente Propia.

A pesar de la pérdida de resistencia a la compresión en las mezclas con dióxido de titanio el porcentaje reducido es relativamente bajo se podría decir que su efecto no fue muy perjudicial y puede ser compensado con la ventaja que puede presentar en las propiedades químicas del espécimen como lo es la disminución de porosidad.

En la Figura 19 se muestran los resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial de los concretos con relación  $a/c=0.60$ , curado en húmedo por 7 días a la edad de 60 días, de la mezcla control. Se observa que el valor de los tres especímenes es similar.

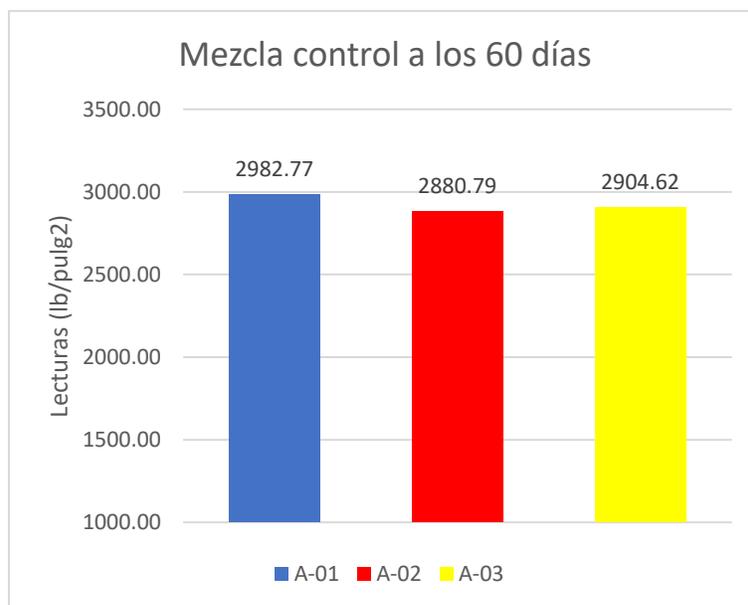


Figura 19. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto de control,  $a/c=0.60$  a los 60 días (Fuente: Propia).

En la Figura 20 se muestran los resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial de los concretos con relación  $a/c=0.60$ , curado en húmedo por 7 días a la edad de 60 días, de la mezcla con 0.5% de  $TiO_2$  añadido. Se observa que el valor de los tres especímenes es similar.

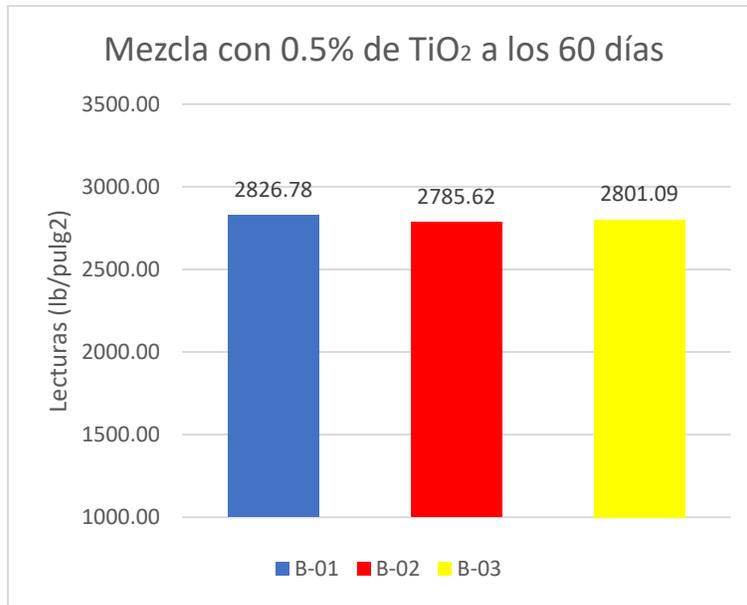


Figura 20. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 0.5% de concentración,  $a/c= 0.60$  a los 60 días (Fuente: Propia).

En la Figura 21 se muestran los resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial de los concretos con relación  $a/c=0.60$ , curado en húmedo por 7 días a la edad de 60 días, de la mezcla con 1.5% de TiO<sub>2</sub> añadido. Se observa que el valor de los tres especímenes es similar.

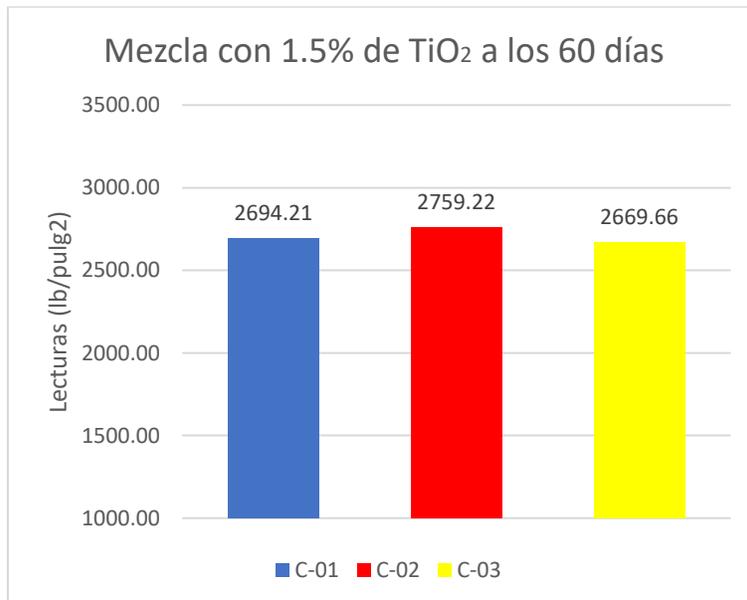


Figura 21. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 1.5% de concentración,  $a/c= 0.60$  a los 60 días (Fuente: Propia).

En la Figura 22 se muestran los resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial de los concretos con relación  $a/c=0.60$ , curado en húmedo por 7 días a la edad de 60 días, de la mezcla con 2.5% de  $TiO_2$  añadido. Se observa que el valor de los tres especímenes es similar.

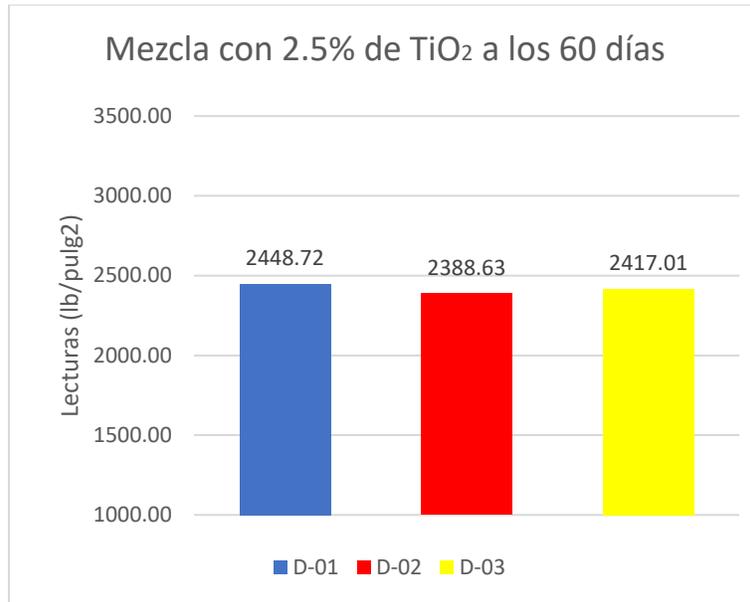


Figura 22. Resistencia a la compresión axial en especímenes de concreto con 2.5% de concentración,  $a/c= 0.60$  a los 60 días (Fuente: Propia).

En la Figura 23 se muestra el valor promedio de la resistencia a la compresión axial de los concretos con relación  $a/c=0.60$  y edad de 60 días. Se observa que el mayor valor de las cuatro mezclas fue el control. Las mezclas que contienen dióxido de titanio en diferentes concentraciones (0.5%, 1.5% y 2.5%) presentaron menores valores de resistencia con respecto a la muestra control en proporciones del 4.04% (0.5%  $TiO_2$ ), 7.38% (1.5%  $TiO_2$ ) y 17.26% (2.5%  $TiO_2$ ). Se puede considerar que la mezcla hasta con 1.5% de dióxido de titanio la resistencia a la compresión es similar a la del control, estadísticamente la diferencia no es significativa.

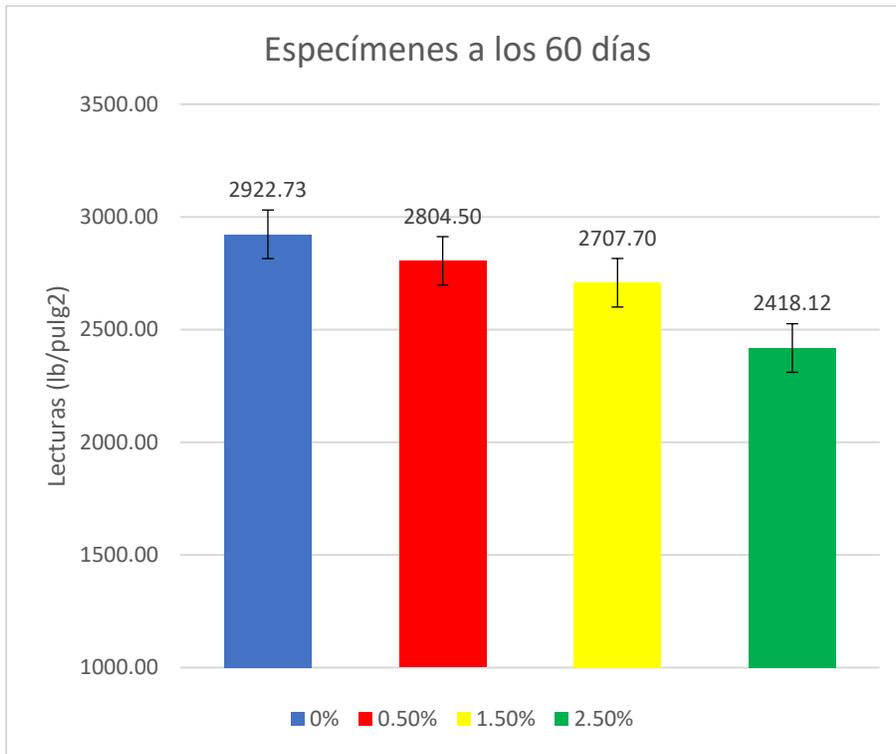


Figura 23. Comparativa de resistencia a la compresión para especímenes de concreto, a/c= 0.60 a los 60 días. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia).

