



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**Carbonatación y desarrollo de un recubrimiento inhibidor sostenible para hormigón:  
estudio en el puente San Vicente, vía Riobamba-Macas**

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil**

**Autor:**

Amaguaya Samaniego, Ítalo Joel

Villa Villa, Francis Gabriel

**Tutor:**

PhD. Cevallos Velásquez, Oscar Alfredo

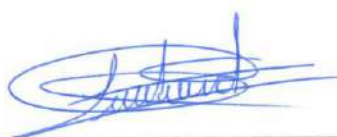
Riobamba, Ecuador. 2026

## DECLARATORIA DE AUTORÍA

Nosotros, Ítalo Joel Amaguaya Samaniego, con cédula de identidad número 0605322734 y Francis Gabriel Villa Villa, con cedula de identidad número 1600735128, autores del trabajo de investigación titulado: “CARBONATACIÓN Y DESARROLLO DE UN RECUBRIMIENTO INHIBIDOR SOSTENIBLE PARA HORMIGÓN: ESTUDIO EN EL PUENTE SAN VICENTE, VÍA RIOBAMBA-MACAS”, certificamos que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedemos a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida será de nuestra entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 27 de abril del 2026



---

Ítalo Joel Amaguaya Samaniego

C.I: 0605322734



---

Francis Gabriel Villa Villa

C.I: 1600735128



## DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

En la Ciudad de Riobamba, a los 19 días del mes de febrero de 2026, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por los estudiantes : **Italo Joel Amaguaya Samaniego** con CC: **0605322734** y **Francis Gabriel Villa Villa** con CC: **1600735128**, de la carrera Ingeniería Civil y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN titulado “**CARBONATACIÓN Y DESARROLLO DE UN RECUBRIMIENTO INHIBIDOR SOSTENIBLE PARA HORMIGÓN: ESTUDIO EN EL PUENTE SAN VICENTE, VÍA RIOBAMBA-MACAS**”, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.



Ing. Oscar Cevallos V.

TUTOR

## CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación, "CARBONATACIÓN Y DESARROLLO DE UN RECUBRIMIENTO INHIBIDOR SOSTENIBLE PARA HORMIGÓN: ESTUDIO EN EL PUENTE SAN VICENTE, VÍA RIOBAMBA-MACAS" presentado por Italo Joel Amaguaya Samaniego, con cédula de identidad número 0605322734 y Francis Gabriel Villa Villa con cedula de identidad número 1600735128, bajo la tutoría de Mg. Oscar Alfredo Cevallos Velásquez, Ph.D certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 23 días del mes de abril del 2026.

Ing. Andrea Natalí Zárate Villacres, Mgs  
PRESIDENTA DEL TRIBUNAL DE GRADO



---

Ing. Jorge Eugenio Nuñez Vivar, Mgs  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



---

Ing. Diejo Javier Barahona Rivadeneira, Mgs  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



---



## CERTIFICACIÓN

En la Ciudad de Riobamba, a los 14 días del mes de abril de 2026, el estudiante **Italo Joel Amaguaya Samaniego** con CC: **0605322734** y **Francis Gabriel Villa Villa** con CC: **1600735128**, de la carrera INGENIERÍA CIVIL. Han trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación "**Carbonatación y Desarrollo de un Recubrimiento Inhibidor Sostenible para Hormigón: Estudio en el Puente San Vicente de la Vía Riobamba- Macas**", cumple con el 7% de acuerdo con el reporte del sistema Anti plagio Compilatio, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso

Ing. Oscar Cevallos V, PhD.  
**TUTOR(A) PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

## DEDICATORIA

Primero quiero agradecer a Dios por permitirme llegar a este punto, donde todo lo que le encomendé se dio acorde a su voluntad en el tiempo que se considerara adecuado. Por los dones y talentos que me ha dado en esta larga trayectoria, como sabiduría, entendimiento y don de palabra para poder hacer todas las cosas que me he propuesto.

A mi madre Magdalena, que ha sido mi motor e impulso para poder continuar en este largo camino a pesar de las dificultades y adversidades, ha estado conmigo y me ha dado sus consejos y guías para poder continuar con este proceso, además que me ha llenado de valores y de infinito amor durante toda mi etapa de estudiante, y la quiero como un tesoro en mi vida.

A mi hermano Ismael, que muchas veces ha estado ahí para mí con juegos y mimos alegrándome el día. Es mi motivo para poder continuar con mi carrera en el ámbito profesional, quiero ser su inspiración para mantenerse en pie de lucha por lo que él quiera hacer con su futuro, y que sepa que tiene a su hermano mayor para lo que el necesite porque donde hay amor hay comprensión y un verdadero amor de hermano.

A mi padre José, por cultivar en mí virtudes y amor para poder continuar en mi camino.

A mis padrinos Fausto Vilema y Marcia Gavilánez, por acogerme como a un hijo más dentro de su familia y brindarme la oportunidad de aprender más de esta hermosa carrera e inculcarme valores para la formación de este ingeniero civil.

Y a mi padrino Carlos Tierra, que fue un gran consejero y amigo desde que decidí embarcarme en esta carrera y mostrarme lo bueno que puede haber en la vida, que con sus recomendaciones un ingeniero sale dispuesto a la vida con el apoyo de Dios y alegría en su corazón.

A mis abuelitos Juan y María, que nunca me abandonaron y estuvieron presentes en toda la etapa de mi vida estudiantil y con su amor supieron cultivar las ganas de seguir luchando por mis sueños y anhelos.

A mi amiga Cristina García, por haber llegado a mi vida en un momento donde necesitaba una amiga con quien platicar y más allá de todo, brindarme de consejos con mucho cariño y amor. Y estar presente en todo este momento en lo que fue la construcción de esta tesis aspirando a que le sirva de inspiración, y como le digo en broma espero que ella sea la madrina de mi futura hija por el cariño que le tengo y aprecio que tiene en mi corazón.

A mis amigos Byron Rojas, Henry Tiuquinga, Fernando Saltos por la amistad que me brindaron en todos estos años, los momentos que pasamos tanto en la universidad, cuando íbamos a comer y demás. Siempre los tendré en mi corazón por los consejos que me han inculcado y por ser como mi segunda familia, por cuidarme y apreciarme cuando nos conocimos.

A mi querido tutor y amigo, al ingeniero Oscar Cevallos que estuvo presente en toda la tesis y más allá del ámbito profesional fue un gran consejero y supo guiarnos como a un padre a sus hijos, y procurar que todo salga bien en todas las etapas de este trabajo. Con sus constantes recomendaciones nos inculca a mejorar muchos aspectos de nuestras vidas y encaminando a estos dos ingenieros civiles,

A mi amigo, el ingeniero Diego Hidalgo que por el pude aceptar el valor de mi nombre “Italo”, en un momento donde parecía haber perdido mi identidad estuvo ahí para construirme nuevamente, y fue la pieza más importante en este trabajo pues su idea salió a flote cuando el me la encomendó hace un año y con esfuerzo y dedicación pudimos hacerla realidad, de todo corazón Gracias.

A mi amiga, Dayana Mesache, aunque no pudimos disfrutar de esta etapa estudiantil como compañeros, fuimos grandes amigos por mucho tiempo y me ha mostrado el valor de una amistad sincera que no causa daño sino amor con el tiempo. El aprecio que le tengo es muy grande y espero poder seguir escribiéndole muchos más cuentos para que los lea, pidiéndole a Dios me permita disfrutar de su compañía y ocurrencias toda la vida, porque siempre que esta ella es como un dulce que te alegra el día y mantiene tu corazón cálido.

A mi amiga, Gabriela Uvidia, que desde que la conocí ha estado llena de ocurrencias y buenas pláticas para entrenarnos, por permitirme redescubrir un talento de enseñar, ser quien me motivo a aprender hacer planos en el tiempo que pudimos compartir. A su hermano Erick, por ser un buen amigo y llenarnos de risas cada vez que nos encontramos y a sus padres, Hugo y Laura que los encomiendan en mis manos para poder ayudarlos y demostrarme el aprecio que me tienen cada vez que los veo con un consejo y una buena plática.

A mi amiga, Daniela Cruz que la conocí desde el colegio y me da gusto saber que puedo contar con ella para cualquier cosa, el aprecio que le tengo es inmedible y espero poder pasar mucho tiempo con ella y trabajar con ella en el ámbito profesional que abarca esta carrera, gracias por mantenerte a mi lado como una buena amiga y hermana, llegaste a llenar una gran parte de mi vida cuando entraste en ella y espero te quedes ahí para siempre.

Y a mis queridas tías Sonia y Marcela, por ser alegres y muy buenas amigas para mi madre. Y por no dejarnos solos en todo este proceso, que son sus consejos y ocurrencias pudimos mantenernos a flote en esta etapa que es la vida. Y a mi tío Edison, por el aprecio que como sobrino puede transmitirme al igual que consejos y un aprecio como a un hijo y a mi prima Nayely que me acompañó en esta etapa de lo que fue la defensa de este trabajo y por la buena comunicación y relación que tenemos desde niños.

Y finalmente, a quien me acompañó en este proceso como un hermano desde hace tres años cuando llego a mi vida, a mi amigo Francis Villa que, en las adversidades, en las buenas y en las malas estuvimos juntos para sacar este proyecto que nos propusimos el día que nos conocimos, esperando que esta amistad se pule cada día y nos permita compartir muchos más momentos fuera de la universidad. Le agradezco a la vida que le puso en mi camino y mostrarme que no se le puede decir amigo a cualquier persona sino aquel que se mantiene a tu lado por más que todo parezca irse en contra y juegue boliche contigo a pesar de perder todo el tiempo. Gracias por la amistad que pudimos sembrar.

Y en fin, simplemente Roderick ;D

**Italo**

## DEDICATORIA

Primeramente, a Dios, fuente de luz, sabiduría y amor infinito, dedico este trabajo, en cada paso de mi camino, ha estado presente, guiándome y sosteniéndome.

A mis queridos padres Carlos y Elizabeth, quienes han sido mi soporte y apoyo incondicional a lo largo de este viaje académico, su perseverancia, paciencia, sacrificio y amor han sido mi mayor inspiración, gracias por creer en mí y por ser mi faro en las tormentas.

A mis hermanos Carlos Ariel y Jamileth Alejandra, quienes han sido coparticipes de alegrías, aventuras y tristezas a lo largo de mi vida y en este camino universitario, que llega a su final.

A mi familia en especial a mis abuelitos William, Blanca y Lourdes, y mi madrina Gladys, tíos y primos es especial a Erick, Javier y Andrés, cuyas historias y sabiduría han enriquecido mi vida y mi perspectiva, su cariño y aliento han sido fundamentales en mi trayectoria, que esta tesis sea un homenaje a su compañía y los momentos compartidos en esta travesía llamada vida.

A mis amigos del barrio en donde he vivido mi infancia y época del colegio a Javier, Cristian, Jair, y a los que hice en la universidad a Dennys, Byron, Henry, Fernando, Kevin, Christian, Claudia, Mar, Guillermo, que han sido los compañeros de ruta más valiosos, con quienes los días grises se transformaron en arcoíris y las preocupaciones en anécdotas, a ustedes, con quienes he compartido risas, secretos y aventuras, les dedico este logro, que sigamos escribiendo historias juntos.

A mi mascota Benito, que suene raro, pero ha sido mi apoyo emocional en esta etapa.

Por último, a Italo, mi compañero de tesis, que desde el inicio y hasta el último estuvimos en las buenas y en las malas, a pesar de los bajos y altos, tanto fuera y dentro del ámbito académico, formamos una sincera amistad.

Esta tesis está dedicada a todos ustedes, con gratitud y sincero afecto, cada paso en este camino académico lleva la huella de su cariño y apoyo.

**Francis**

## **AGRADECIMIENTO**

En esta parte quisiera reconocer el valor de mantener una fe constante en las manos de Dios para poder realizar las cosas, que sin el nada de esto pudo haber sucedido.

A las técnicas del laboratorio de ingeniería Civil, la ingeniera Cristina Polo y Mishell Toledo que nos apoyaron en todos los ensayos de este estudio, a Don Héctor Pala que nos apoyó durante nuestra trayectoria hasta Macas para la extracción de núcleos y por la amistad que pudimos forjar en el camino.

Y a la técnica del laboratorio de química, la doctora Nancy que fue como una madre para nosotros mientras nos divertíamos en el laboratorio con los ensayos que hacíamos, y la paciencia que nos tuvo no tiene valor.

A nuestro tutor, el ingeniero Oscar Cevallos con quien pudimos conocernos más allá del ámbito profesional y consideramos un amigo, por el seguimiento arduo que le dio a nuestro trabajo a pesar de las adversidades nos guio y supimos ganarnos su confianza.

A todos mis amigos, Cristina, Dayana, Byron, Henry, Fernando por apoyarme a continuar con esta travesía tanto en los ensayos de esta tesis, y espero se mantengan a mi lado para toda la vida.

Y nuevamente a mi amigo Francis por ser el confiable amigo con quien pudimos mantenernos a flote en sacar este tema de investigación hasta que lo conseguimos y ahora podemos decir que lo logramos y ya somos ingenieros.

Y a la vida por permitirme aprender y disfrutar de esta bonita etapa en conjunto con el apego de Dios para poder hacer las cosas y los incontables amigos que pude conocer hasta llegar a este punto.

**Italo**

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero empezar agradeciéndole a Dios por darme salud, vida, valor y colocar a las personas correctas en mi vida durante todo este proceso.

A mis padres y hermanos ya que sin su apoyo, valores y compañía nada de esto sería posible, cada sacrificio y cada esfuerzo que han hecho por apoyarme ha sido un regalo que no puedo medir con palabras.

Al ingeniero Oscar Cevallos por su paciencia y orientación, gracias por compartir sus conocimientos, por las correcciones minuciosas y por su compromiso constante como tutor y docente.

A las ingenieras Cristina Polo, Mishell Toledo y al técnico Héctor Pala quienes desde el primer día en laboratorio supieron guiarnos, apoyarnos y aconsejarnos para salir adelante con cada duda o problema que pudiésemos presentar.

Agradezco a mi familia que siempre ha sido un pilar fundamental en mi vida, a mis abuelitos, mi madrina, tíos y primos, por incentivar me en mis estudios y mostrarme que con esfuerzo todo se consigue.

Finalmente agradezco a mi compañero de tesis Italo que tomó este desafío junto a mí y me apoyo a lo largo de todo el proceso y por último a mis amigos que siempre estuvieron prestos a escucharme y motivarme a salir adelante.

**Francis**

## INDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

1.	CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	24
1.1.	Planteamiento del problema.....	25
1.2.	Justificación .....	26
1.3.	Objetivos.....	27
1.3.1.	Objetivo general .....	27
1.3.2.	Objetivos específicos .....	27
1.4.	Alcances y limitaciones .....	28
2.	CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	29
2.1.	El hormigón armado y su durabilidad .....	29
2.2.	Mecanismos de deterioro del hormigón .....	29
2.3.	Carbonatación del hormigón.....	30
2.4.	Factores que influyen en la carbonatación.....	30
2.5.	Profundidad de carbonatación.....	31
2.6.	Interpretación del grado de carbonatación del hormigón .....	32
2.7.	Fenolftaleína como método de evaluación .....	32
2.8.	Relación entre carbonatación y resistencia a compresión .....	33

2.9.	Recubrimientos protectores del hormigón.....	33
2.10.	Sílice de cáscara de arroz como material puzolánico.....	33
3.	CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	35
3.1.	Tipo de investigación.....	35
3.2.	Enfoque de la investigación.....	35
3.3.	Alcance de la investigación.....	35
3.4.	Diagrama de la metodología.....	36
3.5.	Nivel y diseño de investigación.....	36
3.6.	Área de estudio.....	36
3.7.	Población y muestra.....	37
3.7.1.	Población.....	37
3.7.2.	Muestra.....	37
3.8.	Variables de investigación.....	37
3.8.1.	Variable independiente.....	37
3.8.2.	Variables dependientes.....	37
3.8.3.	Variables de control.....	37
3.9.	Materiales, equipos y herramientas empleadas.....	38
3.9.1.	Materiales para elaboración de probetas de hormigón.....	38
3.9.2.	Materiales para obtención de sílice y elaboración del recubrimiento.....	39
3.9.3.	Materiales para ensayos de carbonatación acelerada.....	39
3.10.	Equipos principales.....	39
3.10.1.	Esclerómetro tipo Schmidt, ASTM C805/C805M [18].....	39
3.10.2.	Equipo de perforación con corona diamantada, ASTM C42/C42M [9].....	40
3.10.3.	Prensa hidráulica para ensayos de compresión, ASTM C39/C39M [19].....	40
3.10.4.	Calibrador digital (pie de rey).....	40
3.10.5.	Balanza.....	40
3.10.6.	Moldes metálicos para probetas de 10 × 20 cm.....	40

3.10.7.	Herramientas de soporte.....	40
3.11.	Equipos de seguridad y apoyo operativo .....	41
3.11.1.	Equipos de protección personal (EPP).....	41
3.11.2.	Elementos de delimitación en campo .....	41
3.12.	Conformación de grupos experimentales y tiempos de exposición .....	41
3.12.1.	Grupo 1: Grupo de control .....	41
3.12.2.	Grupo 2: Probetas sin recubrimiento .....	41
3.12.3.	Grupo 3: Probetas con recubrimiento inhibidor .....	41
3.13.	Procedimiento general de investigación .....	42
3.13.1.	Análisis comparativo para la selección del puente objeto de estudio .....	42
3.13.2.	Cantidad y accesibilidad de elementos de hormigón armado .....	43
3.13.3.	Condiciones de seguridad y operación en campo.....	43
3.13.4.	Viabilidad técnica para extracción de núcleos .....	44
3.13.5.	Representatividad para el estudio de carbonatación .....	44
3.14.	Ensayo no destructivo con esclerómetro. ....	44
3.15.	Ensayo de Extracción de núcleos. ....	45
3.15.1.	Extracción, conservación y preparación de núcleos de hormigón.....	46
3.16.	Ensayo de Resistencia a compresión de núcleos y cilindros. ....	46
3.17.	Ensayo de carbonatación acelerada .....	47
3.17.1.	Preparación de las probetas .....	47
3.17.2.	Sistema de generación de atmósfera artificial de carbonatación.....	48
3.17.3.	Condiciones ambientales de exposición .....	48
3.17.4.	Renovación del dióxido de carbono.....	49
3.17.5.	Tiempos de exposición.....	49
3.17.6.	Medición de la profundidad de carbonatación .....	49
3.18.	Obtención de sílice a partir de cáscara de arroz .....	50
3.19.	Elaboración del recubrimiento inhibidor sostenible.....	50

3.20.	Fabricación y curado de cilindros .....	51
3.21.	Referencia conceptual para la interpretación de la carbonatación acelerada.....	51
3.21.1.	Nivel de carbonatación superficial (Referencial) .....	53
3.21.2.	Nivel de carbonatación intermedia (Referencial) .....	53
3.21.3.	Nivel de carbonatación alta (Referencial) .....	53
3.22.	Ensayo de carbonatación acelerada definitiva (ISO 1920-12).....	54
3.23.	Medición de profundidad de carbonatación con fenolftaleína (RILEM CPC-18) 55	
3.24.	Consideraciones éticas y de seguridad .....	55
3.25.	Delimitación del alcance metodológico.....	55
3.26.	Pruebas estadísticas empleadas .....	55
3.26.1.	Análisis de Varianza (ANOVA).....	55
3.26.2.	Prueba post hoc de Tukey (HSD) .....	56
3.26.3.	Coefficiente de correlación de Pearson.....	56
3.26.4.	Coefficiente de correlación de Spearman.....	57
3.26.5.	Nivel de significancia .....	57
4.	CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	58
4.1.	Consideraciones generales del análisis .....	58
4.2.	Resultados de la carbonatación acelerada en probetas de laboratorio.....	59
4.3.	Influencia de la carbonatación en la resistencia a compresión de las probetas....	62
4.4.	Análisis de variación porcentual de la profundidad de carbonatación .....	66
4.5.	Análisis de variación porcentual de la resistencia a compresión .....	67
4.6.	Evaluación diagnóstica de los núcleos extraídos del Puente San Vicente.....	68
4.7.	Carbonatación en núcleos del puente: análisis sin correlación .....	69
4.8.	Análisis estadístico mediante ANOVA .....	71
4.8.1.	Análisis de la variación de la profundidad de carbonatación (mm) para los grupos evaluados. ....	71

4.8.2.	Análisis de la variación de la resistencia a compresión (MPa) para los grupos evaluados.....	73
4.9.	Análisis post hoc de Tukey – Profundidad de carbonatación .....	76
4.10.	Análisis post hoc de Tukey – Resistencia a compresión .....	77
4.11.	Resultados del análisis post hoc .....	79
4.12.	Análisis de correlación entre profundidad de carbonatación y resistencia .....	79
5.	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	82
5.1.	Conclusiones .....	82
5.2.	Recomendaciones .....	85
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	87
7.	ANEXOS.....	90

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Resultados de profundidad de carbonatación en probetas sometidas a carbonatación acelerada.....	59
<b>Tabla 2:</b> Esfuerzos a Compresión (MPa) y Profundidad de carbonatación promedio (mm) de las probetas ensayadas en el laboratorio.....	63
<b>Tabla 3:</b> Variación porcentual de la profundidad de carbonatación por grupos de exposición .....	66
<b>Tabla 4:</b> Variación porcentual de la resistencia a compresión por grupos de exposición ...	67
<b>Tabla 5:</b> Comparación entre la resistencia estimada por esclerómetro y la resistencia determinada por ensayo de compresión en núcleos. ....	68
<b>Tabla 6:</b> Resultados del nivel de carbonatación (mm) de los núcleos del puente San Vicente .....	70
<b>Tabla 7:</b> Medias y varianzas de la profundidad de carbonatación (mm) para los grupos evaluados.....	72
<b>Tabla 8:</b> Medias y varianzas de la resistencia a compresión (MPa) para los grupos evaluados. ....	74
<b>Tabla 9:</b> Análisis ANOVA de los resultados de Resistencia a compresión (MPa) y Profundidad de carbonatación promedio (mm) de las probetas ensayadas.....	75
<b>Tabla 10:</b> Análisis post hoc de Tukey para profundidad de carbonatación .....	76
<b>Tabla 11:</b> Análisis post hoc de Tukey para resistencia a compresión .....	78
<b>Tabla 12:</b> Resultados de la aplicación de las pruebas de correlación estadística entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión .....	80
<b>Tabla 13:</b> Valores del esclerómetro en el primer estribo lado derecho. ....	94
<b>Tabla 14:</b> Valores del esclerómetro en el primer estribo lado izquierda. ....	94
<b>Tabla 15:</b> Valores del esclerómetro en el segundo estribo lado derecha. ....	95
<b>Tabla 16:</b> Valores del esclerómetro en el segundo estribo lado izquierda.....	95
<b>Tabla 17:</b> Valores del esclerómetro en la berma lado derecha.....	95
<b>Tabla 18:</b> Medición de profundidad de carbonatación con la fenolftaleína con el pie de rey en 4 puntos diferentes y el promedio. ....	98
<b>Tabla 19:</b> Resultados de la resistencia a compresión de los núcleos. ....	101
<b>Tabla 20:</b> Diferencia de la resistencia a compresión con esclerómetro y prensa hidráulica de los núcleos. ....	102
<b>Tabla 21:</b> Pesos obtenidos en sílice del martes 05 de agosto de 2025. ....	111

<b>Tabla 22:</b> Pesos obtenidos en sílice del miércoles 06 de agosto de 2025.....	111
<b>Tabla 23:</b> Pesos obtenidos en sílice del jueves 07 de agosto de 2025.....	111
<b>Tabla 24:</b> Pesos obtenidos en sílice del viernes 08 de agosto de 2025. ....	112
<b>Tabla 25:</b> Medición de profundidad de carbonatación con la fenolftaleína con el pie de rey en 4 puntos y el promedio. ....	123
<b>Tabla 26:</b> Alturas, dimensiones, promedios respectivamente de los cilindros, con el tipo de falla.....	126
<b>Tabla 27:</b> Resultados de la resistencia a compresión de los cilindros.....	127

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Diagrama de flujo de la metodología para el proyecto de investigación.....	36
<b>Figura 2:</b> Comparación de la profundidad de carbonatación en probetas con y sin recubrimiento bajo carbonatación acelerada. ....	61
<b>Figura 3:</b> Comparación de la resistencia a compresión probetas con y sin recubrimiento bajo carbonatación acelerada. ....	65
<b>Figura 4:</b> Comparación entre resistencia por esclerómetro y resistencia por rotura de núcleos.....	69
<b>Figura 5:</b> Profundidad de Carbonatación (mm) de núcleos extraídos del puente San Vicente .....	71
<b>Figura 6:</b> Medias de profundidad de carbonatación (mm) con su desviación estándar (mm). ....	73
<b>Figura 7:</b> Medias de resistencia a compresión (MPa) con su desviación estándar (MPa)..	74
<b>Figura 8:</b> Profundidad de carbonatación (mm) vs Resistencia a compresión (MPa) .....	80
<b>Figura 9:</b> Anclaje del extractor de núcleos al elemento con pernos mecánicos. ....	91
<b>Figura 10:</b> Detector de acero de refuerzo.....	91
<b>Figura 11:</b> Extracción del núcleo.....	92
<b>Figura 12:</b> Núcleo extraído.....	92
<b>Figura 13:</b> Ensayo con el esclerómetro, ángulo de 90°.....	93
<b>Figura 14:</b> Corte del núcleo transversalmente.....	96
<b>Figura 15:</b> Colocación de la fenolftaleína.....	97
<b>Figura 16:</b> Medición de profundidad de carbonatación con la fenolftaleína con el pie de rey. ....	97
<b>Figura 17:</b> Peso y dimensión de los núcleos. ....	99
<b>Figura 18:</b> Alineación vertical.....	100
<b>Figura 19:</b> Resistencia a compresión de los núcleos. ....	100
<b>Figura 20:</b> Rotura de los núcleos.....	101
<b>Figura 21:</b> Cantera Cerro Negro.....	103
<b>Figura 22:</b> Ripio triturado.....	104
<b>Figura 23:</b> Polvo de piedra.....	104
<b>Figura 24:</b> Cemento.....	104
<b>Figura 25:</b> Mezclado de materiales.....	105
<b>Figura 26:</b> Aplicación de aceite quemado en los moldes.....	106

<b>Figura 27:</b> Llenado de los moldes. ....	106
<b>Figura 28:</b> Proceso de molienda mecánica.....	107
<b>Figura 29:</b> Crisoles cerámicos .....	108
<b>Figura 30:</b> Mufla a 700°.....	108
<b>Figura 31:</b> Obtención de la sílice después de 8 horas en la mufla a 700°.....	109
<b>Figura 32:</b> Preparación del ácido clorhídrico. ....	109
<b>Figura 33:</b> Mezcla de la sílice con el ácido clorhídrico. ....	109
<b>Figura 34:</b> Plancha agitadora.....	110
<b>Figura 35:</b> Extracción del ácido clorhídrico con el agua destilada en la maquina extractora de vacíos. ....	110
<b>Figura 36:</b> Secado y obtención de sílice para el recubrimiento sostenible propuesto. ....	111
<b>Figura 37:</b> 100 gramos de sílice. ....	113
<b>Figura 38:</b> 50 gramos de maicena.....	113
<b>Figura 39:</b> Mezcla de la sílice, maicena y silicato de sodio a 5°.....	114
<b>Figura 40:</b> Colocación del inhibidor en los cilindros. ....	115
<b>Figura 41:</b> Ensayo de prueba con la fenolftaleína. ....	117
<b>Figura 42:</b> Fundas de polietileno con cierre hermético y tanque de CO <sub>2</sub> . ....	119
<b>Figura 43:</b> Inyección diaria del CO <sub>2</sub> en las fundas de polietileno con cierre hermético...	119
<b>Figura 44:</b> Medición de profundidad de carbonatación con la fenolftaleína con el pie de rey. ....	122
<b>Figura 45:</b> Peso y dimensión de los núcleos. ....	124
<b>Figura 46:</b> Alineación vertical. ....	125
<b>Figura 47:</b> Resistencia a compresión de los cilindros.....	125