### 4.3 Sorptividad

En la Figura 24 se muestra el detalle para los especímenes de concreto realizados con la mezcla sin aditivo, en donde, se puede observar el valor alcanzado de sorptividad para cada uno. Esta fue calculada con la Ec. 7 considerando el peso seco y el peso húmedo luego de 48 horas de experimento.

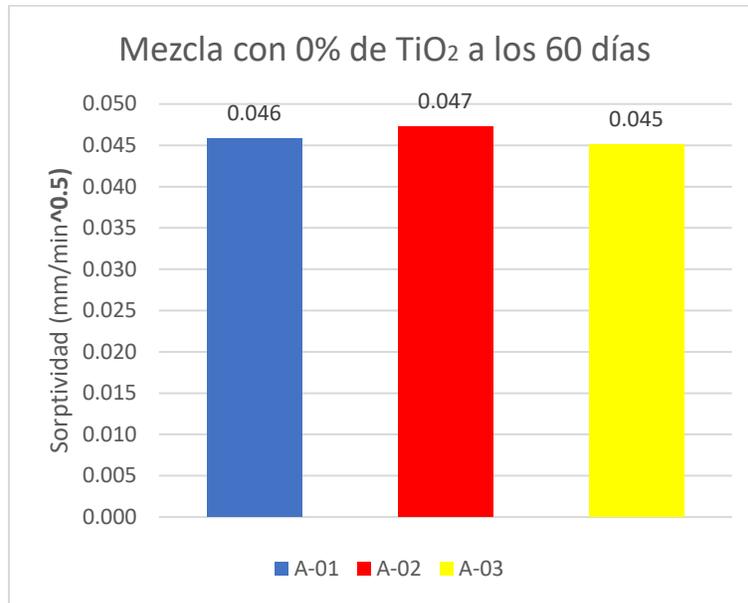


Figura 24. Sorptividad para mezcla de concreto de control a los 60 días de edad (Fuente: Propia).

$$\frac{193\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.046\text{mm/min}^{0.5}$$

$$\frac{199\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.047\text{mm/min}^{0.5}$$

$$\frac{190\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.045\text{mm/min}^{0.5}$$

Tabla 18. Absorción capilar para mezcla control a los 60 días de edad

Probetas con 0% TiO <sub>2</sub>	Peso Seco (kg)	Peso a 48 horas (kg)	Sorptividad (mm/min <sup>0.5</sup> )
A-01	1.700	1.893	0.046
A-02	1.783	1.982	0.047
A-03	1.836	2.026	0.045
<b>Promedio</b>			0.045

Fuente Propia.

En la Figura 25 se muestra el detalle para los especímenes de concreto realizados con la mezcla con 0.5% de TiO<sub>2</sub> añadido, en donde, se puede observar el valor alcanzado de sorptividad para cada uno. Esta fue calculada con la Ec. 7 considerando el peso seco y el peso húmedo luego de 48 horas de experimento.

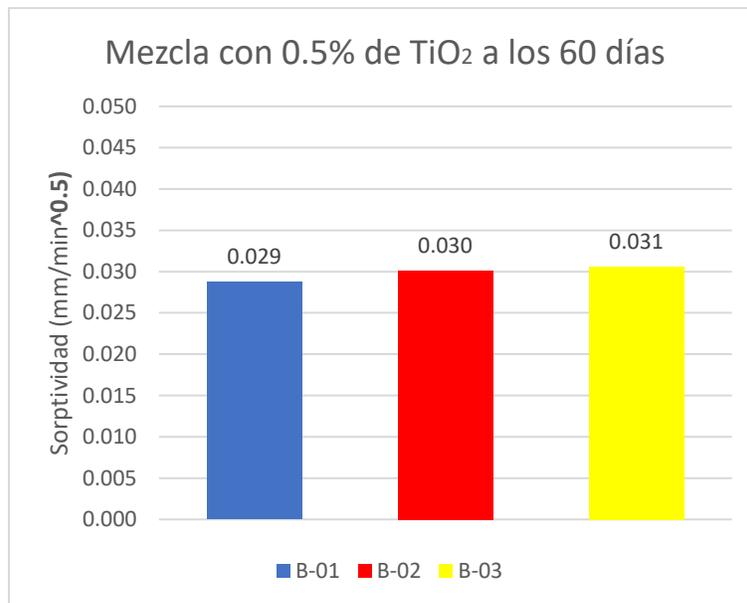


Figura 25. Sorptividad para mezcla de concreto con 0.5% de TiO<sub>2</sub> a los 60 días de edad  
(Fuente: Propia).

$$\frac{121\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.029\text{mm/min}^{0.5}$$

$$\frac{127\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.030\text{mm/min}^{0.5}$$

$$\frac{129\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.031\text{mm/min}^{0.5}$$

Tabla 19. Absorción capilar para mezcla con 0.5% de TiO<sub>2</sub> a los 60 días de edad

Probetas con 0% TiO <sub>2</sub>	Peso Seco (kg)	Peso a 48 horas (kg)	Sorptividad (mm/min <sup>0.5</sup> )
B-01	1.844	1.965	0.029
B-02	1.894	2.021	0.030
B-03	1.898	2.027	0.031
<b>Promedio</b>			0.030

Fuente Propia.

En la Figura 26 se muestra el detalle para los especímenes de concreto realizados con la mezcla con 1.5% de TiO<sub>2</sub> añadido, en donde, se puede observar el valor alcanzado de sorptividad para cada uno. Esta fue calculada con la Ec. 7 considerando el peso seco y el peso húmedo luego de 48 horas de experimento.

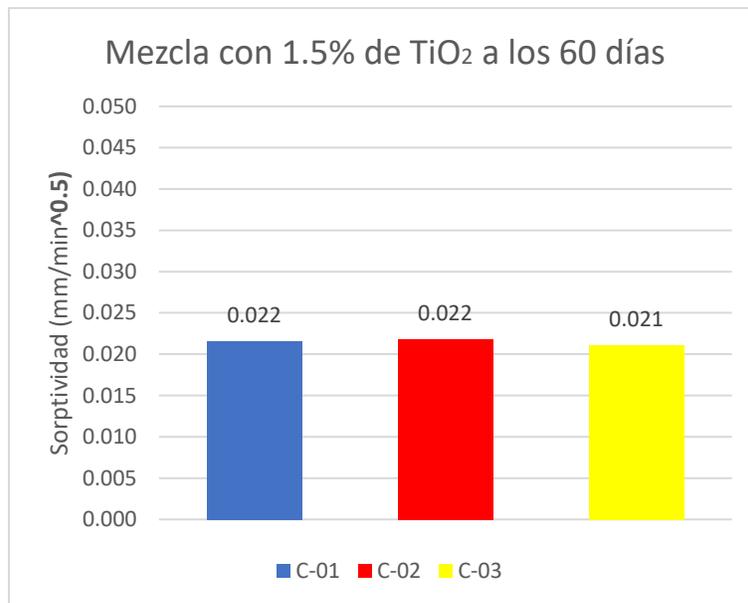


Figura 26. Sorptividad para mezcla de concreto con 1.5% de TiO<sub>2</sub> a los 60 días de edad  
(Fuente: Propia).

$$\frac{91\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.022\text{mm/min}^{0.5}$$

$$\frac{92\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.022\text{mm/min}^{0.5}$$

$$\frac{89\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.021\text{mm/min}^{0.5}$$

Tabla 20. Absorción capilar para mezcla con 1.5% de TiO<sub>2</sub> a los 60 días de edad

Probetas con 0% TiO <sub>2</sub>	Peso Seco (kg)	Peso a 48 horas (kg)	Sorptividad (mm/min <sup>0.5</sup> )
C-01	1.934	2.025	0.022
C-02	1.944	2.036	0.022
C-03	1.973	2.062	0.021
<b>Promedio</b>			0.022

Fuente Propia.

En la Figura 27 se muestra el detalle para los especímenes de concreto realizados con la mezcla con 0.5% de TiO<sub>2</sub> añadido, en donde, se puede observar el valor alcanzado de sorptividad para cada uno. Esta fue calculada con la Ec. 7 considerando el peso seco y el peso húmedo luego de 48 horas de experimento.

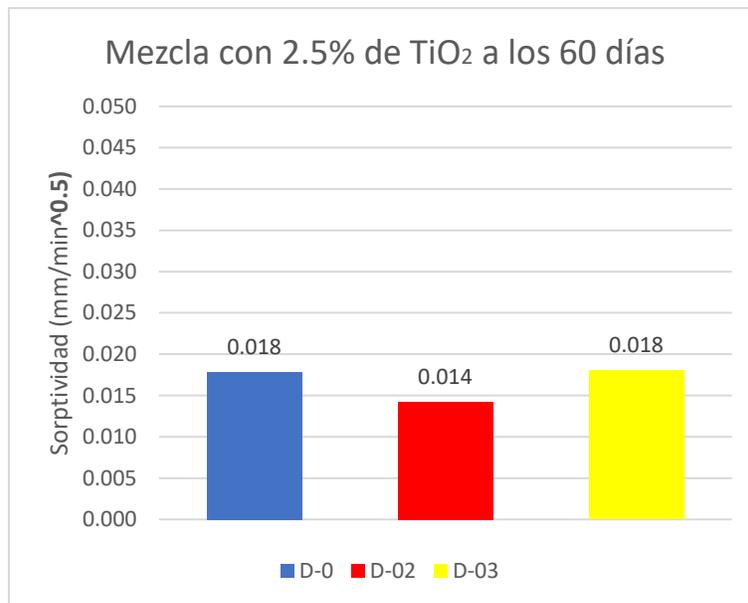


Figura 27. Sorptividad para mezcla de concreto con 2.5% de TiO<sub>2</sub> a los 60 días de edad (Fuente: Propia).

$$\frac{75\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.018\text{mm/min}^{0.5}$$

$$\frac{60\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.014\text{mm/min}^{0.5}$$

$$\frac{76\text{gr}}{7854\text{mm}^2 \times 0.01\text{gr/mm}^3 \times \sqrt{2880\text{min}}} = 0.018\text{mm/min}^{0.5}$$

Tabla 21. Absorción capilar para mezcla con 2.5% de TiO<sub>2</sub> a los 60 días de edad

Probetas con 0% TiO <sub>2</sub>	Peso Seco (kg)	Peso a 48 horas (kg)	Sorptividad (mm/min <sup>0.5</sup> )
D-01	2.032	2.107	0.018
D-02	2.095	2.155	0.014
D-03	2.055	2.131	0.018
<b>Promedio</b>			<b>0.017</b>

Fuente Propia.

En la figura 28 se muestra una comparativa del promedio del valor de sorptividad alcanzado por los especímenes de concreto a diferentes concentraciones (0%, 0.5%, 1.5% y 2.5%). Es importante destacar que las adiciones de dióxido de titanio en las mezclas de concreto redujeron la sorptividad, mostrando reducciones en su capacidad de absorción de agua con respecto a las del control. Esto indica que la interconectividad de poros de la masa cementante es menor a medida que se incrementa la concentración de TiO<sub>2</sub>.

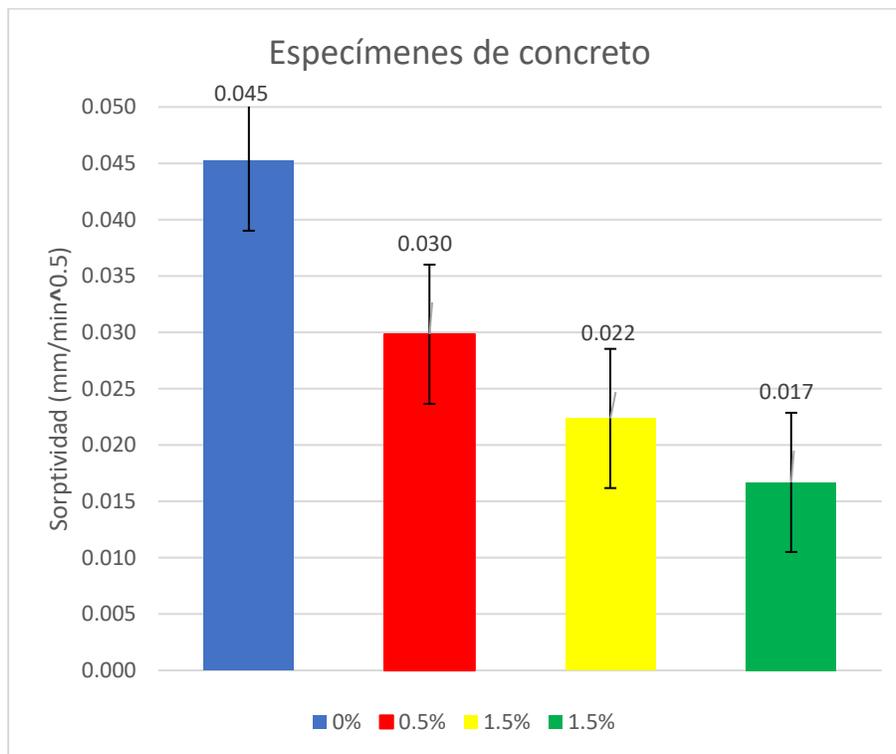


Figura 28. Sorptividad a diferentes concentraciones. Las barras de error indican una desviación estándar

En la Figura 29 se observa que los concretos que contienen dióxido de titanio tuvieron la menor absorción capilar de agua en comparación con los de control. Las probetas de control absorbieron 11.35% en relación con su peso seco. En las mezclas con concentración de  $TiO_2$  de 2.5% fue de 2.23%, 4.71% para las de 1.5% de concentración, y 6.56% de absorción para las de 0.5% de concentración

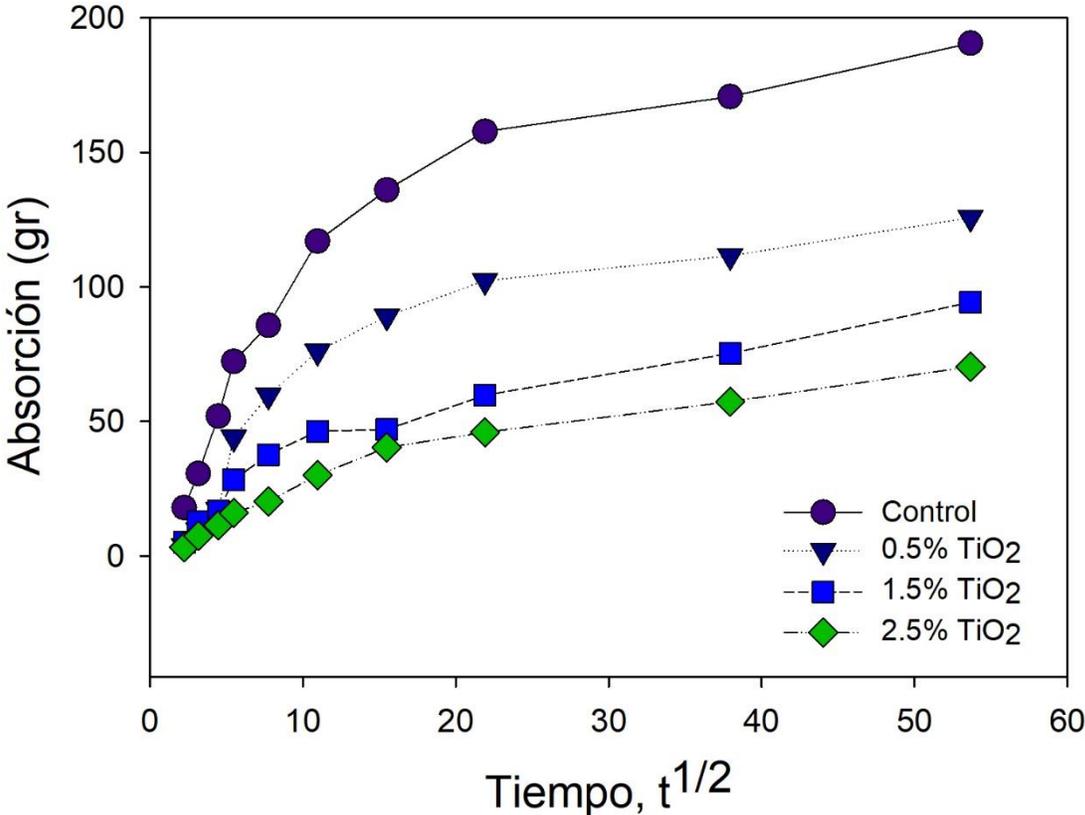


Figura 29. Curva de sorptividad (Fuente: Propia).

#### 4.3.1 Carbonatación Acelerada en el Concreto Endurecido

Se empleó una cámara de carbonatación con una concentración de  $\text{CO}_2$  de 5000 ppm para acelerar el proceso de carbonatación del concreto. En condiciones ambientales este proceso tomaría muchos años. Es conveniente para el diseño de estructuras de concreto el conocer la profundidad de carbonatación en condiciones ambientales, siendo necesario realizar pruebas aceleradas para predecir la profundidad de carbonatación en diferentes tipos de mezcla con ciertas condiciones ambientales.

Con este método, se acorta el periodo de carbonatación por algunas pocas semanas, lo que en condiciones ambientales tomaría muchos años. Aunque es conveniente para el diseño de estructuras de concreto el conocer la profundidad de carbonatación en condiciones ambientales; con la prueba acelerada se puede predecir la profundidad de carbonatación para diferentes tipos de mezcla con ciertas condiciones ambientales.

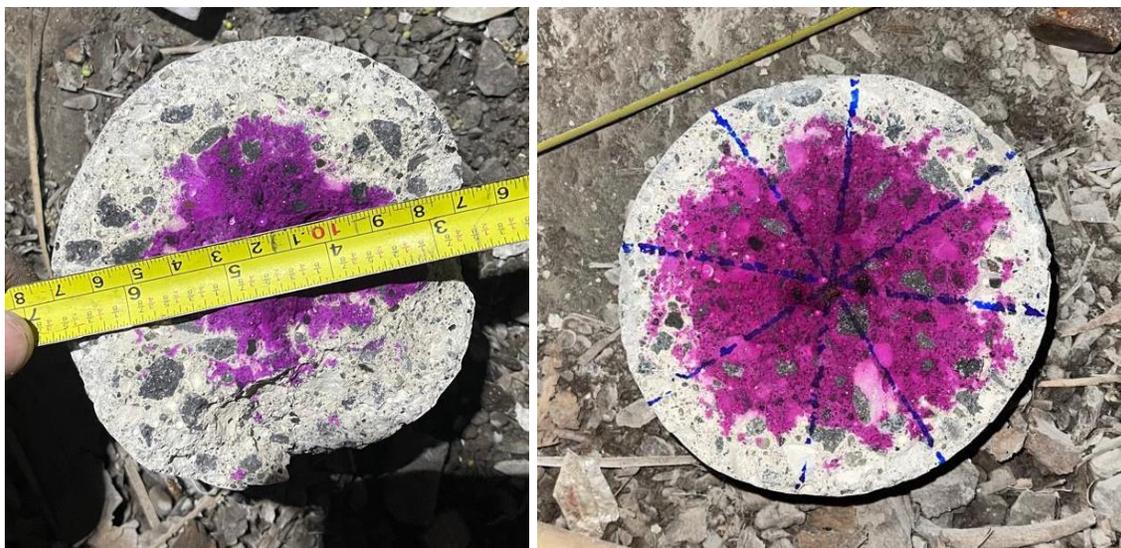


Figura 30. Esquematación de toma de mediciones de profundidad de carbonatación en concretos (Fuente: Propia).

En las siguientes figuras se muestran los frentes de carbonatación de las diferentes mezclas empleadas.

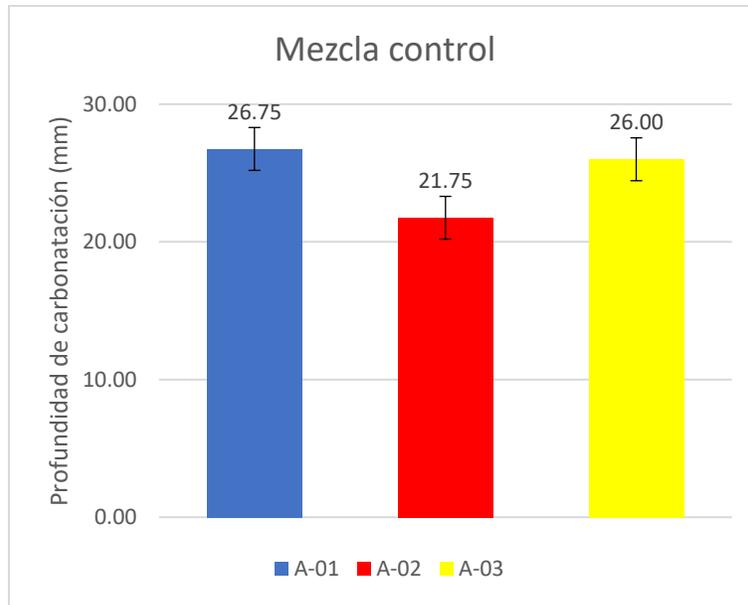


Figura 31. Profundidad de carbonatación en concreto de control,  $a/c=0.60$  a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia)

Tabla 22 Tabla resumen para concreto control para lecturas de la profundidad de carbonatación

Probeta (0.0%)	Lectura (mm)				Promedio	Desviación estándar	Error
	1	2	3	4			
A-01	29	28	25	25	26.75	2.06	7.71
A-02	21	21	22	23	21.75	0.96	4.40
A-03	26	27	25	26	26.00	0.82	3.14
<b>Promedio</b>						24.83	
<b>Desviación</b>						2.70	
<b>Error</b>						10.86	

Fuente Propia.