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1:</b> Extracción y preparación de núcleos de hormigón del puente San Vicente (ASTM C42/C42M).....	90
<b>Anexo 2:</b> Ensayo no destructivo con esclerómetro tipo Schmidt (ASTM C805/C805M) ..	93
<b>Anexo 3:</b> Medición de profundidad de carbonatación con fenolftaleína (RILEM CPC-18) .....	96
<b>Anexo 4:</b> Ensayo de resistencia a compresión de núcleos y cilindros (ASTM C39/C39M) .....	99
<b>Anexo 5:</b> Fabricación y curado de probetas cilíndricas de hormigón (ASTM C31/C31M) .....	103
<b>Anexo 6:</b> Proceso de obtención de sílice a partir de cáscara de arroz.....	107
<b>Anexo 7:</b> Formulación y aplicación del recubrimiento inhibidor sostenible .....	113
<b>Anexo 8:</b> Ensayo preliminar de carbonatación acelerada: definición de tiempos de exposición.....	116
<b>Anexo 9:</b> Diseño experimental del ensayo definitivo de carbonatación acelerada (ISO 1920-12) .....	118
<b>Anexo 10:</b> Registro dimensional y resultados de resistencia a compresión de cilindros ..	124

## RESUMEN

En la presente investigación se evaluó el efecto de la carbonatación sobre la resistencia a compresión del hormigón y se analizó la eficacia de un recubrimiento inhibidor sostenible elaborado a partir de sílice de cáscara de arroz, aplicado con el fin de reducir la penetración de dióxido de carbono en estructuras de hormigón armado. Para ello, se extrajeron núcleos del puente San Vicente, ubicado en la vía Riobamba–Macas, con el objetivo de determinar su resistencia a compresión y profundidad de carbonatación mediante el uso de fenolftaleína. De manera que, se fabricaron probetas cilíndricas de hormigón con y sin recubrimiento superficial, mismas que fueron expuestas a carbonatación acelerada en una cámara con dióxido de carbono durante 14, 28 y 35 días. Luego, se aplicaron ensayos de resistencia a compresión y mediciones del frente carbonatado para evaluar el comportamiento mecánico del material tras ser sometidos en una atmósfera rica en CO<sub>2</sub>. Los resultados evidenciaron que la carbonatación influye en las propiedades del hormigón, y a la par la aplicación del recubrimiento a base de sílice de cáscara de arroz redujo la penetración del dióxido de carbono y mejorar el rendimiento del material frente a este fenómeno. Se incluye la aplicación de un análisis estadístico con pruebas como ANOVA [5] y Tukey que señalen diferencias significativas entre las probetas con tratamiento aplicado y no tratadas, corroborando así la eficiencia del recubrimiento para ser una alternativa viable que reduzca el avance de la carbonatación en el hormigón. Con los resultados del estudio se resalta el uso de la sílice de cáscara de arroz como un recubrimiento sostenible para mejorar la durabilidad del hormigón armado y proporcionar una alternativa ecológica viable que beneficie el cuidado para estructuras localizadas en ambientes agresivos.

**Palabras clave:** carbonatación en hormigón, resistencia a compresión, durabilidad estructural, sílice de cáscara de arroz, recubrimiento inhibidor, hormigón armado, carbonatación acelerada.

## ABSTRACT

This research evaluated the effect of carbonation on concrete compressive strength and analyzed the effectiveness of a sustainable inhibitor coating made from rice husk silica, applied to reduce carbon dioxide penetration into reinforced concrete structures. Cores were extracted from the San Vicente Bridge on the Riobamba–Macas highway to determine its compressive strength and carbonation depth using phenolphthalein. Simultaneously, cylindrical concrete specimens, both with and without the coating, were prepared and subjected to accelerated carbonation in a carbon dioxide chamber for 14, 28, and 35 days. Subsequently, compressive strength tests and carbonation depth measurements were performed to evaluate the material's mechanical behavior. The results showed that carbonation influences concrete properties, while applying a rice husk silica-based coating reduced carbon dioxide penetration and improved the material's performance against this phenomenon. Furthermore, statistical analysis using ANOVA and Tukey's test identified significant differences between treated and untreated specimens, confirming the coating's effectiveness as a viable alternative for mitigating carbonation. This research demonstrates the potential of rice husk silica as a sustainable coating, improving the durability of reinforced concrete and providing an efficient technical alternative for protecting structures exposed to aggressive environments.

**Keywords:** concrete carbonation, compressive strength, structural durability, rice husk silica, inhibitor coating, reinforced concrete, accelerated carbonation.



**Reviewed by:**

Mgs. Jessica María Guaranga Lema

**ENGLISH PROFESSOR**

C.C. 0606012607

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El hormigón armado constituye uno de los materiales más utilizados en la infraestructura vial del Ecuador, especialmente en la construcción de puentes, debido a su adecuada resistencia mecánica, durabilidad y facilidad de ejecución. No obstante, a pesar de estas ventajas, las estructuras de hormigón armado se encuentran expuestas de manera permanente a diversos mecanismos de deterioro que pueden comprometer su vida útil, entre los cuales la carbonatación del hormigón representa uno de los procesos más relevantes en ambientes naturales [1]

La carbonatación es un fenómeno físico - químico que ocurre cuando el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente en la atmósfera penetra a través de la red porosa del hormigón y reacciona con los productos de hidratación del cemento, particularmente con el hidróxido de calcio, provocando una disminución progresiva del pH. Esta reducción de la alcalinidad favorece el desgaste de la capa protectora superficial del acero de refuerzo, generando condiciones propicias para el inicio de procesos corrosivos que afectan directamente la capacidad estructural de los elementos de hormigón armado [2]

En estructuras como los puentes vehiculares, el avance del frente de carbonatación resulta especialmente crítico, ya que estos elementos se encuentran sometidos a condiciones ambientales variables, ciclos de humedad y secado, así como a la acción continua de agentes contaminantes. Al superarse el espesor del recubrimiento del acero por efecto de la carbonatación, el efecto de protección del hormigón se pierde a la par que el riesgo de corrosión en la armadura se incrementa, generando deterioro progresivo en la estructura [3]

Evaluar la profundidad de carbonatación y la vinculación que tiene con la resistencia mecánica del hormigón permite establecer criterios objetivos para evaluar el estado de degradación y estimar la durabilidad remanente del material hasta de la misma estructura. Continuando así con el desarrollo de soluciones sostenibles y de bajo impacto ambiental orientadas a reducir el avance de la carbonatación que han adquirido una creciente relevancia en la ingeniería civil moderna [1]

En los últimos años, el aprovechamiento de residuos agroindustriales ha despertado un notable interés como alternativa para la obtención de materiales con propiedades protectoras y ambientales favorables. La cáscara de arroz, debido a su elevado contenido de sílice amorfa, representa una fuente potencial para la elaboración de recubrimientos capaces

de reducir la permeabilidad del hormigón y limitar el ingreso de agentes agresivos, contribuyendo así a mejorar su durabilidad [4].

Para este estudio seleccionamos el puente San Vicente, en la vía Riobamba–Macas. Su diseño, la facilidad de acceso y el predominio de elementos de hormigón armado lo convierten en un caso óptimo para analizar el avance de la carbonatación. El trabajo parte de la extracción de núcleos directamente de la estructura, para continuar con la fabricación de cilindros de hormigón, dividiéndolos en dos grupos: unos protegidos con un recubrimiento a base de sílice de cáscara de arroz y otros sin tratamiento superficial. Y la aplicación de una carbonatación acelerada en una atmósfera controlada de CO<sub>2</sub> a todas las probetas, para finalmente medir su resistencia a compresión y cuantificar la profundidad de carbonatación en cada muestra.

Se considera la aplicación de un estudio analítico estadístico con pruebas ANOVA [5] y Tukey que se complementan con coeficiente de correlación como Pearson y Spearman [5], [6] para definir relaciones en el hormigón entre la profundidad de carbonatación y su comportamiento mecánico. El enfoque permite pasar de una observación empírica hacia una validación mediante sustentación numérica y que se dé por hecho la efectividad del recubrimiento sostenible a base de sílice de cáscara de arroz frente al avance de la carbonatación y se llegue a mitigar su efecto en obras viales como puentes viales existentes.

### **1.1. Planteamiento del problema**

Las estructuras de hormigón armado que conforman la red vial del Ecuador se encuentran expuestas de forma continua a condiciones ambientales que favorecen la aparición de mecanismos de deterioro, entre los cuales la carbonatación del hormigón constituye uno de los más frecuentes. Este fenómeno afecta progresivamente las propiedades químicas del material, disminuyendo su alcalinidad y comprometiendo la protección natural del acero de refuerzo [3].

En la provincia de Chimborazo y en el tramo vial Riobamba–Macas, existen diversas estructuras de paso construidas principalmente con elementos de hormigón armado, muchas de las cuales presentan signos visibles de envejecimiento y deterioro superficial. Sin embargo, la evaluación del grado de carbonatación en estas estructuras no siempre ha sido analizada de manera experimental, lo que dificulta la toma de decisiones técnicas relacionadas con mantenimiento y rehabilitación, de acuerdo con el ACI 562-19 [7].

El puente San Vicente fue seleccionado como objeto de estudio tras una evaluación preliminar de varias estructuras cercanas, debido a que presenta una mayor cantidad de elementos estructurales de hormigón armado, condiciones adecuadas de accesibilidad para la toma de datos y viabilidad técnica para la extracción de núcleos de hormigón. Estas características permitieron el desarrollo de ensayos destructivos y no destructivos bajo condiciones controladas.

La ausencia de tratamientos protectores sostenibles aplicados en este tipo de infraestructuras de hormigón evidencia la necesidad de investigar alternativas prácticas que permitan reducir el avance de la carbonatación. Para esto, el uso de recubrimientos a base de sílice obtenida de residuos agroindustriales como la cáscara de arroz, representa una opción eficaz de una manera técnica, ambiental y viable económicamente [8].

Con estos indicios se plantea cuantificar el efecto de la carbonatación sobre la resistencia a compresión del hormigón en el puente San Vicente y promover la eficiencia del recubrimiento inhibidor sostenible propuesto por medio de ensayos controlados en laboratorio, lo que brinde un sustento cuantitativo que establezca relación entre el frente carbonatado y el comportamiento mecánico del material.

## **1.2. Justificación**

La presente investigación se justifica debido a la importancia que representa el análisis de la durabilidad del hormigón armado en estructuras viales existentes. La carbonatación constituye uno de los principales mecanismos de deterioro del hormigón, especialmente en estructuras expuestas a condiciones ambientales variables, como es el caso de los puentes vehiculares [1].

La investigación permite evaluar de manera técnica el progreso de la carbonatación y su incidencia en la resistencia a compresión del hormigón, empleando ensayos destructivos y no destructivos normalizados para contrastar propiedades mecánicas. Al extraer núcleos del puente San Vicente los datos que se llegan a proporcionar condiciones reales de fabricación, curado y exposición ambiental de la estructura, reforzando la validez los resultados de acuerdo con la norma ASTM C42/C42M [9].

Científicamente, la investigación aporta al conocimiento sobre el uso de materiales alternativos de origen agroindustrial, específicamente la sílice obtenida de la cáscara de arroz, como componente de un recubrimiento inhibidor sostenible. El desarrollo experimental del recubrimiento y su evaluación comparativa en especímenes con y sin

tratamiento permiten analizar su efectividad frente a la carbonatación del hormigón, contribuyendo al estudio de nuevas soluciones para mejorar la durabilidad de las estructuras [4].

En beneficio del ambiente, se promueve la transformación de un residuo agroindustrial a un recurso útil para el desarrollo de la ingeniería moderna, induciendo así que el volumen de cascara de arroz termine convirtiéndose en una fuente de sílice para recubrimientos protectores y sostenibles, encaminando a una práctica constructiva más ecológica y responsable [4].

De forma metodológica se sustenta la aplicación de procedimientos experimentales respaldadas por normativas técnicas como ASTM, RILEM y ACI reconocidas de manera internacional, fortaleciendo la garantía, comparabilidad y validez de los resultados, mismo que promueven una base para futuras investigaciones para mejorar la durabilidad del hormigón por medio de recubrimientos sostenibles.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Evaluar el impacto de los niveles de carbonatación y la resistencia a compresión, inducidos de manera acelerada y analizar la eficacia de un recubrimiento a base de sílice extraída de cáscara de arroz en el puente San Vicente de la vía Riobamba-Macas.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar el nivel de carbonatación del hormigón en un puente San Vicente de la vía Riobamba-Macas mediante ensayos in situ y extracción de núcleos.
- Evaluar la resistencia a compresión de los núcleos extraídos del puente San Vicente en laboratorio.
- Desarrollar un recubrimiento a base de sílice extraída de cáscara de arroz y aplicarlo sobre probetas de hormigón.
- Inducir procesos de carbonatación acelerada en probetas con y sin recubrimiento para analizar su efecto protector.
- Comparar la resistencia a compresión y la profundidad de carbonatación entre las probetas tratadas con el recubrimiento y las no tratadas.

#### **1.4. Alcances y limitaciones**

La presente investigación se desarrolló mediante un estudio experimental aplicado, considerando núcleos extraídos del puente San Vicente y cilindros de hormigón elaborados en laboratorio. El análisis se centró en la evaluación del fenómeno de carbonatación y su influencia sobre la resistencia a compresión del hormigón, así como en la eficacia de un recubrimiento sostenible a base de sílice de cáscara de arroz.

La limitación que este estudio llega a tener es la medición de la profundidad de carbonatación mediante una prueba de fenolftaleína, esto sin abordar la cuantificación directa de la velocidad de corrosión del acero pues no se considera aplicar ensayos electroquímicos ni extracción de acero de la estructura estudiada. Y, los resultados obtenidos reflejan un comportamiento observado por las condiciones de experimentación ya fijadas y deberían interpretarse con precaución al proyectarlos a estructuras que llegasen a presentar características similares.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. El hormigón armado y su durabilidad

El hormigón armado es uno de los materiales estructurales más empleados en obras civiles debido a su elevada resistencia a compresión, su versatilidad constructiva y su adecuada interacción con el acero de refuerzo. Sin embargo, el comportamiento del hormigón no debe evaluarse únicamente en función de su resistencia inicial, sino también considerando su capacidad para mantener sus propiedades mecánicas y funcionales durante su vida útil bajo condiciones ambientales específicas [1].

Según el ACI 222R-11 [10], la durabilidad que posee el hormigón se entiende como su capacidad para mantener su integridad, conservando así su desempeño estructural por mucho tiempo y sin desgaste aparente tras la constante exposición ambiental que puede conllevar ataques químicos y físicos. Siendo estructuras como puentes las principales estructuras de análisis crítico donde esta propiedad adquiere importancia, esto ante la constante acción de agentes agresivos y elevados costos de reparaciones complejas cuando el daño ha empezado y la durabilidad inicia a correr riesgo.

Diversos estudios indican que una deficiente durabilidad puede generar pérdidas económicas significativas, así como riesgos asociados a la seguridad estructural, razón por la cual el análisis de los mecanismos de deterioro del hormigón constituye un aspecto fundamental dentro de la ingeniería civil moderna [4].

### 2.2. Mecanismos de deterioro del hormigón

El deterioro del hormigón armado puede producirse mediante distintos mecanismos, los cuales pueden actuar de forma individual o combinada. Entre los más comunes se encuentran la penetración de cloruros, la carbonatación, los ciclos de humedad y secado, el ataque químico y la corrosión del acero de refuerzo [11].

Dentro de estos mecanismos, la carbonatación se presenta con mayor frecuencia en ambientes urbanos y rurales, donde el dióxido de carbono se encuentra de forma permanente en la atmósfera. A diferencia del ataque por cloruros, la carbonatación es un proceso lento y progresivo, pero puede resultar igualmente perjudicial cuando alcanza el recubrimiento del acero [12].

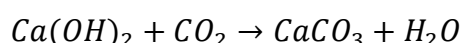
La importancia de este fenómeno radica en que la corrosión del acero no se inicia directamente por la presencia del  $\text{CO}_2$ , sino por la reducción de la alcalinidad del hormigón,

condición necesaria para la pérdida de la capa pasiva que protege al refuerzo, según la norma ACI 222R-11 [10].

### **2.3. Carbonatación del hormigón**

La carbonatación del hormigón es un proceso químico que ocurre cuando el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) difunde a través de los poros del material y reacciona con los productos alcalinos generados durante la hidratación del cemento, principalmente el hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ) [1].

Esta reacción puede representarse mediante la siguiente expresión química:



Como consecuencia de esta reacción, el pH del hormigón disminuye progresivamente desde valores cercanos a 12.5–13 hasta niveles inferiores a 9, lo cual provoca la despasivación del acero de refuerzo y crea condiciones favorables para el inicio de procesos corrosivos [4]

El frente de carbonatación avanza desde la superficie expuesta hacia el interior del elemento estructural, dependiendo principalmente de la permeabilidad del hormigón y de las condiciones ambientales de exposición.

### **2.4. Factores que influyen en la carbonatación**

La velocidad de avance del frente de carbonatación se encuentra influenciada por diversos factores físicos y químicos. Entre los más relevantes se encuentran la relación agua/cemento, el grado de compactación, la calidad del curado y la porosidad del hormigón [1].

La humedad relativa viene a ser un factor importante en el avance de la carbonatación del hormigón, esto al encontrarse en un rango comprendido desde el 50% a 70% mejora la difusión del  $CO_2$  a través de los poros del hormigón y acelera la reacción química [2]. Por el contrario, en ambientes muy secos la falta de agua inhibe el proceso y en ambientes muy saturados los poros llenos de agua impiden la difusión del  $CO_2$  significativamente.

Más allá de la humedad, variables como el cemento empleado condicionan la susceptibilidad del material, al igual que adiciones puzolánicas y condiciones ambientales específicas de exposición como la temperatura y concentración de  $CO_2$  [12]. La interacción de estos factores define la cinética del proceso debiendo considerarse de forma integral al evaluar la durabilidad de una estructura de hormigón.

## 2.5. Profundidad de carbonatación

La profundidad de carbonatación se define como la distancia medida desde la superficie expuesta del hormigón hasta el punto donde el material conserva su alcalinidad original. Este parámetro permite evaluar el grado de avance del frente carbonatado y estimar el riesgo potencial de despasivación del acero de refuerzo, constituyendo uno de los indicadores más importantes en el análisis de la durabilidad del hormigón [13].

El avance de la carbonatación se modela como un proceso regido por la difusión de CO<sub>2</sub> a través de los poros del hormigón, permitiendo vincular la profundidad alcanzada con el tiempo de exposición. Entre las formulaciones disponibles, se halla la más consolidada en la práctica del diagnóstico estructural mediante la presente ecuación:

$$x = k\sqrt{t}$$

Donde:

- $x$  es la profundidad de carbonatación, expresada en milímetros (mm) normalmente;
- $k$  es el coeficiente de carbonatación, depende de las características del hormigón juntamente con las condiciones ambientales;
- $t$  corresponde al tiempo de exposición del material al CO<sub>2</sub>, usualmente expresado en años.

El coeficiente de carbonatación  $k$  representa la velocidad con la que el frente carbonatado avanza en el hormigón y está influenciado por factores como la relación agua/cemento, la porosidad, el tipo de cemento, la calidad del curado y las condiciones de humedad relativa del ambiente [11], [12].

Esta formulación evidencia que el proceso de carbonatación no se desarrolla de manera lineal con el tiempo, sino que presenta un comportamiento progresivo cuya velocidad tiende a disminuir a medida que aumenta la profundidad alcanzada. Dicho comportamiento ha sido ampliamente verificado mediante estudios experimentales en hormigones expuestos a condiciones naturales y aceleradas [2].

El uso de esa ecuación favorece la comprensión general del fenómeno mientras ofrece una referencia que facilita la comparación y análisis de los datos experimentales, pero no deben interpretarse como una herramienta directa de predicción en cuanto a la vida útil

de la estructura, pues la durabilidad real depende de múltiples variables que el modelo no alcanza a definir e integrar por completo.

## **2.6. Interpretación del grado de carbonatación del hormigón**

La profundidad de carbonatación constituye un parámetro fundamental para la evaluación del estado de durabilidad del hormigón. Sin embargo, la literatura técnica no establece valores únicos que permitan clasificar de manera directa el grado de afectación del material, debido a la variabilidad de las condiciones ambientales, características del hormigón y espesores de recubrimiento.

Diversos autores coinciden en que la interpretación del fenómeno de carbonatación debe realizarse de forma relativa, considerando la relación entre la profundidad del frente carbonatado y el recubrimiento del acero de refuerzo, más que valores absolutos de profundidad [11], [12].

Analizar como progresa el frente de carbonatación permite identificar zonas con diferentes grados de afectación que llegan a asociarse con riesgo de durabilidad del hormigón. En un nivel más superficial la integridad permanece segura pero mientras la profundidad sea más elevada el riesgo de des pasivación del acero de refuerzo se vuelve más frecuente y de forma considerable, al sobrepasar la altura de recubrimiento que el hormigón le proporcionaba [10].

Por esta razón, numerosos estudios experimentales adoptan clasificaciones internas o criterios propios para evaluar el grado de carbonatación, siempre que estos se fundamenten en modelos teóricos reconocidos y se utilicen con fines comparativos [2].

## **2.7. Fenolftaleína como método de evaluación**

La fenolftaleína es un indicador químico utilizado para identificar la zona carbonatada del hormigón. En presencia de pH superiores a 9, el indicador adquiere una coloración violeta, mientras que en zonas carbonatadas permanece incoloro [13].

Este método es ampliamente empleado en estudios de durabilidad debido a su simplicidad, confiabilidad y facilidad de interpretación, siendo recomendado por organismos internacionales para la medición de la profundidad de carbonatación en hormigón endurecido [14].

## **2.8. Relación entre carbonatación y resistencia a compresión**

Diversos estudios establecen que la carbonatación genera efectos diferenciados en el comportamiento mecánico del hormigón, en una primera etapa, la reacción entre el dióxido de carbono y los compuestos hidratados del cemento produce carbonato de calcio, lo que ocasiona una densificación superficial y una reducción parcial de la porosidad en las capas externas del material, sin embargo, a medida que el frente carbonatado avanza hacia zonas internas, se modifica progresivamente la microestructura del hormigón y se reduce su alcalinidad, condiciones que afectan su comportamiento mecánico y pueden reflejarse en disminuciones de resistencia a compresión en función de las características del material y del nivel de exposición [1], [15].

Para mejorar la compresión del avance de la carbonatación como agente deteriorante del hormigón es necesario estudiar las variables identificadas como la resistencia a compresión del material y la profundidad de carbonatación encontrada. Siendo valioso al diagnosticar estructuras en servicio y la aplicación de ensayos acelerados para correlacionar el avance químico y la capacidad mecánica del material para brindar una valoración más precisa del estado real de la obra [1].

## **2.9. Recubrimientos protectores del hormigón**

Los recubrimientos protectores constituyen una estrategia eficaz para limitar la penetración de agentes agresivos al interior del hormigón. De acuerdo con el American Concrete Institute, estos sistemas pueden reducir la permeabilidad superficial y prolongar la vida útil de las estructuras cuando son correctamente diseñados y aplicados, según la norma ACI 201.1.2R-08 [16].

Según el ACI 222R-11 [10] el desarrollo de recubrimientos protectores ha girado hacia alternativas sostenibles como materiales de bajo impacto ambiental que garanticen una compatibilidad química y física adecuada con el hormigón, buscando alinear la protección estructural con responsabilidad ecológica sin alterar el comportamiento del sustrato cementicio en toda su vida útil.

## **2.10. Sílice de cáscara de arroz como material puzolánico**

La cáscara de arroz constituye un residuo agroindustrial con elevado contenido de sílice amorfa. Cuando es adecuadamente procesada, esta sílice presenta comportamiento puzolánico, reaccionando con el hidróxido de calcio y contribuyendo a la formación de productos cementantes secundarios [4].

Diversos estudios indican que la incorporación de sílice de cáscara de arroz permite reducir la porosidad capilar del hormigón, mejorar su microestructura y disminuir la penetración de agentes agresivos, favoreciendo su durabilidad [17].

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

### **3.1. Tipo de investigación**

La presente investigación corresponde a un estudio experimental aplicado, debido a que integró trabajo de campo (evaluación in situ del hormigón del puente) y ensayos de laboratorio (fabricación de probetas, carbonatación acelerada, resistencia a compresión y medición de profundidad de carbonatación), con el objetivo de evaluar la influencia de la carbonatación sobre el desempeño mecánico del hormigón y la eficacia de un recubrimiento inhibidor sostenible.

### **3.2. Enfoque de la investigación**

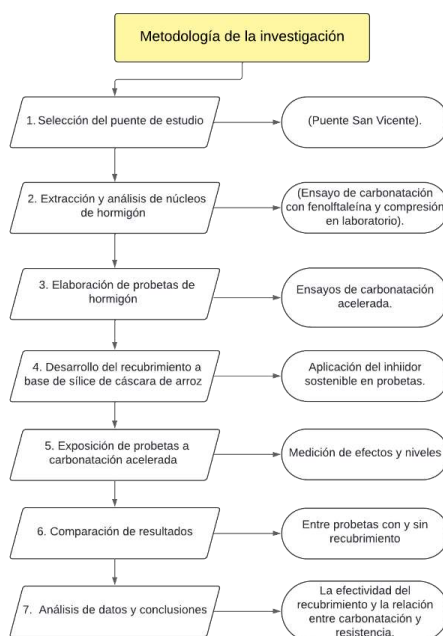
El enfoque es cuantitativo, ya que los resultados se basan en mediciones numéricas de resistencia a compresión, profundidad de carbonatación y parámetros estadísticos, permitiendo comparaciones objetivas entre grupos experimentales y entre métodos de evaluación

### **3.3. Alcance de la investigación**

El alcance del estudio fue comparativo y correlacional, al contrastar las condiciones de hormigón con recubrimiento y sin recubrimiento bajo distintos tiempos de exposición, y analizar la asociación entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión mediante pruebas estadísticas. Adicionalmente, la investigación tuvo un carácter explicativo y aplicado, ya que permitió no solo evaluar el comportamiento del hormigón frente al proceso de carbonatación en el puente San Vicente de la vía Riobamba–Macas, sino también desarrollar y evaluar un recubrimiento sostenible a base de sílice de cáscara de arroz como alternativa para mitigar dicho fenómeno.

### 3.4. Diagrama de la metodología

Figura 1: Diagrama de flujo de la metodología para el proyecto de investigación



### 3.5. Nivel y diseño de investigación

El nivel de investigación es explicativo–correlacional, porque inicialmente se analizó el efecto de la carbonatación sobre la resistencia mecánica del hormigón y complementario se determinó el grado de asociación estadística entre profundidad de carbonatación y resistencia a compresión.

El diseño experimental se organizó en grupos diferenciados bajo condiciones de exposición controlada con el fin de analizar simultáneamente dos variables como lo son: el efecto del recubrimiento inhibidor con base de sílice extraída del tamo de arroz y la influencia del tiempo de exposición a carbonatación acelerada, facilitando una evaluación directa y reproducible del comportamiento frente al avance del deterioro.

### 3.6. Área de estudio

El estudio se desarrolló en el puente San Vicente, situado en la vía Riobamba-Macas. El mismo que fue evaluado mediante una inspección visual y ensayos in situ para caracterizar su estado inicial, y extraer los núcleos de hormigón directamente de la obra para su posterior traslado al laboratorio para ensayarlos y cuantificar sus propiedades mecánicas y parámetros de deterioro bajo condiciones controladas.

### **3.7. Población y muestra**

#### **3.7.1. Población**

La población estuvo conformada por los elementos de hormigón del puente San Vicente y por las probetas de hormigón fabricadas en laboratorio para la evaluación comparativa con/sin recubrimiento.

#### **3.7.2. Muestra**

Para la muestra experimental se definió a partir de dos tipos de especímenes complementarios entre sí. Por una parte, se trabajó con núcleos extraídos del puente San Vicente que poseían dimensiones de 7.5 cm x 15 cm para ser utilizados en ensayos a compresión y medición de la profundidad de carbonatación con fenolftaleína, esto para identificar las condiciones reales de servicio del hormigón esa estructura. Para el segundo grupo se fabricó probetas cilíndricas con medidas de 10 cm x 20 cm en el laboratorio, se destinaron para los ensayos que incluían carbonatación acelerada.