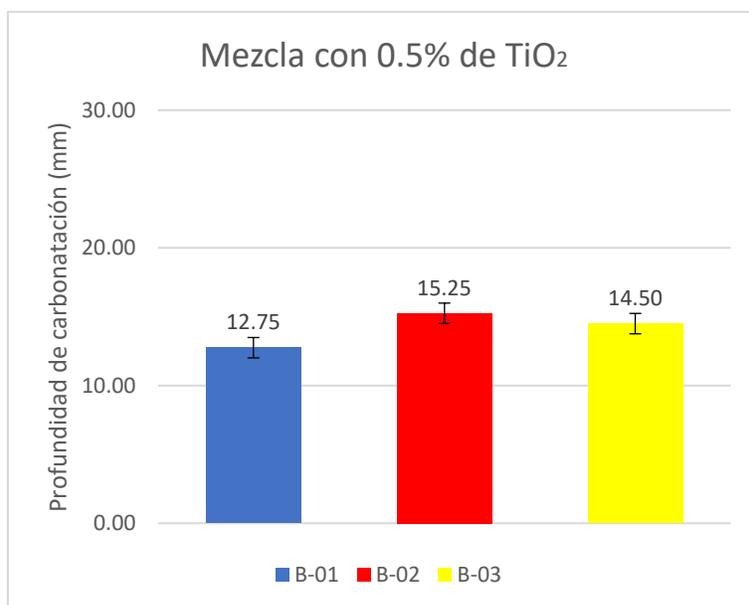


Figura 32. Profundidad de carbonatación en concreto con 0.5% de concentración,  $a/c=0.60$  a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia).

Tabla 23 Tabla resumen para concretos con 0.5% de TiO<sub>2</sub> para control de lecturas de la profundidad de carbonatación

Probeta (0.5%)	Lectura (mm)				Promedio	Desviación estándar	Error
	1	2	3	4			
<b>B-01</b>	12	13	14	12	12.75	0.96	7.51
<b>B-02</b>	17	15	14	15	15.25	1.26	8.25
<b>B-03</b>	14	14	15	15	14.50	0.58	3.98
<b>Promedio</b>						14.17	
<b>Desviación</b>						1.28	
<b>Error</b>						9.06	

Fuente Propia.

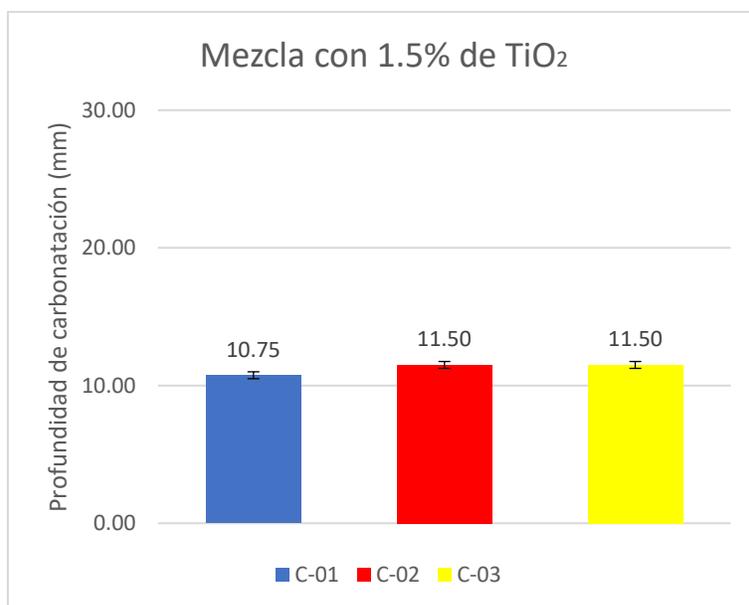


Figura 33. Profundidad de carbonatación en concreto con 1.5% de concentración, a/c=0.60 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia).

Tabla 24 Tabla resumen para concretos con 1.5% de TiO<sub>2</sub> para control de lecturas de profundidad de carbonatación

Probeta (1.5%)	Lectura (mm)				Promedio	Desviación estándar	Error
	1	2	3	4			
<b>C-01</b>	12	10	11	10	10.75	0.96	8.81
<b>C-02</b>	12	10	12	12	11.50	1.00	8.70
<b>C-03</b>	12	12	11	11	11.50	0.58	5.02
<b>Promedio</b>						11.25	
<b>Desviación</b>						0.43	
<b>Error</b>						3.85	

Fuente Propia.

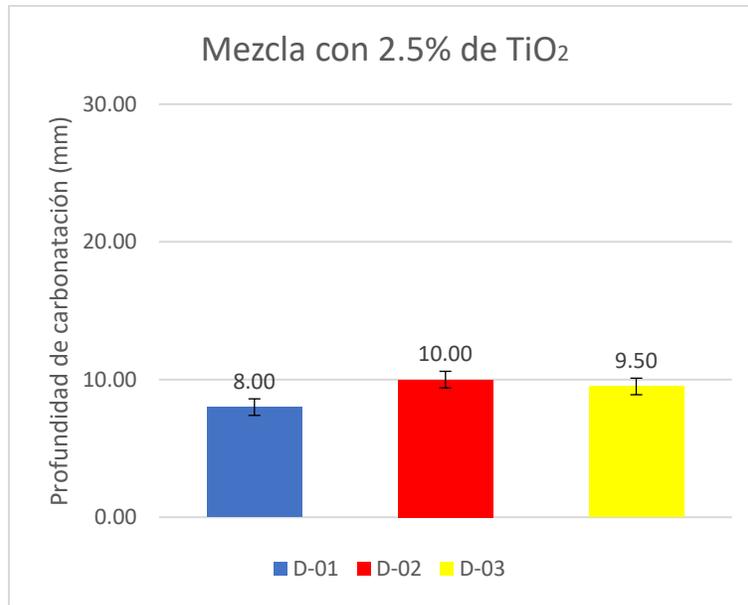


Figura 34. Profundidad de carbonatación en concreto con 2.5% de concentración, a/c=0.60 a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar (Fuente: Propia).

Tabla 25 Tabla resumen para concretos con 2.5% de TiO<sub>2</sub> para control de lecturas de profundidad de carbonatación

Probeta (2.5%)	Lectura (mm)				Promedio	Desviación estándar	Error
	1	2	3	4			
D-01	8	9	7	8	8.00	0.82	10.21
D-02	9	10	11	10	10.00	0.82	8.16
D-03	10	10	8	10	9.50	1.00	10.53
<b>Promedio</b>						9.17	
<b>Desviación</b>						1.04	
<b>Error</b>						11.35	

Fuente Propia.

En la Figura 35 se observa que las mezclas que contienen dióxido de titanio reducen el frente de carbonatación entre 43% y 63% aproximadamente con respecto al control. La reducción de la carbonatación debido a la adición del químico en estos concretos es significativa con respecto al control y en condiciones reales donde la concentración ambiental es de 0.04%, con humedad relativa y temperaturas ideales, es improbable que este fenómeno alcance las zonas cercanas al acero de refuerzo mínimas de 25 mm de profundidad durante su vida de servicio.

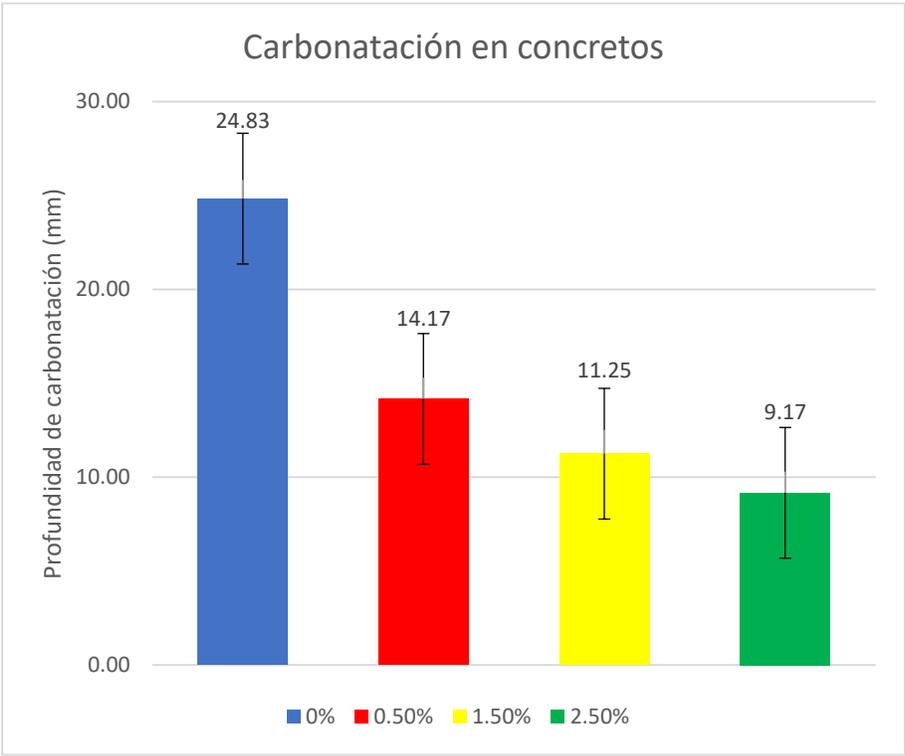


Figura 35. Profundidad de carbonatación en especímenes de concreto a diferentes concentraciones,  $a/c=0.60$  a los 120 días de edad. Las barras de error indican una desviación estándar

Se determinó el coeficiente de carbonatación acelerada utilizando la fórmula:

$$k = \frac{d}{t^{0.5}} \quad \text{Ec. 8}$$

K = Coeficiente de carbonatación

D = Profundidad de carbonatación (mm)

t = Tiempo de exposición (días)

$$K_1 = \frac{24.83 \text{ mm}}{30^{0.5}} = 4.53 \text{ mm/días}$$

$$K_2 = \frac{14.17 \text{ mm}}{30^{0.5}} = 2.58 \text{ mm/días}$$

$$K_3 = \frac{11.25 \text{ mm}}{30^{0.5}} = 2.05 \text{ mm/días}$$

$$K_4 = \frac{9.17 \text{ mm}}{30^{0.5}} = 1.67 \text{ mm/días}$$

Para el cálculo del coeficiente de carbonatación en condiciones ambientales con base al coeficiente de carbonatación obtenido de la prueba acelerada en las diferentes mezclas, se emplea la siguiente ecuación:

$$\frac{K_{acc}}{K_{amb}} = \frac{\sqrt{C1_{acc}}}{\sqrt{C2_{amb}}} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$K_{acc}$  = Coeficiente de carbonatación de prueba acelerada

$K_{amb}$  = Coeficiente de carbonatación ambiental

$C1_{acc}$  = Concentración de CO<sub>2</sub> en prueba acelerada

$C2_{amb}$  = Concentración de CO<sub>2</sub> ambiental

Obteniendo así, 4 coeficientes ambientales que nos proporcionan el dato estimado al tiempo que necesita el dióxido de carbono en penetrar una estructura de concreto a cierta profundidad.

Para ello se despejó la Ecuación 9 resultando:

$$K_{amb} = K_{acc} \times \frac{\sqrt{C2_{amb}}}{\sqrt{C1_{acc}}}$$

$$K_{amb1} = 4.53mm/días \times \frac{\sqrt{400ppm}}{\sqrt{5000ppm}} = 1.28mm/días$$

$$K_{amb2} = 2.58mm/días \times \frac{\sqrt{400ppm}}{\sqrt{5000ppm}} = 0.72mm/días$$

$$K_{amb3} = 2.05mm/días \times \frac{\sqrt{400ppm}}{\sqrt{5000ppm}} = 0.57mm/días$$

$$K_{amb4} = 1.67mm/días \times \frac{\sqrt{400ppm}}{\sqrt{5000ppm}} = 0.47mm/días$$

Llegando a afectar el acero de refuerzo en 467.2mm en un año con 0%,  
262.80mm en un año con 0.5%, 208.05mm en un año con 1.5% y 171.55mm en  
un año con 2.5%.

## V. Capítulo V – Costo y Beneficio

Para el análisis de costo beneficio se calculó el costo promedio de producir un metro cubico de concreto normal (sin aditivo). Se realizaron las cotizaciones de agregados (fino y grueso) y cementos comerciales.

Tabla 26 Cantidades para la elaboración de un metro cúbico de concreto sin aditivo

<b>Material</b>	<b>Cantidad (para 1m3)</b>	<b>Costo Unitario (C\$)</b>	<b>Costo Total (C\$)</b>
<b>Cemento (Bolsas)</b>	9.0	450.00	4,050.00
<b>Arena (m<sup>3</sup>)</b>	0.319	700.00	223.30
<b>Grava (m<sup>3</sup>)</b>	0.305	800.00	244.00
<b>Agua (m<sup>3</sup>)</b>	0.216	200.00	43.20
<b>Total (C\$)</b>			<b>4,560.50</b>

Fuente Propia.

Tabla 27 Cantidades para la elaboración de un metro cúbico de concreto con 0.5% de concentración de dióxido de titanio en la mezcla

<b>Material</b>	<b>Cantidad (para 1m3)</b>	<b>Costo Unitario (C\$)</b>	<b>Costo Total (C\$)</b>
<b>Cemento (Bolsas)</b>	9.0	450.00	4,050.00
<b>Arena (m<sup>3</sup>)</b>	0.319	700.00	223.30
<b>Grava (m<sup>3</sup>)</b>	0.305	800.00	244.00
<b>Agua (m<sup>3</sup>)</b>	0.216	200.00	43.20
<b>TiO<sub>2</sub> (lb)</b>	4.24	72.90	309.124
<b>Total (C\$)</b>			<b>4,869.62</b>

Fuente: Propia.

Tabla 28 Cantidades para la elaboración de un metro cúbico de concreto con 1.5% de concentración de dióxido de titanio en la mezcla

<b>Material</b>	<b>Cantidad (para 1m3)</b>	<b>Costo Unitario (C\$)</b>	<b>Costo Total (C\$)</b>
<b>Cemento (Bolsas)</b>	9.0	450.00	4,050.00
<b>Arena (m<sup>3</sup>)</b>	0.319	700.00	223.30
<b>Grava (m<sup>3</sup>)</b>	0.305	800.00	244.00
<b>Agua (m<sup>3</sup>)</b>	0.216	200.00	43.20
<b>TiO<sub>2</sub> (lb)</b>	12.72	72.90	927.28
<b>Total (C\$)</b>			<b>5,487.78</b>

Fuente Propia.

Tabla 29 Cantidades para la elaboración de un metro cúbico de concreto con 2.5% de concentración de dióxido de titanio en la mezcla

<b>Material</b>	<b>Cantidad (para 1m3)</b>	<b>Costo Unitario (C\$)</b>	<b>Costo Total (C\$)</b>
<b>Cemento (Bolsas)</b>	9.0	450.00	4,050.00
<b>Arena (m<sup>3</sup>)</b>	0.319	700.00	223.30
<b>Grava (m<sup>3</sup>)</b>	0.305	800.00	244.00
<b>Agua (m<sup>3</sup>)</b>	0.216	200.00	43.20
<b>TiO<sub>2</sub> (lb)</b>	21.21	72.90	1,546.21
<b>Total (C\$)</b>			<b>6,106.71</b>

Fuente Propia.

Se determinaron los costos según el valor de mercado del producto y se calculó el mínimo requerido del químico a diferentes concentraciones a partir del peso de cemento teniendo un aumento del 6.78% en el costo la mezcla que posee 0.5% de concentración de  $\text{TiO}_2$  (con relación al peso del cemento) en comparación a la mezcla convencional; Un aumento del 20.33% de la mezcla que posee 1.5% de concentración y un 33.90% la mezcla que posee 2.5% de concentración del aditivo.

Para realizar un análisis más exacto con relación a los costos se determinaron los alcances de una obra de construcción de una sección con fines estudiantiles de 5.0m largo por 6.0m de ancho. Los muros se elaboraron a partir de mampostería reforzada y para los diseños de las vigas y columnas que soportarían la estructura principal se consideraron las 4 diferentes mezclas de concreto propuestas en esta investigación en donde se visualiza la diferencia de costos.

Tabla 30 Presupuesto para sección estudiantil con mezcla de concreto ordinaria

<b>PRESUPUESTO GENERAL</b>						
<b>ETAPA</b>	<b>SUB-ETAPA</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>U/M</b>	<b>CANT. TOTAL</b>	<b>C/U</b>	<b>SUB COSTO</b>
<b>010</b>		<b>Preliminares</b>	<b>m<sup>2</sup></b>			C\$ 8,744.42
	1	Limpieza inicial	m <sup>2</sup>	5	C\$ 20.00	C\$ 100.00
	2	Limpieza de paredes exteriores e interiores	m <sup>2</sup>	1113	C\$ 5.00	C\$ 5,565.00
	3	Limpieza en protectore (puertas y ventanas)	m <sup>2</sup>	136.34	C\$ 5.00	C\$ 681.70
	4	trazo y nivelación	m <sup>2</sup>	6	C\$ 399.62	C\$ 2,397.72
<b>020</b>		<b>Fundaciones</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			C\$ 1,928.75
	1	Excavación manual	m <sup>3</sup>	0.69	C\$ 100.00	C\$ 68.75
		Material selecto	m <sup>3</sup>	0.90	C\$ 200.00	C\$ 180.00
		Nivelación y conformación	m <sup>2</sup>	6.00	C\$ 100.00	C\$ 600.00
	2	Relleno y compactación	m <sup>3</sup>	0.90	C\$ 80.00	C\$ 72.00
	3	Acero de refuerzo N°3 G-40 para V-A + acero N°2	lbs	1.38	C\$ 80.00	C\$ 110.40
	4	Formaleta	m <sup>2</sup>	4.4	C\$ 204.00	C\$ 897.60
	5	Concreto	m <sup>3</sup>	0.44	C\$ 0.00	C\$ 0.00
<b>030</b>		<b>Estructura de concreto</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			C\$ 24,790.64
	1	Acero de refuerzo N°3 G-40 para V-I, V-C, C-1 y C-2 + acero N°2	lbs	28.65	C\$ 43.74	C\$ 1,253.32
	2	Formaleta	m <sup>2</sup>	4.40	C\$ 1,346.60	C\$ 5,925.04
	3	Concreto estructural	m <sup>3</sup>	2.92	C\$ 6,031.60	C\$ 17,612.28
<b>040</b>		<b>Mampostería Reforzada</b>				C\$ 19,321.23
	1	Pared de bloque de concreto de 15x20x40	m <sup>2</sup>	26.5	C\$ 729.10	C\$ 19,321.23
<b>050</b>		<b>Obra sanitaria</b>				C\$ 34,945.65
	1	Excavación y relleno de obra sanitaria y potable	m <sup>3</sup>	30.50	C\$ 50.00	C\$ 1,525.00
	2	Suministro e instalación de tubería sanitaria 4" SDR 41	m	21.50	C\$ 613.49	C\$ 13,190.00
	3	Suministro e instalación tubería potable 1/2" SDR 26	m	43.50	C\$ 183.51	C\$ 7,982.65
	4	Suministro e instalación de inodoro corriente color blanco	c/u	3	C\$ 3,062.00	C\$ 9,186.00
	5	Suministro e instalación de inodoro para niños color blanco	c/u	1	C\$ 3,062.00	C\$ 3,062.00
<b>060</b>		<b>Techo</b>				C\$ 9,810.00
		Suministro e instalación de Perlín de 4x2x1/8	lbs	12	C\$ 303.75	C\$ 3,645.00
		Suministro e instalación de Perlín de 2x3x1/16	lbs	12	C\$ 303.75	C\$ 3,645.00
		suministro e instalación de Lamina de zinc de 6 pie calibre #26	m <sup>2</sup>	4.50	C\$ 280.00	C\$ 1,260.00
		Suministro e instalación de Lamina de zinc de 10 pie calibre #26	m <sup>2</sup>	4.50	C\$ 280.00	C\$ 1,260.00

<b>070</b>		<b>Puerta</b>	<b>c/u</b>			<b>C\$ 11,600.00</b>
		suministro e instalación de puerta metálica para los servicios sanitario de (0.9x2.0)	c/u	4	C\$ 2,900.00	C\$ 11,600.00
<b>080</b>		<b>ventanas</b>	<b>c/u</b>			<b>C\$ 108,400.00</b>
	1	suministro e instalación de Ventana de vidrios escarchado con marco de aluminio	c/u	60	1500	C\$ 90,000.00
	2	Protectores de ventanas metálicas	c/u	8	2300	C\$ 18,400.00
<b>090</b>		<b>Pintura</b>				<b>C\$ 69,605.52</b>
	1	Pintar pared exterior e interior	m <sup>2</sup>	1113	51.58	C\$ 57,408.54
	2	pintar protectores de (puertas y ventanas)	m <sup>2</sup>	136.34	89.46	C\$ 12,196.98
<b>100</b>		<b>Limpieza final y entrega</b>				<b>C\$ 6,306.70</b>
		Limpieza final y entrega	m <sup>2</sup>	1261.34	C\$ 5.00	C\$ 6,306.70
		<b>SUB COSTO DE LA EDIFICACION</b>				<b>C\$ 285,642.91</b>
	<b>a</b>	<b>Total de Costos Directos</b>				<b>C\$ 285,642.91</b>
	<b>b</b>	<b>Administración (%sobre a)</b>		<b>0.04</b>		<b>C\$ 11,425.72</b>
	<b>c</b>	<b>Utilidades</b>		<b>0.04</b>		<b>C\$ 11,882.74</b>
	<b>d</b>	<b>Sub total (a+b+c)</b>				<b>C\$ 308,951.37</b>
	<b>e</b>	<b>Impuesto Municipal(% sobre d)</b>		<b>0.03</b>		<b>C\$ 9,268.54</b>
	<b>f</b>	<b>I.V.A</b>		<b>0.15</b>		<b>C\$ 46,424.21</b>
	<b>g</b>	<b>Precio total (d+e)</b>				<b>C\$ 364,644.11</b>

Fuente Propia.