La selección de los puntos de muestreo se dio por un criterio no probabilístico a conveniencia que siguió factores como la accesibilidad segura al puente de estudio y la extracción segura de los núcleos que no dañe los elementos de la estructura, de manera que se puedan seguir los ensayos planificados bajo normas estandarizadas.

### **3.8. Variables de investigación**

#### **3.8.1. Variable independiente**

- Aplicación del recubrimiento inhibidor a base de sílice de cáscara de arroz (con/sin recubrimiento).

#### **3.8.2. Variables dependientes**

- Profundidad de carbonatación (mm), medida mediante fenolftaleína.
- Resistencia a compresión (MPa), obtenida en prensa para núcleos y cilindros.

#### **3.8.3. Variables de control**

- Dimensiones de probetas elaboradas (10 x 20 cm).
- Tiempo de curado de 35 días antes de la exposición a carbonatación acelerada.
- Exposición a CO<sub>2</sub> en un sistema cerrado y controlado.
- Procedimiento de ensayo igualitario para todos los especímenes con los mismos protocolos y equipos de medición.

### **3.9. Materiales, equipos y herramientas empleadas**

Este apartado se detalla de forma amplia, la lista de materiales, equipos y herramientas complementarios que fueron empleados durante cada uno de los ensayos para el desarrollo del tema de investigación.

#### **3.9.1. Materiales para elaboración de probetas de hormigón.**

A continuación, se indica los materiales empleados en la elaboración de las probetas de hormigón con una dosificación 1:1.5:2.5 para una resistencia aproximada de 230 kg/cm<sup>2</sup>

##### **3.9.1.1. Cemento Portland - Tipo GU**

Material cementante hidráulico utilizado como aglomerante principal del hormigón, responsable del desarrollo de resistencia mecánica mediante el proceso de hidratación en la dosificación empleando la marca “HOLCIM”.

##### **3.9.1.2. Agregado fino - Polvo de Piedra**

Es una fracción fina extraída mediante la trituración de roca con partículas menores a 0.15 mm. Se emplea en la elaboración de las probetas de hormigón como parte de la dosificación en la mezcla, pues a diferencia de la arena natural, su forma angular y finura puede influir en la trabajabilidad y mejorar la resistencia final de nuestras probetas.

##### **3.9.1.3. Agregado Grueso – Ripio Triturado**

Proveniente de la cantera Cerro Negro (Riobamba), empleado por su disponibilidad y uso común en la zona. Un agregado pétreo de forma angular con un tamaño nominal de 9.5 mm o 3/8”, obtenido por trituración de roca. Empleado como agregado grueso en la dosificación empleada para la elaboración de probetas de hormigón, pues contribuye a la estructura esquelética de la mezcla y facilitando la reproducción de un hormigón típico para estudios de carbonatación acelerada.

Las características de los agregados (polvo de piedra y ripio triturado de la cantera Cerro Negro) y el cemento Portland tipo GU se ilustran en el **Anexo 5** a partir de la **Figura 21** hasta la **Figura 27**.

##### **3.9.1.4. Agua potable**

Elemento indispensable para la hidratación del cemento y la formación de la pasta cementicio, empleada tanto en la mezcla como en el proceso de curado.

### **3.9.2. Materiales para obtención de sílice y elaboración del recubrimiento**

#### **3.9.2.1. Cáscara de arroz**

Residuo agroindustrial utilizado como materia prima para la obtención de sílice, seleccionado por su alto contenido de óxido de silicio y su potencial como material sostenible.

#### **3.9.2.2. Silicato de sodio**

Compuesto químico empleado como agente aglutinante, que contribuye a la adherencia del recubrimiento sobre la superficie del hormigón.

#### **3.9.2.3. Maicena**

Material orgánico utilizado como modificador de consistencia, permitiendo mejorar la viscosidad y aplicabilidad del recubrimiento tipo pintura.

### **3.9.3. Materiales para ensayos de carbonatación acelerada**

#### **3.9.3.1. Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

Gas empleado para generar una atmósfera artificial rica en dióxido de carbono, acelerando el proceso de carbonatación del hormigón.

#### **3.9.3.2. Recipiente flexible sellado (bolsa de polietileno con cierre a presión)**

Elemento utilizado para el confinamiento del CO<sub>2</sub> alrededor de las probetas, permitiendo mantener condiciones controladas durante el ensayo.

#### **3.9.3.3. Fenolftaleína al 1%**

Indicador químico de pH utilizado para identificar el frente de carbonatación, diferenciando zonas carbonatadas y no carbonatadas del hormigón [13], [14].

### **3.10. Equipos principales**

#### **3.10.1. Esclerómetro tipo Schmidt, ASTM C805/C805M [18]**

Equipo de ensayo no destructivo utilizado para estimar de manera indirecta la resistencia superficial del hormigón, a partir del índice de rebote generado por el impacto sobre el elemento evaluado. Permite analizar la uniformidad y condición general del material.

### **3.10.2. Equipo de perforación con corona diamantada, ASTM C42/C42M [9]**

Equipo empleado para la extracción de núcleos cilíndricos de hormigón endurecido desde elementos estructurales existentes, con el fin de realizar ensayos de resistencia a compresión y evaluación de la carbonatación.

### **3.10.3. Prensa hidráulica para ensayos de compresión, ASTM C39/C39M [19]**

Equipo de laboratorio utilizado para determinar la resistencia a compresión del hormigón mediante la aplicación progresiva y controlada de carga axial sobre probetas o núcleos extraídos.

### **3.10.4. Calibrador digital (pie de rey)**

Instrumento de medición de precisión utilizado para determinar diámetros, alturas y dimensiones de las probetas, así como la profundidad de carbonatación en las muestras analizadas.

### **3.10.5. Balanza**

Equipo empleado para el control gravimétrico de materiales y probetas, asegurando una dosificación precisa y el registro confiable de masas durante las etapas del proceso experimental.

### **3.10.6. Moldes metálicos para probetas de 10 × 20 cm**

Estos moldes permiten fabricar probetas de hormigón con dimensiones normalizadas, asegurando que todas las muestras compartan una geometría similar y durante el vibrado tengan una compactación homogénea. Su funcionalidad es evitar deformaciones que puedan sesgar los resultados de los ensayos a realizarse con las probetas.

### **3.10.7. Herramientas de soporte**

Se dispuso de un conjunto de implementos adicionales entre ellos brochas, bandejas, espátulas, marcadores, recipientes y etiquetas. Mismos que ayudan a mantener el orden de operaciones y protocolos durante las etapas de elaboración de mezclas, aplicación de recubrimiento sobre las probetas, y para la identificación de las muestras. Evitando así las confusiones entre las series experimentales y asegurar la trazabilidad de cada muestra en todo el proceso.

### **3.11. Equipos de seguridad y apoyo operativo**

#### **3.11.1. Equipos de protección personal (EPP)**

Conjunto de implementos de seguridad conformado por casco, guantes, gafas de protección, mascarilla para polvos y sílice, botas de seguridad, chaleco reflectivo y mandil. La dotación de estos elementos de seguridad fue un requisito operativo en todas las actividades, protegiendo al personal durante el trabajo de campo y los ensayos de laboratorio.

#### **3.11.2. Elementos de delimitación en campo**

Se empleó elementos como cintas de seguridad y conos de señalización que permitan delimitar las áreas de trabajo durante la ejecución de ensayos estandarizados en el puente San Vicente garantizando la seguridad del personal y de los usuarios de la vía en estos procedimientos.

### **3.12. Conformación de grupos experimentales y tiempos de exposición**

El diseño experimental se estructuró en tres grupos con distribución explícita y replicación por condición, con el propósito de analizar el efecto de la carbonatación acelerada y la influencia del recubrimiento inhibidor a base de sílice de cáscara de arroz.

#### **3.12.1. Grupo 1: Grupo de control**

Este grupo estuvo conformado por tres (3) probetas, las cuales no fueron sometidas a carbonatación acelerada ni recibieron recubrimiento superficial. Su función fue establecer una referencia inicial del comportamiento mecánico del hormigón.

#### **3.12.2. Grupo 2: Probetas sin recubrimiento**

Este grupo estuvo conformado por nueve (9) probetas, las cuales fueron sometidas a carbonatación acelerada sin la aplicación del recubrimiento inhibidor. Con el fin de evaluar el efecto del tiempo de exposición, este grupo se subdividió de la siguiente manera:

- a) Tres (3) probetas sometidas a carbonatación acelerada durante 14 días.
- b) Tres (3) probetas sometidas a carbonatación acelerada durante 28 días.
- c) Tres (3) probetas sometidas a carbonatación acelerada durante 35 días.

#### **3.12.3. Grupo 3: Probetas con recubrimiento inhibidor**

Este grupo estuvo conformado por nueve (9) probetas, a las cuales se le aplicó el recubrimiento inhibidor a base de sílice de cáscara de arroz previo al proceso de carbonatación acelerada.

De manera similar al grupo anterior, las probetas fueron subdivididas según el tiempo de exposición:

- a) Tres (3) probetas sometidas a carbonatación acelerada durante 14 días.
- b) Tres (3) probetas sometidas a carbonatación acelerada durante 28 días.
- c) Tres (3) probetas sometidas a carbonatación acelerada durante 35 días.

La estructura experimenta propuesta facilitó un análisis comparativo más eficiente para identificar la influencia del recubrimiento inhibitor sobre las dos variables del estudio.

### **3.13. Procedimiento general de investigación**

El procedimiento se ejecutó en etapas, en coherencia con el desarrollo real del trabajo:

1. Análisis comparativo para la selección del puente objeto de estudio.
2. Ensayos destructivos y no destructivos en el puente San Vicente.
3. Ensayos de laboratorio con núcleos del puente San Vicente.
4. Ensayo preliminar de carbonatación acelerada con la finalidad de definir los tiempos de exposición en las probetas finales.
5. Extracción de sílice natural de la cascara de arroz para formulación del recubrimiento inhibitor en forma de pintura.
6. Fabricación y curado de cilindros de hormigón durante 35 días.
7. Aplicación del recubrimiento inhibitor en las probetas correspondientes.
8. Carbonatación acelerada definitiva en tiempos de 14,28 y 35 días.
9. Ensayo a compresión de las probetas fabricadas en el laboratorio.
10. Medición de profundidad de carbonatación con la aplicación de fenolftaleína.
11. Análisis estadístico con las pruebas ANOVA, TUKEY y correlaciones.

#### **3.13.1. Análisis comparativo para la selección del puente objeto de estudio**

Se llevó a cabo una evaluación preliminar de viabilidad técnica y operativa en distintos puentes del tramo vial, con el objetivo de identificar una estructura que reuniera condiciones idóneas para el trabajo experimental. La selección priorizó tres aspectos clave: la posibilidad de realizar ensayos no destructivos sin interferir en la operación del puente, la factibilidad de extraer núcleos de hormigón con las medidas de seguridad adecuadas, y que el material fuera representativo de estructuras de hormigón armado expuestas a condiciones ambientales reales, garantizando así que los resultados tuvieran aplicabilidad práctica y validez técnica.

Los puentes considerados para la selección fueron:

- Puente San Vicente
- Puente Río Yasipán
- Puente Río Ashilán
- Puente Río Chinguichaca

De acuerdo con las normas ACI 201.2R [10] y ACI 222R [16] se identifican los criterios de selección más adecuados para estudios de evaluación y durabilidad del hormigón.

### **3.13.2. Cantidad y accesibilidad de elementos de hormigón armado**

El puente San Vicente fue seleccionado para ser el caso de estudio por la fácil accesibilidad a sus elementos de hormigón armado entre ellos los estribos, las zonas de apoyo y las caras laterales, para tomar lecturas confiables con esclerómetro alcanzando una red de puntos de muestreo representativos. Esta condición facilitó la planificación de la extracción de núcleos en ubicaciones seguras, preservando la integridad estructural de los elementos críticos.

En contraste, los puentes Yasipán, Ashilán y Chinguichaca mostraron una gran cantidad de limitaciones asociadas a su geometría y la dificultad de acceso a superficies en las que se pudieran aplicar el muestreo de toma de datos, y hubieran comprometido la representatividad de las muestras y aumentado el riesgo operativo durante la ejecución de los ensayos estandarizados.

### **3.13.3. Condiciones de seguridad y operación en campo**

El puente San Vicente ofreció condiciones operativas más favorables para el desarrollo del trabajo experimental, ya que permitió delimitar zonas de intervención con adecuado control de seguridad, facilitando tanto la toma sistemática de lecturas no destructivas como la instalación y maniobra del equipo de extracción de núcleos. En cambio, en los puentes Yasipán, Ashilán y Chinguichaca, factores como la proximidad al cauce del río, la altura de los elementos estructurales y el acceso restringido a las caras de interés no solo incrementaban el riesgo para el personal, sino que también complicaban la logística de montaje de los equipos, limitando la eficiencia y la reproducibilidad de los ensayos in situ

### **3.13.4. Viabilidad técnica para extracción de núcleos**

La extracción de núcleos de hormigón exige no solo acceso físico a la estructura, sino también condiciones de estabilidad operativa y una selección cuidadosa de las ubicaciones para minimizar cualquier afectación al comportamiento estructural, tal como establecen los lineamientos de la norma ASTM C42/C42M [9]. En el puente San Vicente fue posible identificar puntos representativos y accesibles que cumplían con estos criterios permitiendo una extracción controlada y segura de los testigos. Por el contrario, en los puentes Yasipán, Ashilán y Chinguichaca se detectaron limitaciones relacionadas con la geometría, la altura de los elementos y la dificultad de acceso que no solo complicaban la logística de perforación sino que también aumentaban el riesgo operativo y dificultaban garantizar la representatividad y la integridad de las muestras

### **3.13.5. Representatividad para el estudio de carbonatación**

San Vicente presentó condiciones representativas para evaluar carbonatación natural en elementos de hormigón armado expuestos a ambiente, aspecto clave en estudios de durabilidad [11], [12].

Y finalmente, se escogió el puente San Vicente como la estructura de estudio por reunir las condiciones técnicas, logísticas y de seguridad necesarias que permitieron ejecutar ensayos no destructivos y destructivos con el rigor de las prácticas estandarizadas. La elección permitió obtener datos representativos del comportamiento real del hormigón en servicio y se garantiza la validez técnica del análisis sin comprometer la integridad estructural del elemento.