Tabla 31 Presupuesto para sección estudiantil con mezcla de concreto con 0.5% de dióxido de titanio añadido

<b>PRESUPUESTO GENERAL</b>						
<b>ETAPA</b>	<b>SUB-ETAPA</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>U/M</b>	<b>CANT. TOTAL</b>	<b>C/U</b>	<b>SUB COSTO</b>
<b>010</b>		<b>Preliminares</b>	<b>m<sup>2</sup></b>			<b>C\$ 8,744.42</b>
	1	Limpieza inicial	m <sup>2</sup>	5	C\$ 20.00	C\$ 100.00
	2	Limpieza de paredes exteriores e interiores	m <sup>2</sup>	1113	C\$ 5.00	C\$ 5,565.00
	3	Limpieza en protectore (puertas y ventanas)	m <sup>2</sup>	136.34	C\$ 5.00	C\$ 681.70
	4	trazo y nivelación	m <sup>2</sup>	6	C\$ 399.62	C\$ 2,397.72
<b>020</b>		<b>Fundaciones</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			<b>C\$ 1,928.75</b>
	1	Excavación manual	m <sup>3</sup>	0.69	C\$ 100.00	C\$ 68.75
		Material selecto	m <sup>3</sup>	0.90	C\$ 200.00	C\$ 180.00
		Nivelación y conformación	m <sup>2</sup>	6.00	C\$ 100.00	C\$ 600.00
	2	Relleno y compactación	m <sup>3</sup>	0.90	C\$ 80.00	C\$ 72.00
	3	Acero de refuerzo N°3 G-40 para V-A + acero N°2	lbs	1.38	C\$ 80.00	C\$ 110.40
	4	Formaleta	m <sup>2</sup>	4.4	C\$ 204.00	C\$ 897.60
	5	Concreto	m <sup>3</sup>	0.44	C\$ 0.00	C\$ 0.00
<b>030</b>		<b>Estructura de concreto</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			<b>C\$ 25,478.09</b>
	1	Acero de refuerzo N°3 G-40 para V-I, V-C, C-1 y C-2 + acero N°2	lbs	28.65	C\$ 43.74	C\$ 1,253.32
	2	Formaleta	m <sup>2</sup>	4.40	C\$ 1,346.60	C\$ 5,925.04
	3	Concreto estructural	m <sup>3</sup>	2.92	C\$ 6,031.60	C\$ 17,612.28
	4	Dióxido de Titanio	lbs	9.43	C\$ 72.90	C\$ 687.45
<b>040</b>		<b>Mampostería Reforzada</b>				<b>C\$ 19,321.23</b>
	1	Pared de bloque de concreto de 15x20x40	m <sup>2</sup>	26.5	C\$ 729.10	C\$ 19,321.23
<b>050</b>		<b>Obra sanitaria</b>				<b>C\$ 34,945.65</b>
	1	Excavación y relleno de obra sanitaria y potable	m <sup>3</sup>	30.50	C\$ 50.00	C\$ 1,525.00
	2	Suministro e instalación de tubería sanitaria 4" SDR 41	m	21.50	C\$ 613.49	C\$ 13,190.00
	3	Suministro e instalación tubería potable 1/2" SDR 26	m	43.50	C\$ 183.51	C\$ 7,982.65
	4	Suministro e instalación de inodoro corriente color blanco	c/u	3	C\$ 3,062.00	C\$ 9,186.00
	5	Suministro e instalación de inodoro para niños color blanco	c/u	1	C\$ 3,062.00	C\$ 3,062.00

<b>060</b>	<b>Techo</b>				<b>C\$ 9,810.00</b>	
		Suministro e instalación de Perlin de 4x2x1/8	lbs	12	C\$ 303.75	C\$ 3,645.00
		Suministro e instalación de Perlin de 2x3x1/16	lbs	12	C\$ 303.75	C\$ 3,645.00
		suministro e instalación de Lamina de zinc de 6 pie calibre #26	m <sup>2</sup>	4.50	C\$ 280.00	C\$ 1,260.00
		Suministro e instalación de Lamina de zinc de 10 pie calibre #26	m <sup>2</sup>	4.50	C\$ 280.00	C\$ 1,260.00
<b>070</b>	<b>Puerta</b>				<b>C\$ 11,600.00</b>	
		suministro e instalación de puerta metálica para los servicios sanitario de (0.9x2.0)	c/u	4	C\$ 2,900.00	C\$ 11,600.00
<b>080</b>	<b>ventanas</b>				<b>C\$ 108,400.00</b>	
	1	suministro e instalación de Ventana de vidrios escarchado con marco de aluminio	c/u	60	1500	C\$ 90,000.00
	2	Protectores de ventanas metálicas	c/u	8	2300	C\$ 18,400.00
<b>090</b>	<b>Pintura</b>				<b>C\$ 69,605.52</b>	
	1	Pintar pared exterior e interior	m <sup>2</sup>	1113	51.58	C\$ 57,408.54
	2	pintar protectores de (puertas y ventanas)	m <sup>2</sup>	136.34	89.46	C\$ 12,196.98
<b>100</b>	<b>Limpieza final y entrega</b>				<b>C\$ 6,306.70</b>	
		Limpieza final y entrega	m <sup>2</sup>	1261.34	C\$ 5.00	C\$ 6,306.70
<b>SUB COSTO DE LA EDIFICACION</b>					<b>C\$ 286,330.35</b>	
<b>a</b>	<b>Total de Costos Directos</b>				<b>C\$ 286,330.35</b>	
<b>b</b>	<b>Administración (%sobre a)</b>			<b>0.04</b>	<b>C\$ 11,453.21</b>	
<b>c</b>	<b>Utilidades</b>			<b>0.04</b>	<b>C\$ 11,911.34</b>	
<b>d</b>	<b>Sub total (a+b+c)</b>				<b>C\$ 309,694.91</b>	
<b>e</b>	<b>Impuesto Municipal(% sobre d)</b>			<b>0.03</b>	<b>C\$ 9,290.85</b>	
<b>f</b>	<b>I.V.A</b>			<b>0.15</b>	<b>C\$ 46,535.74</b>	
<b>g</b>	<b>Precio total (d+e)</b>				<b>C\$ 365,521.49</b>	

Fuente Propia.

Tabla 32 Presupuesto para sección estudiantil con mezcla de concreto con 1.5% de dióxido de titanio añadido

PRESUPUESTO GENERAL						
ETAPA	SUB-ETAPA	ACTIVIDADES	U/M	CANT. TOTAL	C/U	SUB COSTO
<b>010</b>		<b>Preliminares</b>	<b>m<sup>2</sup></b>			C\$ 8,744.42
	1	Limpieza inicial	m <sup>2</sup>	5	C\$ 20.00	C\$ 100.00
	2	Limpieza de paredes exteriores e interiores	m <sup>2</sup>	1113	C\$ 5.00	C\$ 5,565.00
	3	Limpieza en protectore (puertas y ventanas)	m <sup>2</sup>	136.34	C\$ 5.00	C\$ 681.70
	4	trazo y nivelación	m <sup>2</sup>	6	C\$ 399.62	C\$ 2,397.72
<b>020</b>		<b>Fundaciones</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			C\$ 1,928.75
	1	Excavación manual	m <sup>3</sup>	0.69	C\$ 100.00	C\$ 68.75
		Material selecto	m <sup>3</sup>	0.90	C\$ 200.00	C\$ 180.00
		Nivelación y conformación	m <sup>2</sup>	6.00	C\$ 100.00	C\$ 600.00
	2	Relleno y compactación	m <sup>3</sup>	0.90	C\$ 80.00	C\$ 72.00
	3	Acero de refuerzo N°3 G-40 para V-A + acero N°2	lbs	1.38	C\$ 80.00	C\$ 110.40
	4	Formaleta	m <sup>2</sup>	4.4	C\$ 204.00	C\$ 897.60
	5	Concreto	m <sup>3</sup>	0.44	C\$ 0.00	C\$ 0.00
<b>030</b>		<b>Estructura de concreto</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			C\$ 26,857.36
	1	Acero de refuerzo N°3 G-40 para V-I, V-C, C-1 y C-2 + acero N°2	lbs	28.65	C\$ 43.74	C\$ 1,253.32
	2	Formaleta	m <sup>2</sup>	4.40	C\$ 1,346.60	C\$ 5,925.04
	3	Concreto estructural	m <sup>3</sup>	2.92	C\$ 6,031.60	C\$ 17,612.28
	4	Dióxido de Titanio	lbs	28.35	C\$ 72.90	C\$ 2,066.72
<b>040</b>		<b>Mampostería Reforzada</b>				C\$ 19,321.23
	1	Pared de bloque de concreto de 15x20x40	m <sup>2</sup>	26.5	C\$ 729.10	C\$ 19,321.23
<b>050</b>		<b>Obra sanitaria</b>				C\$ 34,945.65
	1	Excavación y relleno de obra sanitaria y potable	m <sup>3</sup>	30.50	C\$ 50.00	C\$ 1,525.00
	2	Suministro e instalación de tubería sanitaria 4" SDR 41	m	21.50	C\$ 613.49	C\$ 13,190.00
	3	Suministro e instalación tubería potable 1/2" SDR 26	m	43.50	C\$ 183.51	C\$ 7,982.65
	4	Suministro e instalación de inodoro corriente color blanco	c/u	3	C\$ 3,062.00	C\$ 9,186.00
	5	Suministro e instalación de inodoro para niños color blanco	c/u	1	C\$ 3,062.00	C\$ 3,062.00

<b>060</b>	<b>Techo</b>				<b>C\$ 9,810.00</b>
	Suministro e instalación de Perlin de 4x2x1/8	lbs	12	C\$ 303.75	C\$ 3,645.00
	Suministro e instalación de Perlin de 2x3x1/16	lbs	12	C\$ 303.75	C\$ 3,645.00
	suministro e instalación de Lamina de zinc de 6 pie calibre #26	m <sup>2</sup>	4.50	C\$ 280.00	C\$ 1,260.00
	Suministro e instalación de Lamina de zinc de 10 pie calibre #26	m <sup>2</sup>	4.50	C\$ 280.00	C\$ 1,260.00
<b>070</b>	<b>Puerta</b>				<b>C\$ 11,600.00</b>
	suministro e instalación de puerta metálica para los servicios sanitario de (0.9x2.0)	c/u	4	C\$ 2,900.00	C\$ 11,600.00
<b>080</b>	<b>ventanas</b>				<b>C\$ 108,400.00</b>
1	suministro e instalación de Ventana de vidrios escarchado con marco de aluminio	c/u	60	1500	C\$ 90,000.00
2	Protectores de ventanas metálicas	c/u	8	2300	C\$ 18,400.00
<b>090</b>	<b>Pintura</b>				<b>C\$ 69,605.52</b>
1	Pintar pared exterior e interior	m <sup>2</sup>	1113	51.58	C\$ 57,408.54
2	pintar protectores de (puertas y ventanas)	m <sup>2</sup>	136.34	89.46	C\$ 12,196.98
<b>100</b>	<b>Limpieza final y entrega</b>				<b>C\$ 6,306.70</b>
	Limpieza final y entrega	m <sup>2</sup>	1261.34	C\$ 5.00	C\$ 6,306.70
<b>SUB COSTO DE LA EDIFICACION</b>					<b>C\$ 287,709.62</b>
<b>a</b>	<b>Total de Costos Directos</b>				<b>C\$ 287.709.62</b>
<b>b</b>	<b>Administración (%sobre a)</b>		<b>0.04</b>		<b>C\$ 11,508.38</b>
<b>c</b>	<b>Utilidades</b>		<b>0.04</b>		<b>C\$ 11,968.72</b>
<b>d</b>	<b>Sub total (a+b+c)</b>				<b>C\$ 311,186.73</b>
<b>e</b>	<b>Impuesto Municipal(% sobre d)</b>		<b>0.03</b>		<b>C\$ 9,335.60</b>
<b>f</b>	<b>I.V.A</b>		<b>0.15</b>		<b>C\$ 46,759.51</b>
<b>g</b>	<b>Precio total (d+e)</b>				<b>C\$ 367,281.84</b>

Fuente Propia.

Tabla 33 Presupuesto para sección estudiantil con mezcla de concreto con 2.5% de dióxido de titanio añadido

PRESUPUESTO GENERAL						
ETAPA	SUB-ETAPA	ACTIVIDADES	U/M	CANT. TOTAL	C/U	SUB COSTO
<b>010</b>		<b>Preliminares</b>	<b>m<sup>2</sup></b>			C\$ 8,744.42
	1	Limpieza inicial	m <sup>2</sup>	5	C\$ 20.00	C\$ 100.00
	2	Limpieza de paredes exteriores e interiores	m <sup>2</sup>	1113	C\$ 5.00	C\$ 5,565.00
	3	Limpieza en protectore (puertas y ventanas)	m <sup>2</sup>	136.34	C\$ 5.00	C\$ 681.70
	4	trazo y nivelación	m <sup>2</sup>	6	C\$ 399.62	C\$ 2,397.72
<b>020</b>		<b>Fundaciones</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			C\$ 1,928.75
	1	Excavación manual	m <sup>3</sup>	0.69	C\$ 100.00	C\$ 68.75
		Material selecto	m <sup>3</sup>	0.90	C\$ 200.00	C\$ 180.00
		Nivelación y conformación	m <sup>2</sup>	6.00	C\$ 100.00	C\$ 600.00
	2	Relleno y compactación	m <sup>3</sup>	0.90	C\$ 80.00	C\$ 72.00
	3	Acero de refuerzo N°3 G-40 para V-A + acero N°2	lbs	1.38	C\$ 80.00	C\$ 110.40
	4	Formaleta	m <sup>2</sup>	4.4	C\$ 204.00	C\$ 897.60
	5	Concreto	m <sup>3</sup>	0.44	C\$ 0.00	C\$ 0.00
<b>030</b>		<b>Estructura de concreto</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			C\$ 28,235.90
	1	Acero de refuerzo N°3 G-40 para V-I, V-C, C-1 y C-2 + acero N°2	lbs	28.65	C\$ 43.74	C\$ 1,253.32
	2	Formaleta	m <sup>2</sup>	4.40	C\$ 1,346.60	C\$ 5,925.04
	3	Concreto estructural	m <sup>3</sup>	2.92	C\$ 6,031.60	C\$ 17,612.28
	4	Dióxido de Titanio	lbs	47.26	C\$ 72.90	C\$ 3,445.25
<b>040</b>		<b>Mampostería Reforzada</b>				C\$ 19,321.23
	1	Pared de bloque de concreto de 15x20x40	m <sup>2</sup>	26.5	C\$ 729.10	C\$ 19,321.23
<b>050</b>		<b>Obra sanitaria</b>				C\$ 34,945.65
	1	Excavación y relleno de obra sanitaria y potable	m <sup>3</sup>	30.50	C\$ 50.00	C\$ 1,525.00
	2	Suministro e instalación de tubería sanitaria 4" SDR 41	m	21.50	C\$ 613.49	C\$ 13,190.00
	3	Suministro e instalación tubería potable 1/2" SDR 26	m	43.50	C\$ 183.51	C\$ 7,982.65
	4	Suministro e instalación de inodoro corriente color blanco	c/u	3	C\$ 3,062.00	C\$ 9,186.00
	5	Suministro e instalación de inodoro para niños color blanco	c/u	1	C\$ 3,062.00	C\$ 3,062.00

<b>060</b>		<b>Techo</b>				<b>C\$ 9,810.00</b>
		Suministro e instalación de Perlin de 4x2x1/8	lbs	12	C\$ 303.75	C\$ 3,645.00
		Suministro e instalación de Perlin de 2x3x1/16	lbs	12	C\$ 303.75	C\$ 3,645.00
		suministro e instalación de Lamina de zinc de 6 pie calibre #26	m <sup>2</sup>	4.50	C\$ 280.00	C\$ 1,260.00
		Suministro e instalación de Lamina de zinc de 10 pie calibre #26	m <sup>2</sup>	4.50	C\$ 280.00	C\$ 1,260.00
<b>070</b>		<b>Puerta</b>	<b>c/u</b>			<b>C\$ 11,600.00</b>
		suministro e instalación de puerta metálica para los servicios sanitario de (0.9x2.0)	c/u	4	C\$ 2,900.00	C\$ 11,600.00
<b>080</b>		<b>ventanas</b>	<b>c/u</b>			<b>C\$ 108,400.00</b>
	1	suministro e instalación de Ventana de vidrios escarchado con marco de aluminio	c/u	60	1500	C\$ 90,000.00
	2	Protectores de ventanas metálicas	c/u	8	2300	C\$ 18,400.00
<b>090</b>		<b>Pintura</b>				<b>C\$ 69,605.52</b>
	1	Pintar pared exterior e interior	m <sup>2</sup>	1113	51.58	C\$ 57,408.54
	2	pintar protectores de (puertas y ventanas)	m <sup>2</sup>	136.34	89.46	C\$ 12,196.98
<b>100</b>		<b>Limpieza final y entrega</b>				<b>C\$ 6,306.70</b>
		Limpieza final y entrega	m <sup>2</sup>	1261.34	C\$ 5.00	C\$ 6,306.70
<b>SUB COSTO DE LA EDIFICACION</b>						<b>C\$ 289,088.16</b>
	<b>a</b>	<b>Total de Costos Directos</b>				<b>C\$ 289,088.16</b>
	<b>b</b>	<b>Administración (%sobre a)</b>		<b>0.04</b>		<b>C\$ 11,563.53</b>
	<b>c</b>	<b>Utilidades</b>		<b>0.04</b>		<b>C\$ 12,026.07</b>
	<b>d</b>	<b>Sub total (a+b+c)</b>				<b>C\$ 312,677.75</b>
	<b>e</b>	<b>Impuesto Municipal(% sobre d)</b>		<b>0.03</b>		<b>C\$ 9,380.33</b>
	<b>f</b>	<b>I.V.A</b>		<b>0.15</b>		<b>C\$ 46,983.16</b>
	<b>g</b>	<b>Precio total (d+e)</b>				<b>C\$ 369,041.25</b>

Fuente Propia.

Si consideramos los altos costos que conlleva realizar el mantenimiento a una estructura por completo debido a la oxidación del acero, estos son equiparables al costo necesario para la construcción del elemento por completo de nuevo por lo que, con las pruebas y resultados antes mostrados se considera que, si bien es cierto, el aumento en el coste de producción de concreto alcanza un tercio del original, la implementación del aditivo en la mezcla podría suponer un ahorro muy significativo en la cantidad de dinero necesaria para realizarle mantenimiento a una estructura o reemplazarla.

## VI. CAPITULO 6 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- Con base en la revisión documental y ensayo experimental con pastas de cemento, se establecieron los porcentajes de  $\text{TiO}_2$  (en relación al peso del cemento) en mezclas de concreto con relación  $a/c = 0.60$  y resistencia a la compresión de  $210\text{kg/cm}^2$ , permitiendo así, obtener valores que cumplen con las normativas de construcción que rigen en el país.
- En estado fresco, se observó que el  $\text{TiO}_2$  retardó el fraguado de las mezclas, siendo mayor en las mezclas con mayor concentración de  $\text{TiO}_2$ .
- La relación  $a/c$  empleada en la elaboración de los concretos de control fue la misma que se utilizó para los especímenes que contenían  $\text{TiO}_2$  en su mezcla. Esto no generó alteraciones o variaciones en los resultados obtenidos para las diferentes concentraciones.
- Las mezclas de concreto que contenían  $\text{TiO}_2$  redujeron su porosidad y permeabilidad en comparación con las mezclas control.
- Los valores de resistencia a la compresión de las mezclas de concreto, en ambas edades de prueba, presentan valores cercanos a los del control para concentraciones de 0.5% y 1.5% de  $\text{TiO}_2$ .
- La profundidad de carbonatación de las mezclas con 1.5% de  $\text{TiO}_2$  en comparación con la mezcla control, es menor en 2.2 veces, y en 2.70 veces con 2.5% de  $\text{TiO}_2$ . Esto indica que el proceso de carbonatación en estas mezclas, tardaría casi el triple de tiempo en realizarse, lo que extendería la vida de servicio de las estructuras de concreto reforzado.
- En las todas las mezclas con  $\text{TiO}_2$ , se redujo la capacidad de absorción de agua en comparación con la mezcla control, indicando una menor interconectividad de poros, que reduce su permeabilidad. El valor de la sorptividad de las mezclas con 2.5% de  $\text{TiO}_2$  es 3 veces menor en comparación con las mezclas control.

- Para mezclas con 1.5% de  $\text{TiO}_2$ , que presentan resistencia a compresión similares a las de control, el costo de la mezcla es mayor en un 20%. Sin embargo, su vida de servicio se duplica al reducirse su capacidad de absorción de agua y carbonatación.