### **3.14. Ensayo no destructivo con esclerómetro.**

El ensayo con esclerómetro se empleó como método no destructivo para estimar la calidad superficial del hormigón, proporcionando una referencia indirecta de su resistencia a compresión a partir de la dureza medida en la matriz cementicia. Esta técnica permitió evaluar de forma rápida y reproducible distintas zonas del puente, facilitando la identificación de variaciones locales sin comprometer la integridad de la estructura. El procedimiento se ejecutó conforme a la norma ASTM C805/C805M [18], considerando:

Se ejecutó seleccionando previamente zonas representativas de la estructura, descartando áreas con defectos visibles, bordes o desprendimientos que pudieran alterar las mediciones. Sobre estas superficies, se aplicó el impacto del esclerómetro manteniendo una

orientación aproximadamente perpendicular para garantizar la transferencia adecuada de energía y minimizar errores por inclinación. Cada lectura se registró de forma sistemática, filtrando posteriormente los valores atípicos que se desviaban del comportamiento esperado, y finalmente se calcularon promedios por zona evaluada para obtener un índice de rebote consistente y representativo del estado superficial del hormigón.

Los resultados del esclerómetro se utilizaron como estimación indirecta, y su diferencia respecto a la resistencia por rotura de núcleos se discutió en el análisis, considerando la variabilidad típica entre métodos no destructivos y destructivos, según el ACI 228.1R [20]

Cabe recalcar que la toma de datos se realizó a una distancia aproximada de 30 cm de los puntos donde se efectuó la extracción de núcleos, con la finalidad de mantener la referencia espacial y dar seguimiento a la ubicación exacta de los ensayos realizados. además, que los valores individuales de rebote, el cálculo de promedios por zona y la conversión a resistencia estimada se presentan en el **Anexo 2**, identificando para esto la **Tabla 13** a **Tabla 17** como parte de los resultados de cada punto.

### **3.15. Ensayo de Extracción de núcleos.**

La extracción de núcleos se realizó con equipo de perforación diamantada, siguiendo los lineamientos generales de la norma ASTM C42/C42M [9], el proceso consideró:

- a) Localización de puntos con accesibilidad y representatividad del material.
- b) Perforación controlada y extracción del núcleo de hormigón.
- c) Identificación, rotulado y registro del punto extraído.
- d) Transporte del núcleo con cuidado de golpes y daño por manipulación hasta el laboratorio.

Al llegar, se aplicó una medición de los núcleos para obtener datos de diámetro y altura, que abarquen un registro real de datos para la corrección del cálculo de resistencia acorde a su geometría y la condición del espécimen [9].

El procedimiento detallado de extracción, conservación y preparación de los núcleos, incluyendo el anclaje del equipo, el uso de detector de acero y el almacenamiento en fundas herméticas, se documenta en el **Anexo 1**.

### **3.15.1. Extracción, conservación y preparación de núcleos de hormigón**

La extracción de núcleos de hormigón del puente San Vicente se realizó utilizando una broca diamantada de 7,5 cm de diámetro, correspondiente al equipo disponible en el laboratorio, motivo por el cual los núcleos obtenidos presentaron dimensiones aproximadas de 7,5 cm de diámetro y 15 cm de altura.

En la extracción se tomaron las precauciones debidas para no provocar microfracturas o daños por alteraciones térmicas en los núcleos, para esto se tomó en cuenta puntos de baja solicitud estructural como lo sugiere la norma ASTM C42/C42M [9] . Tras ser extraídos se colocaron y sellaron en bolsas de polietileno que permitieron mantener las condiciones de higrométricas del hormigón evitando así la pérdida de agua del núcleo. Este manejo cuidadoso durante el traslado al laboratorio garantiza que la profundidad de carbonatación y las propiedades mecánicas evaluadas reflejen con precisión el estado real de la estructura en el momento del muestreo.

Posteriormente, los núcleos fueron trasladados al laboratorio, donde se procedió a su corte y regularización de caras, con el fin de adecuarlos para el ensayo de resistencia a compresión en prensa hidráulica, conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM C42/C42M [9]

En contraste, los cilindros de hormigón elaborados en laboratorio para el estudio experimental fueron fabricados en moldes normalizados de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, dimensiones comúnmente empleadas en ensayos de laboratorio, lo cual permitió diferenciar claramente entre los especímenes extraídos de estructura existente y las probetas fabricadas bajo condiciones controladas.

### **3.16. Ensayo de Resistencia a compresión de núcleos y cilindros.**

La resistencia a compresión se determinó mediante ensayos en prensa hidráulica, aplicando protocolos diferenciados según el tipo de espécimen: para los cilindros fabricados en laboratorio se siguieron los lineamientos de la norma ASTM C39/C39M [19], mientras que para los núcleos extraídos del puente se adoptaron los criterios específicos de la ASTM C42/C42M [9] considerando aspectos como la relación altura/diámetro de las probetas, el estado de humedad al momento del ensayo y los factores de corrección geométrica necesarios para garantizar la comparabilidad de los resultados entre ambas series experimentales. Considerando así:

- a) Verificación dimensional del diámetro y altura.
- b) Alineación del núcleo de hormigón dentro de la prensa hidráulica.
- c) Aplicación de la carga monotónica hasta la falla del núcleo.
- d) Registro de la carga máxima en la prensa.
- e) Cálculo de resistencia a compresión.

Se registró también el modo de falla observado en cilindros, como parte del control cualitativo del ensayo. De modo que, todo el protocolo de este ensayo se halla descrito en el **Anexo 4**.

### **3.17. Ensayo de carbonatación acelerada**

El proceso de carbonatación acelerada se aplicó con el objetivo de reproducir, bajo condiciones controladas de laboratorio, el avance del frente de carbonatación que ocurre de manera natural en estructuras de hormigón expuestas al ambiente. Este procedimiento permitió evaluar comparativamente el efecto del recubrimiento inhibidor a base de sílice de cáscara de arroz sobre la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión del hormigón.

De acuerdo con la norma ISO 1920-12 [21] y RILEM CPC-18 [13] la metodología empleada para evaluar la carbonatación en el hormigón se fundamentó en los criterios establecidos adaptando sus procedimientos a las condiciones operativas y al equipamiento disponible en el laboratorio.

#### **3.17.1. Preparación de las probetas**

Antes de iniciar el proceso de carbonatación acelerada, los cilindros de hormigón (10 cm × 20 cm) se sometieron a un período de curado de 35 días, tiempo necesario para que la matriz cementicia alcanzara un grado de hidratación adecuado y desarrollara la resistencia mecánica base requerida para los ensayos. Una vez completado este plazo, las probetas se organizaron en dos series experimentales diferenciadas: un grupo de control sin tratamiento superficial y otro al que se le aplicó un recubrimiento inhibidor elaborado a partir de sílice de cáscara de arroz.

En las probetas destinadas al tratamiento, el recubrimiento se aplicó manualmente con brocha sobre una superficie previamente seca, procurando obtener una película continua y uniforme que asegurara una barrera efectiva frente a la penetración de CO<sub>2</sub>. Tras la aplicación, las muestras se dejaron en reposo bajo condiciones ambientales estables hasta

lograr el secado total del recubrimiento, garantizando así que la capa protectora estuviera plenamente consolidada antes de exponerlas a la atmósfera enriquecida con dióxido de carbono.

La aplicación del recubrimiento mediante brocha sobre la superficie seca de las probetas y el tiempo de secado previo a la exposición se ilustra en el **Anexo 7, Figura 36 a Figura 39**.

### **3.17.2. Sistema de generación de atmósfera artificial de carbonatación**

La carbonatación acelerada se llevó a cabo mediante la exposición de las probetas a una atmósfera artificial rica en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), utilizando un sistema de confinamiento individual. Cada probeta fue introducida en un recipiente flexible sellado (bolsa de polietileno con cierre a presión), el cual permitió generar un ambiente cerrado alrededor del espécimen.

El dióxido de carbono se suministró desde un tanque presurizado manteniendo una concentración interna estimada entre 90 % y 95 % dentro de la atmósfera generada. Este rango se adoptó para acelerar la cinética de carbonatación de acuerdo con metodologías reportadas en estudios experimentales que buscan reproducir procesos de deterioro a largo plazo en tiempos reducidos. El sistema de cierre a presión aseguró un nivel adecuado de hermetismo que limite la interferencia de variables externas y se complementó con inspecciones visuales periódicas diarias para descartar fugas evidentes durante la exposición al gas siendo observable en las **Figura 42 y Figura 43**.

La validación del sistema de confinamiento con fundas de polietileno y la inyección controlada de CO<sub>2</sub> se realizó en una fase preliminar del estudio, cuyos detalles metodológicos y resultados se documentan en el **Anexo 8**. Esta etapa permitió verificar la efectividad del sellado juntamente con la consistencia de la concentración de gas y la reproducibilidad del procedimiento, asegurando que las condiciones de carbonatación acelerada fueran adecuadas para los fines de la investigación.

### **3.17.3. Condiciones ambientales de exposición**

Durante el proceso de carbonatación acelerada, las probetas se mantuvieron a temperatura ambiente, la cual fue registrada durante el ensayo, y bajo condiciones de humedad relativa promedio de 65%, registrándose valores mínimos de 60 % y máximos de

70 %, rango considerado favorable para la difusión del CO<sub>2</sub> y el desarrollo de la reacción de carbonatación.

Estas condiciones controladas permitieron recrear un entorno propicio para acelerar la carbonatación manteniendo un equilibrio en la humedad interna que favorece la difusión del CO<sub>2</sub> sin llegar a escenarios de saturación total o sequedad extrema, situaciones que podrían limitar la disolución del gas o la movilidad iónica necesaria para la reacción química [2].

#### **3.17.4. Renovación del dióxido de carbono**

El dióxido de carbono fue introducido al inicio del ensayo en cada recipiente flexible sellado. debido al sistema cerrado empleado y a los tiempos relativamente cortos de exposición, se realizó una reposición periódica diaria del gas, considerándose que la concentración fuese suficiente para inducir la carbonatación acelerada durante los períodos evaluados.

Los controles de concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura, humedad relativa y verificación de hermeticidad del sistema se documentan en el **Anexo 9**, en las **Figura 41** y **Figura 42**.

#### **3.17.5. Tiempos de exposición**

Las probetas fueron sometidas a carbonatación acelerada durante 14, 28 y 35 días tras definirse los tiempos de exposición con un ensayo preliminar para obtener profundidades de carbonatación medibles y comparables en un tiempo determinado. Estos períodos facilitan el análisis de la evolución progresiva del frente carbonatado frente a su influencia en la resistencia a compresión del hormigón.

La definición de los tiempos de 14, 28 y 35 días se sustentó en un ensayo preliminar cuyo protocolo y resultados se documentan en el **Anexo 8**.

La determinación de la profundidad de carbonatación se efectuó mediante la aplicación de fenolftaleína sobre la superficie de rotura, siguiendo criterios de medición ampliamente utilizados en la literatura técnica y conforme a las recomendaciones establecidas por organismos especializados como RILEM CPC-18; ISO 1920-12 [13], [21]

#### **3.17.6. Medición de la profundidad de carbonatación**

Finalizado el tiempo de exposición, las probetas fueron ensayadas a compresión y, sobre la superficie de rotura recién expuesta, se aplicó una solución de fenolftaleína al 1 %,

donde la zona no carbonatada adquirió coloración violeta ( $\text{pH} > 9$ ) mientras que la zona carbonatada permaneció incolora por la reducción de la alcalinidad. Este contraste permitió delimitar el frente de carbonatación y medir su profundidad con precisión en cada probeta [13].

La profundidad de carbonatación fue medida utilizando un calibrador digital (pie de rey) en al menos cuatro puntos distintos por probeta de la sección expuesta, con el fin de considerar posibles variaciones locales de la zona carbonatada y el valor reportado correspondió al promedio de dichas mediciones. Con el fin de reducir errores sistemáticos, todas las mediciones fueron realizadas por el mismo evaluador.

El registro fotográfico del corte transversal juntamente con la aplicación del indicador y las mediciones con pie de rey en cuatro puntos por núcleo se documentan en el **Anexo 3**.

### **3.18. Obtención de sílice a partir de cáscara de arroz**

La sílice se obtuvo a partir de cáscara de arroz mediante un proceso secuencial que incluyó:

- a) Lavado para eliminar impurezas y material orgánico adherido.
- b) Secado controlado.
- c) Tratamiento térmico (según las condiciones disponibles de laboratorio) para favorecer la obtención de sílice con mejor comportamiento como material fino.

El proceso secuencial de molienda, calcinación a  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tratamiento ácido con HCl y neutralización se describe y documenta en el **Anexo 6**. Y los parámetros finales del material (por ejemplo, aspecto, finura y rendimiento) fueron registrados para su análisis comparativo dentro del proceso [4]

A manera de control del proceso de extracción de sílice purificada, se identificaron los rendimientos diarios entre el 5 y 8 de agosto de 2025, hallándose en el **Anexo 6** desde la **Tabla 21** hasta **Tabla 24**.

### **3.19. Elaboración del recubrimiento inhibidor sostenible**

Se formuló un recubrimiento tipo “pintura” con base en:

1. Sílice obtenida de cáscara de arroz
2. Silicato de sodio (aglutinante)
3. Maicena (modificador de consistencia)

Se agitó a temperatura ambiente hasta obtener una mezcla homogénea y aplicable por brocha. El recubrimiento se aplicó sobre cilindros del grupo “con recubrimiento”, buscando formar una película superficial continua con función de barrera para reducir ingreso de CO<sub>2</sub>, conforme al criterio general de protección superficial de hormigón, según ACI 201.2R-08 [16], [22]

La proporción de componentes (sílice, maicena, silicato de sodio y agua destilada), el procedimiento de mezcla a 5 °C y la aplicación en dos manos cada 24 h se detallan en el **Anexo 7**.

### **3.20. Fabricación y curado de cilindros**

Se fabricaron cilindros de hormigón de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura con una dosificación 1:1.5:2.5 (cemento: agregado fino: agregado grueso) diseñada para alcanzar una resistencia aproximada de 230 kg/cm<sup>2</sup> [1], [4]. Como material cementante se utilizó cemento Portland tipo GU, el agregado fino fue polvo de piedra mientras que el agregado grueso fue ripio triturado de 3/8”, proveniente de la cantera Cerro Negro ubicada en Riobamba. El agua empleada fue potable asegurando condiciones adecuadas para la hidratación del cemento y la consistencia de las probetas [28].

Durante el proceso de fabricación se controlaron las dimensiones de los moldes y la correcta compactación para dar homogeneidad de la mezcla a fin de asegurar uniformidad en las probetas [28]. Posteriormente, los especímenes fueron sometidos a un período de curado de 35 días en condiciones controladas para un adecuado desarrollo de la resistencia mecánica previo a su exposición al proceso de carbonatación acelerada.

Todo el proceso de mezclado juntamente con la compactación en capas, posterior desencofrado a 24 h de las probetas y curado en agua saturada con cal durante 35 días se documenta fotográficamente en el **Anexo 5**.

### **3.21. Referencia conceptual para la interpretación de la carbonatación acelerada**

La literatura técnica describe el avance del frente de carbonatación mediante la expresión  $x = k\sqrt{t}$ , formulada para condiciones de exposición natural generalmente expresadas en años. En esta relación, la profundidad de carbonatación  $x$  es función directa del tiempo de exposición  $t$ , mientras que el coeficiente  $k$  depende de las características del hormigón y de las condiciones ambientales [2],[11]. Este modelo constituye una base

ampliamente aceptada en estudios de durabilidad del hormigón, ya que permite comprender la tendencia progresiva del fenómeno bajo condiciones naturales de servicio.

En el presente estudio, dicha relación no fue empleada para establecer una equivalencia directa entre los períodos de exposición acelerada en días y los años de servicio estructural. No obstante, el modelo fue utilizado como referencia conceptual orientativa durante la etapa preliminar del ensayo de carbonatación acelerada, con el propósito de estimar rangos aproximados de profundidad que permitieran definir tiempos de exposición medibles y comparables dentro del laboratorio.

Para ello, se consideraron coeficientes de carbonatación reportados en la literatura para hormigones compactos, cuyos valores típicos se encuentran en el rango de 2 a 6 mm [13], [23] Mediante el reemplazo referencial de los tiempos del programa experimental en la expresión teórica, se obtuvieron profundidades estimativas que mostraron coherencia con las tendencias observadas experimentalmente mediante la aplicación de fenolftaleína en las superficies fracturadas de las probetas. Esta comparación permitió verificar que el comportamiento experimental siguiera la progresión esperada del fenómeno, sin implicar una conversión directa de días a años.

Con base en esta interpretación conceptual, se establecieron rangos internos de profundidad utilizados exclusivamente como criterio técnico referencial del estudio. Y no fueron adoptados como niveles normativos ni empleados para clasificar el estado estructural del hormigón en términos de años de servicio. Su finalidad fue facilitar la organización del ensayo preliminar y respaldar la selección de los tiempos de exposición 14, 28 y 35 días para la interpretación comparativa de los resultados obtenidos bajo condiciones de carbonatación acelerada [2],[11].

La definición de intervalos de profundidad de carbonatación respondió a una necesidad estrictamente metodológica y organizativa, concebida para facilitar el diseño experimental y permitir una comparación sistemática entre las probetas con y sin recubrimiento, siempre dentro de los límites específicos de esta investigación. Con este enfoque, se delimitaron tres rangos que funcionaron exclusivamente como un criterio técnico interno, útil para ordenar y estructurar la interpretación de los datos obtenidos en laboratorio. Cabe precisar que esta categorización no pretende establecer una clasificación normativa ni sustituir los estándares de evaluación reconocidos, sino que opera como una herramienta analítica que permite visualizar con mayor claridad cómo incide el tratamiento superficial

en la progresión del deterioro, sin extender su validez más allá del alcance experimental planteado [2],[11].

### **3.21.1. Nivel de carbonatación superficial (Referencial)**

Corresponde a profundidades de carbonatación comprendidas entre:

$$0 \leq x < 3 \text{ mm}$$

Este nivel representa un avance inicial del frente carbonatado, limitado a la zona superficial del hormigón, sin implicar un riesgo inmediato para las armaduras, siempre que el recubrimiento sea adecuado y el hormigón conserve su alcalinidad original [1], [11]

### **3.21.2. Nivel de carbonatación intermedia (Referencial)**

Corresponde a profundidades de carbonatación comprendidas entre:

$$3 \leq x \leq 5 \text{ mm}$$

En este rango, el frente de carbonatación evidencia un avance significativo hacia el interior del hormigón, lo que puede reducir progresivamente la reserva alcalina del recubrimiento, especialmente en elementos con espesores reducidos o con mayor permeabilidad que permite la penetración de CO<sub>2</sub> [2], [23]

### **3.21.3. Nivel de carbonatación alta (Referencial)**

Corresponde a profundidades de carbonatación:

$$x > 5 \text{ mm}$$

Este nivel indica una carbonatación avanzada, en la cual el frente carbonatado puede aproximarse o alcanzar el acero de refuerzo, incrementando de manera considerable la probabilidad de despasivación y el inicio del proceso de corrosión de las armaduras, particularmente en ambientes con presencia de humedad [3], [11]

Esta clasificación no tuvo la finalidad de sustituir criterios normativos más bien respondió a una necesidad estrictamente metodológica y organizativa que se orienta a proporcionar una base técnica clara y coherente para la interpretación de los resultados experimentales obtenidos, en concordancia con modelos ampliamente aceptados en el análisis de la durabilidad del hormigón [1], [4]

### 3.22. Ensayo de carbonatación acelerada definitiva (ISO 1920-12).

Los cilindros de hormigón protegidos con el recubrimiento inhibidor como los de referencia sin tratamiento se sometieron a la fase definitiva de carbonatación acelerada con el propósito de contrastar su respuesta frente a una exposición controlada y sostenida a dióxido de carbono [21].

El protocolo experimental se alineó con los lineamientos generales de la norma ISO 1920-12 [21] aunque se introdujeron ajustes operativos para adaptarse a la escala y los recursos disponibles en el laboratorio. Esta flexibilidad controlada permitió mantener el rigor metodológico sin comprometer la reproducibilidad de las condiciones de ensayo garantizando que los datos obtenidos demuestren la interacción entre el gas y la matriz cementicia.

La exposición se programó en intervalos de 14, 28 y 35 días, cronogramas definidos a partir de los resultados del ensayo preliminar y seleccionados para capturar distintas etapas de la cinética de carbonatación. El proceso se llevó a cabo dentro de un sistema de confinamiento individual basado en recipientes flexibles herméticamente sellados y aseguró que cada probeta permaneciera inmersa en una atmósfera artificial enriquecida con CO<sub>2</sub> sin interferencias externas [13]. Esta configuración no solo facilitó el control preciso de la concentración gaseosa alrededor de cada espécimen también evitó la mezcla de condiciones entre las distintas series experimentales, preservando la integridad de los datos para una comparación directa y fiable entre las probetas tratadas y las de control [2], [13].

Las probetas se mantuvieron a temperatura ambiente, bajo condiciones compatibles con el desarrollo de la reacción de carbonatación, procurando uniformidad entre todas las unidades experimentales. Finalizado cada período de exposición, se procedió al ensayo de resistencia a compresión y a la determinación de la profundidad del frente carbonatado mediante la aplicación de solución de fenolftaleína sobre la superficie fracturada de los cilindros.

El diseño experimental con tres grupos experimentales definidos como control, sin recubrimiento, con recubrimiento inhibidor. La distribución de especímenes según el tiempo de exposición y el sistema de inyección diaria de CO<sub>2</sub> se detallan en el **Anexo 9**.

### **3.23. Medición de profundidad de carbonatación con fenolftaleína (RILEM CPC-18)**

Posterior a la rotura por compresión, se aplicó fenolftaleína al 1% en la superficie recién expuesta, identificando la zona carbonatada (incolora) y no carbonatada (violeta), conforme a recomendaciones técnicas [13], [14], las profundidades se midieron con calibrador digital, registrando valores representativos por espécimen.

### **3.24. Consideraciones éticas y de seguridad**

La extracción de núcleos se planificó cuidadosamente para preservar la integridad estructural del puente seleccionando ubicaciones accesibles y alejadas de zonas críticas para ejecutar el procedimiento con el equipo de protección personal adecuado [9]. Y, el manejo del CO<sub>2</sub> durante la carbonatación acelerada se realizó bajo estrictas medidas de seguridad, garantizando ventilación permanente y control operativo para minimizar riesgos asociados al uso del gas en el laboratorio [21].

### **3.25. Delimitación del alcance metodológico**

La investigación evaluó el avance del frente de carbonatación y su relación con resistencia a compresión. No se determinó la velocidad de corrosión del acero, debido a que no se ejecutaron ensayos electroquímicos ni se extrajo armadura para mediciones gravimétricas, por lo que la interpretación se orienta al riesgo asociado a la despasivación por carbonatación, según la norma ACI 222R-11 [10] y [11]

### **3.26. Pruebas estadísticas empleadas**

Con el propósito de analizar e interpretar los resultados obtenidos en el ensayo de carbonatación acelerada, se aplicaron pruebas estadísticas de carácter paramétrico y no paramétrico, seleccionadas en función de la naturaleza de las variables estudiadas y del tamaño de la muestra.

#### **3.26.1. Análisis de Varianza (ANOVA)**

Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) para comparar las medias de los diferentes grupos experimentales, considerando tanto la condición de las probetas (con recubrimiento y sin recubrimiento) como los tiempos de exposición (14, 28 y 35 días).

El análisis ANOVA se empleó para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados, partiendo del supuesto de normalidad verificado previamente mediante pruebas de ajuste. Esta herramienta resulta

particularmente adecuada cuando se comparan más de dos medias, ya que permite identificar, con un nivel de confianza definido, si al menos una de ellas se diferencia de manera relevante del conjunto, evitando así interpretaciones basadas únicamente en la observación directa de los valores promedio y aportando rigor estadístico a la comparación experimental.

### **3.26.2. Prueba post hoc de Tukey (HSD)**

Cuando el análisis de varianza ANOVA [5] evidenció diferencias estadísticamente significativas se aplicó la prueba post hoc de Tukey (Honest Significant Difference, HSD) para confirmar y precisar las diferencias entre las condiciones experimentales evaluadas.

La prueba se hizo separando cada período de exposición 14, 28 y 35 días comparando en cada caso las probetas con recubrimiento frente a las sin recubrimiento, realizándose por separado para las dos variables de respuesta evaluadas como resistencia a compresión y la profundidad de carbonatación identificando si el efecto del tratamiento superficial era estadísticamente significativo en distintas etapas del proceso de deterioro y para diferentes propiedades del material.

Aunque en cada comparación se evaluaron únicamente dos grupos, la aplicación de la prueba de Tukey permitió mantener coherencia metodológica con el enfoque del ANOVA y controlar el error tipo I en las comparaciones realizadas. De esta manera, se verificó estadísticamente el efecto del recubrimiento en cada etapa del ensayo de carbonatación acelerada.

### **3.26.3. Coeficiente de correlación de Pearson**

El coeficiente de correlación de Pearson se empleó para evaluar la relación lineal entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión del hormigón.

Se empleó para cuantificar la intensidad y el sentido de la asociación lineal entre dos variables cuantitativas continuas, generando un coeficiente que oscila entre  $-1$  y  $+1$ . Valores próximos a estos extremos reflejan una relación lineal fuerte positiva si tienden a crecer juntas o negativa si una aumenta mientras la otra disminuye, mientras que coeficientes cercanos a 0 sugieren ausencia de correlación lineal. Esta prueba paramétrica resultó adecuada para el análisis, dado que las variables estudiadas cumplían con los supuestos de normalidad y escala de medición requeridos, permitiendo evaluar de forma rigurosa si existía

un patrón de covariación sistemático entre la resistencia a compresión y la profundidad de carbonatación a lo largo de los distintos períodos de exposición.

#### **3.26.4. Coeficiente de correlación de Spearman**

De manera complementaria, se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman con el fin de verificar la consistencia de los resultados obtenidos mediante Pearson.

La correlación de Spearman se incorporó como complemento no paramétrico permitiendo evaluar la asociación monotónica entre variables sin depender estrictamente del supuesto de normalidad, siendo útil para contrastar la consistencia de los hallazgos cuando la distribución de los datos presentaba desviaciones o cuando existían valores atípicos que podrían sesgar una prueba paramétrica. De este modo, la convergencia entre ambos coeficientes reforzó la confiabilidad de las interpretaciones, mientras que sus divergencias aportaron información valiosa sobre la naturaleza de la relación entre las variables estudiadas [6].

#### **3.26.5. Nivel de significancia**

Para todas las pruebas estadísticas se estableció un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ , y bajo este criterio se consideraron estadísticamente significativas aquellas diferencias cuyo valor de p fue inferior a 0.05, lo que implica que la probabilidad de que los resultados observados se deban al azar es menor al 5 %. Esta decisión metodológica permitió tomar decisiones fundamentadas sobre el efecto del recubrimiento y la evolución de las variables evaluadas para mantener un equilibrio entre el rigor estadístico y la sensibilidad para detectar cambios relevantes en el comportamiento del hormigón.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Consideraciones generales del análisis

Los resultados obtenidos durante el programa experimental permiten evaluar el comportamiento del hormigón frente al proceso de carbonatación acelerada desde dos enfoques complementarios: el diagnóstico del estado del hormigón existente en el puente San Vicente y el análisis controlado desarrollado en laboratorio mediante probetas elaboradas bajo condiciones definidas.

Esta diferenciación resulta fundamental, ya que los ensayos realizados en la estructura existente estuvieron influenciados por múltiples variables no controladas propias del proceso constructivo y del envejecimiento natural, mientras que los ensayos de laboratorio permitieron analizar el fenómeno bajo condiciones reproducibles en probetas sometidas a carbonatación acelerada, para finalmente analizar el comportamiento del hormigón con y sin recubrimiento a base de sílice de cáscara de arroz.