## 6.2 Recomendaciones

- Dar continuidad a la investigación para el uso de diferentes alternativas en la mezcla de concreto. Considerando que los resultados demuestran que el  $\text{TiO}_2$  reduce en un bajo porcentaje su resistencia a la compresión, en nuevos estudios se hará necesario aumentar la edad de prueba de los especímenes, para determinar su efecto en casos más críticos.
- Emplear mezclas de concreto que contengan  $\text{TiO}_2$  en obras civiles y arquitectónicas, que garanticen una buena conformación del concreto, apariencia y calidad.
- Durante el proceso experimental en los estudios, emplear medios mecanizados en la elaboración de las mezclas de concreto, con el fin de garantizar la homogeneidad de las mezclas.

## VII. BIBLIOGRAFÍAS

- Agreda Sotelo, G., & Moncada Moreno, G. (2015). *VIABILIDAD EN LA ELABORACIÓN DE PREFABRICADOS EN CONCRETO*. Bogota, Colombia.
- Al, H. e. (2004). Nokken et al.
- Bernuy Chavez, G. O., & Flores Cortez, H. H. (2020). *Evaluación de las propiedades mecánicas y capacidad autolimpiable del mortero c/a 1:5 de cemento portland tipo I modificado con dióxido de titanio*. Lima, Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Cedrola, A. E. (2009). *P L 1 - DE TERMINACIÓN DE LA CURVA DE ABSORCIÓN CAPILAR DE AGUA, DE LA ABSORCIÓN POR IMERSIÓN TOTAL Y DE LA CURVA DE SECADO*.
- Chang, W. (2006). *Comparative studies of homogeneous and heterogeneous systems*. Journal of Hazardous Materials.
- Costa. (2005). *producción, clasificación, características y propiedades de los agregados*. Barranquilla, Colombia.
- Crespo Escobar, S. (2010). *Materiales de construccion para edificacion y obras civiles* . San Vicente, Alicante: Editorial club universitario .
- Datosmacro*. (2020). Obtenido de Datosmacro: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/nicaragua>
- del Valle Castría, N. (2016). *CORRELACIÓN ENTRE CARBONATACIÓN NATURAL Y ACELERADA DEL CONCRETO CON DISTINTOS CEMENTOS*. Salta, Argentina: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- DOMAT, C. M. (2023). *¿Qué es el concreto y por qué es esencial en la construcción?* Colombia.
- Donoso, D. &. (2018). *Innovación sustentable: Un camino al desarrollo productivo del Ecuador-*. Innova Research Journal.
- Fujishima, A. &. (1972). *Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode*. Grupo editorial de naturaleza.
- Global Composites*. (2022). Obtenido de Global Composites: <https://www.globalcomposites.es/glossary/dioxido-de-titanio-titanium-dioxide/>
- Gonzalez, R. G., & Tovar, D. A. (2004). *COMPARACIÓN DE UN PROCESO SOLAR DE OXIDACIÓN AVANZADA DE DIOXIDO DE TITANIO EN MICRO Y NANO ESCALA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE UN COLORANTE COMERCIAL PARA ROPA*. Universidad de Guanajuato.
- Gutarra, A. (2004). *Aplicaciones electrocrómicas y fotocatalíticas del dióxido de titanio*.

- Gutarra, A. (Enero de 2004). *ResearchGate*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/228773522>
- Guzmán, D. S. (1986). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bogota, Colombia: Bhandar editores.
- Hall, C., & Hoff, W. D. (2002). *Water Transport in Brick, Stone and Concrete*.
- Hanson. (2014). *Reducción de contaminantes atmosféricos adicionando TIO<sub>2</sub> al concreto*.
- Hernández, E. F. (2012). *PERMEABILIDAD A CLORUROS Y CARBONATACIÓN EN CONCRETO CONTENIENDO MUCÍLAGO DE NOPAL Y ALGINATO*". INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.
- Herrera, A. (2020). *NMX-C-504-2014 Determinación de la absorción capilar en concreto– Método de ensayo*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y EdificaciónHer.
- Hewlett, P. (2003). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*.
- Javier Silva, O. (2020). *360enConcreto.com*. Obtenido de 360enConcreto.com: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/concreto-fotocatalitico/>
- Jimenez, C., & Moreno, B. (2016). *Efecto del reemplazo de cemento portland por le dióxido de titanio en las propiedades mecánicas del mortero*. Cali: Pontificia Universidad Javeriana.
- LabsLand. (2022). *LabsLand.com*. Obtenido de LabsLand.com: <https://labsland.com/es/labs/titration>
- Mehta, K. y. (1998). *Concreto; Estructura, Propiedades y materiales*. México D.F: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.
- metropolitana, U. a. (2011). *Generalidades sobre el concreto en la construcción*.
- Molins. (2022). *¿Qué es la carbonatación del hormigón?* Obtenido de Molins Construction Solutions: <https://www.molins.es/construction-solutions/repuracion-proteccion-hormigon/que-es-la-carbonatacion-del-hormigon/>
- Montoya, D. J., & Manzanares, D. M. (2019). *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS DE PREFABRICADOS PARA OBRAS DE INFRAESTRUCTURA VIAL DE CONCRETO ADICIONADO CON DIOXIDO DE TITANIO*. Cundinamarca.
- Osorio, D. J. (2021). *CARBONATACIÓN DEL CONCRETO: ¿CÓMO DETECTARLA?* Colombia: ARGOS 360.
- Ospino, F. M. (2021). *Análisis de los efectos de la corrosión en el comportamiento estructural para una edificación aporticada convencional de concreto reforzado en Colombia*. Barranquilla, Colombia.
- Pérez, I. C. (2000). *Agregados*.
- RILEM. (1988). *Medición de la profundidad de carbonatación del concreto endurecido*.
- Rodriguez, A. (2015). *Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO<sub>2</sub>: Propiedades Autolimpiables*. Madrid, España: Universidad Politecnica de Madrid.

- Silvia O'Connors, I. M. (2020). *Guía de laboratorio de materiales de construcción*. Managua.
- TDMA. (2021). *Titanium dioxide manufacturs association*. Obtenido de Titanium dioxide manufacturs association: <https://www.tdma.info/es/sobre-tio2/que-es-el-dioxido-de-titanio/>
- Torrez, D. A., & Cortéz, M. K. (2013). *Contaminación por emisiones vehiculares sector residencial linda vista sur, distrito numero dos de managua*. managua.
- Usuga Montoya, J. (2015). *Emisiones contaminantes producidas por fuentes móviles que afectan la calidad del aire y medidas de control en la ciudad de Medellín*. Medellín-Colombia.
- Vidaud, E. &. (2012). *La carbonatación en el concreto reforzado. Construcción y Tecnología en concreto pag. 21-23*.
- Villar, J. D. (2020). *Efecto de la adición de dióxido de titanio en las propiedades mecánicas y de durabilidad en materiales a base de cemento*. Bogota.
- Ycaza, X. (septiembre de 2011). *civilgeeks.com*. Obtenido de <https://civilgeeks.com/2011/09/27/la-prueba-de-fenolftaleina-%E2%80%93-facil-y-util/>
- YURA. (2022). *CEMENTO YURA*. Obtenido de <https://www.yura.com.pe/blog/agregados-para-la-elaboracion-de-concreto/>

## ANEXOS



Fotografía 1 Preparación de Mezclas



Fotografía 2 Elaboración de moldes artesanales para pruebas preliminares



Fotografía 3 Primer grupo de probetas fabricadas con diseño de mezcla preliminar



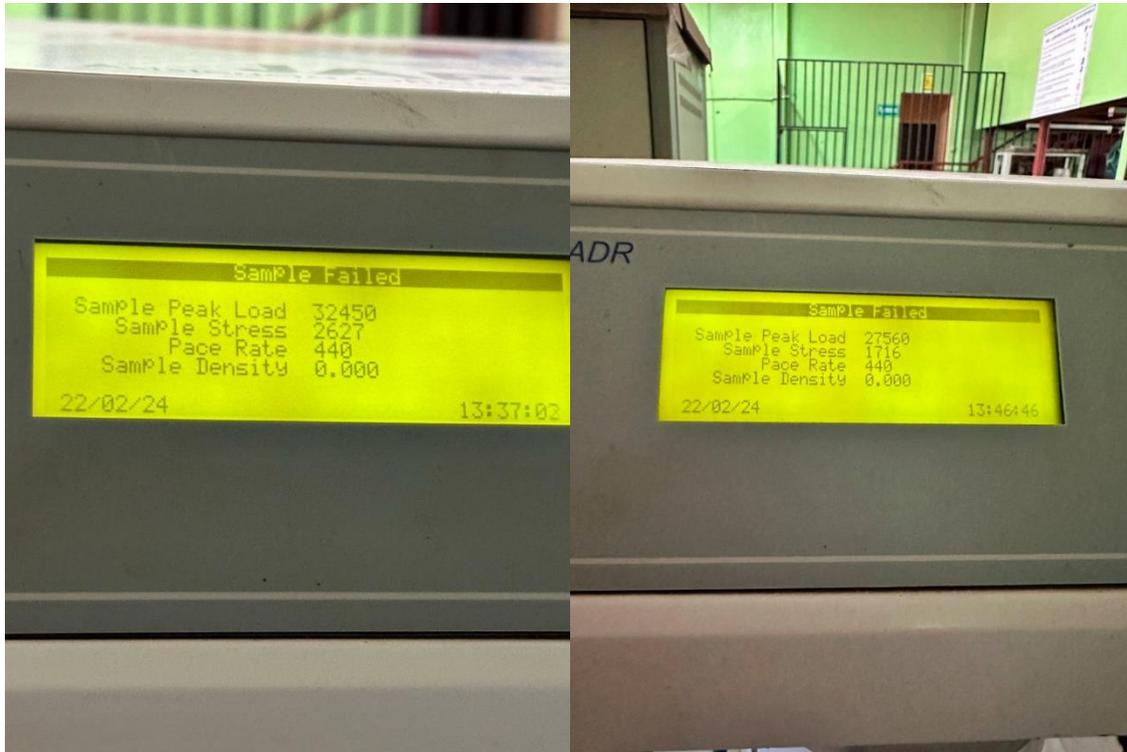
Fotografía 4 Pruebas de revenimiento



Fotografía 5 Revenimientos alcanzados durante la metodología de trabajo



Fotografía 6 Pruebas de resistencia a la compresión axial



Fotografía 7 Valores alcanzados por los especímenes de concreto sometidos a compresión axial



Fotografía 8 Corte transversal realizado a especímenes



Fotografía 9 Control de medición realizada a especímenes expuestos a dióxido de carbono



Fotografía 10 Lecturas tomadas en lugares abiertos para control de medidas ambientales



Fotografía 11 Titulación con fenolftaleína realizada a especímenes con diferentes concentraciones de dióxido de titanio