El análisis de resultados se mantuvo rigurosamente dentro de los límites experimentales, descartando cualquier extrapolación que pudiera distorsionar la interpretación del comportamiento real de la estructura. La evaluación se articuló en torno a tres ejes principales: la duración de la exposición acelerada de 14, 28 y 35 días, la presencia o ausencia del recubrimiento inhibitor, y el respaldo de las pruebas estadísticas implementadas. En este marco, el ANOVA y la prueba post hoc de Tukey permitieron discernir diferencias significativas entre grupos, mientras que los coeficientes de correlación aportaron una visión complementaria sobre la relación entre la pérdida de resistencia y el avance del frente carbonatado, garantizando que las conclusiones se sustentaran en evidencia cuantitativa y no en observaciones aisladas.

Las categorías de afectación superficial, intermedia y avanzada se utilizaron exclusivamente como un recurso organizativo interno, útil para sistematizar y comparar las mediciones de profundidad obtenidas en laboratorio. Es importante precisar que esta clasificación no pretende establecer umbrales normativos ni traducirse directamente en años de vida útil residual, ya que la carbonatación en servicio real depende de variables ambientales y constructivas que el ensayo acelerado no replica de forma lineal. Su función se limitó, por tanto, a facilitar una lectura estructurada de los datos experimentales, manteniendo siempre la distinción entre el modelo de laboratorio y la complejidad inherente a las estructuras en condiciones operativas.

#### 4.2. Resultados de la carbonatación acelerada en probetas de laboratorio

Las probetas fabricadas en laboratorio se expusieron a carbonatación acelerada durante 14, 28 y 35 días, con el propósito de monitorear la progresión del frente carbonatado bajo condiciones ambientales controladas y reproducibles. Esta secuencia de tiempos permitió capturar distintas etapas de la cinética de deterioro, facilitando la comparación sistemática entre las probetas con y sin recubrimiento y aportando una visión temporal del efecto protector del tratamiento superficial.

Los resultados obtenidos mediante el ensayo con fenolftaleína evidenciaron un incremento progresivo de la profundidad de carbonatación conforme aumentó el tiempo de exposición donde las probetas sin recubrimiento presentaron valores más altos en todos los periodos a comparación del otro grupo.

Al organizar las profundidades medidas en tres intervalos de referencia interna en los 0–3 mm, 3–5 mm y mayores a 5 mm definidos anteriormente fines metodológicos se ordena la lectura de los datos para los tres grupos experimentales, y se confirma la capacidad del tratamiento superficial para retardar la penetración del gas y preservar la alcalinidad de la matriz cementicia durante más tiempo [24].

**Tabla 1:** Resultados de profundidad de carbonatación en probetas sometidas a carbonatación acelerada

<b>Identificación</b>	<b>Profundidad de carbonatación promedio (mm)</b>	<b>Nivel de Carbonatación (Referencial)</b>
<b>C-CARBO-SR-14.1</b>	1.09	Superficial
<b>C-CARBO-SR-14.2</b>	1.62	Superficial
<b>C-CARBO-SR-14.3</b>	1.57	Superficial
<b>C-CARBO-SR-28.1</b>	4.15	Intermedia
<b>C-CARBO-SR-28.2</b>	4.29	Intermedia
<b>C-CARBO-SR-28.3</b>	4.57	Intermedia
<b>C-CARBO-SR-35.1</b>	5.93	Alta
<b>C-CARBO-SR-35.2</b>	6.01	Alta
<b>C-CARBO-SR-35.3</b>	5.72	Alta
<b>C-CARBO-CR-14.1</b>	0.95	Superficial
<b>C-CARBO-CR-14.2</b>	0.93	Superficial

<b>C-CARBO-CR-14.3</b>	0.87	Superficial
<b>C-CARBO-CR-28.1</b>	3.45	Intermedia
<b>C-CARBO-CR-28.2</b>	3.78	Intermedia
<b>C-CARBO-CR-28.3</b>	3.25	Intermedia
<b>C-CARBO-CR-35.1</b>	5.54	Alta
<b>C-CARBO-CR-35.2</b>	5.12	Alta
<b>C-CARBO-CR-35.3</b>	5.23	Alta
<b>C-CONTROL-35-1</b>	3.65	Intermedia
<b>C-CONTROL-35-2</b>	3.22	Intermedia
<b>C-CONTROL-35-3</b>	3.15	Intermedia

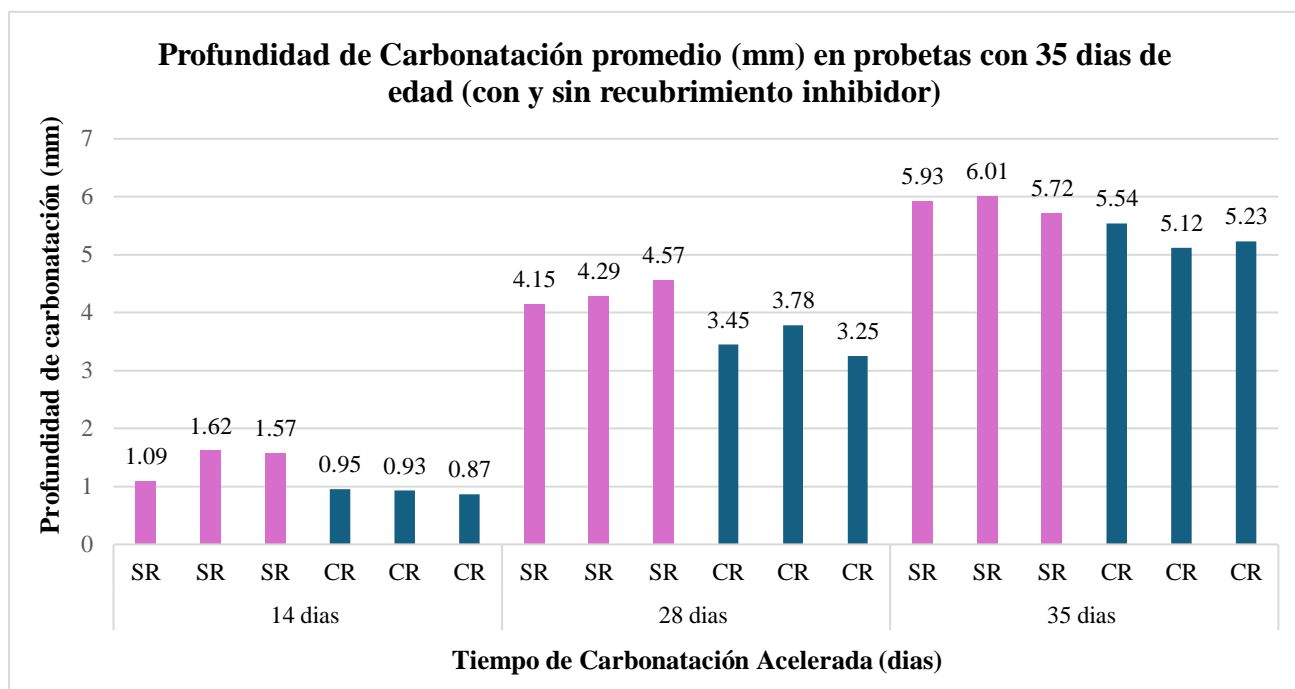
Nota: **CARBO** = Muestra Carbonatada; **CONTROL** = Muestra sin carbonatar; **SR** = Sin Recubrimiento; **CR** = Con Recubrimiento

Los valores individuales de profundidad de carbonatación para cada probeta, con sus respectivas mediciones en cuatro puntos, se presentan en el **Anexo 9** en la **Tabla 25**.

La tendencia registrada en las probetas valida que el procedimiento de carbonatación acelerada logró reproducir los mecanismos fundamentales de deterioro que ocurren de forma natural en estructuras expuestas a ambientes con CO<sub>2</sub> dentro de un laboratorio. Confirmando que la metodología empleada es adecuada para simular el proceso de carbonatación en tiempos reducidos con la coherencia cinética del fenómeno.

De igual manera, es posible representar los resultados por medio de un gráfico de barras:

**Figura 2:** Comparación de la profundidad de carbonatación en probetas con y sin recubrimiento bajo carbonatación acelerada.



Nota: **SR** = Sin Recubrimiento; **CR** = Con Recubrimiento

Al comparar los resultados entre probetas con y sin recubrimiento, se observó que las muestras sin protección presentaron mayores profundidades de carbonatación para todos los tiempos evaluados. Este comportamiento puede atribuirse a la mayor facilidad de difusión del CO<sub>2</sub> a través de la red porosa del hormigón, en ausencia de una barrera superficial [2], [11]

Por el contrario, las probetas tratadas con el recubrimiento a base de sílice de cáscara de arroz mostraron una reducción sistemática en el avance del frente carbonatado. Este efecto puede explicarse por la formación de una película superficial que actúa como barrera parcial, disminuyendo la permeabilidad al dióxido de carbono, tal como lo señalan estudios sobre protección superficial del hormigón [24].

La clasificación de los resultados según los niveles de carbonatación establecidos en la metodología permitió identificar un comportamiento diferenciado entre las series experimentales: las probetas sin recubrimiento progresaron hacia niveles intermedios y avanzados a medida que aumentaba el tiempo de exposición, reflejando la difusión sostenida del CO<sub>2</sub> en la matriz cementicia. Por el contrario, las probetas protegidas con el recubrimiento inhibidor se mantuvieron predominantemente en los rangos superficial e intermedio [1], incluso tras 35 días de exposición acelerada. Esta divergencia en la evolución

del frente carbonatado confirma que el tratamiento superficial actúa como una barrera efectiva frente al ingreso del gas, retardando la reducción del pH interno y preservando por más tiempo la protección pasiva del acero de refuerzo, lo que valida su potencial como estrategia de mitigación en estructuras expuestas a ambientes agresivos.

#### **4.3. Influencia de la carbonatación en la resistencia a compresión de las probetas**

Los resultados del ensayo de resistencia a compresión mostraron variaciones en función del tiempo de exposición y de la aplicación del recubrimiento.

**Tabla 2:** Esfuerzos a Compresión (MPa) y Profundidad de carbonatación promedio (mm) de las probetas ensayadas en el laboratorio

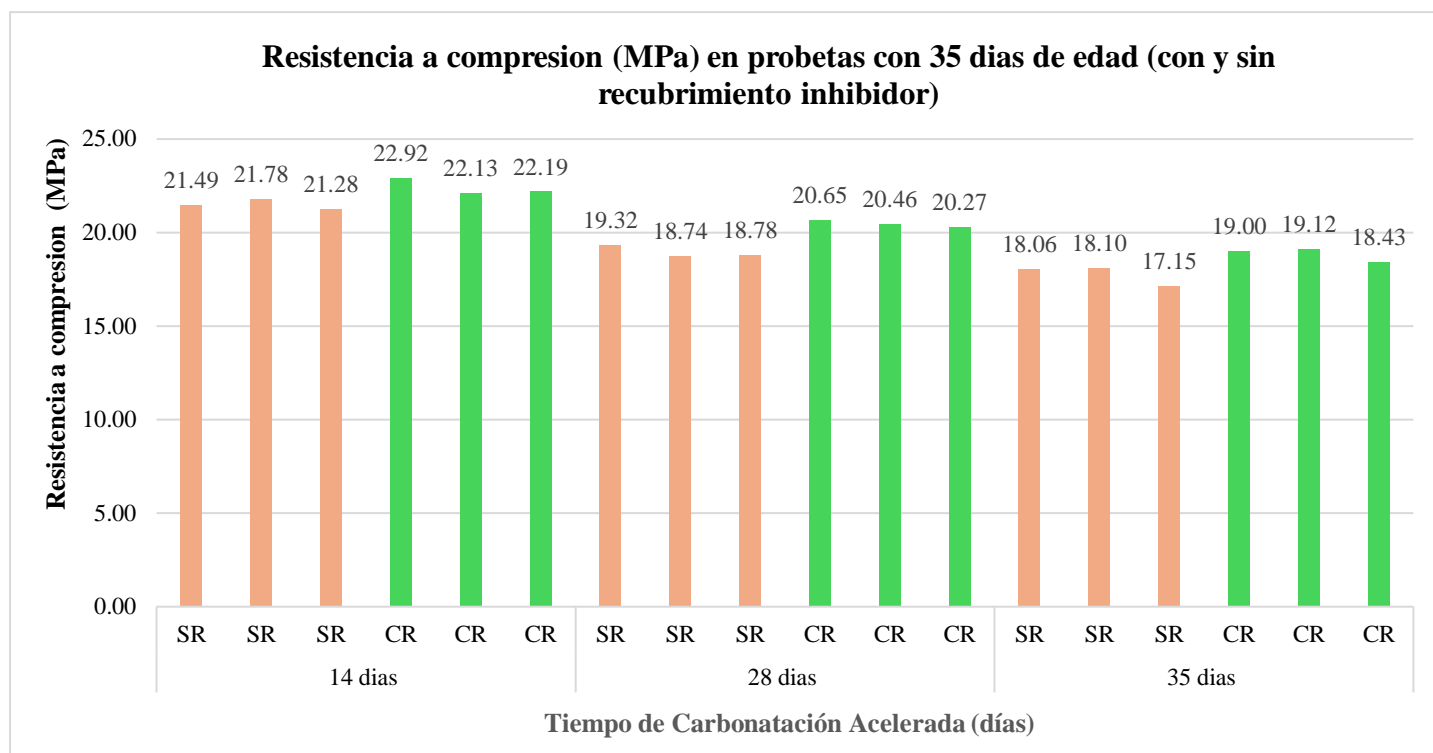
<b>Identificación</b>	<b>Relación (L/D)</b>	<b>Densidad (kg/m3)</b>	<b>Carga Máxima (KN)</b>	<b>Esfuerzo de compresión (MPa)</b>	<b>Profundidad de carbonatación promedio (mm)</b>
<b>C-CARBO-SR-14.1</b>	1.98	2169.33	177	21.49	1.09
<b>C-CARBO-SR-14.2</b>	2.01	2221.97	174.5	21.78	1.62
<b>C-CARBO-SR-14.3</b>	1.99	2225.21	172.3	21.28	1.57
<b>C-CARBO-SR-28.1</b>	1.95	2168.26	160.5	19.32	4.15
<b>C-CARBO-SR-28.2</b>	1.95	2175.73	158.9	18.74	4.29
<b>C-CARBO-SR-28.3</b>	1.98	2278.40	153.8	18.78	4.57
<b>C-CARBO-SR-35.1</b>	1.94	2067.84	155.2	18.06	5.93
<b>C-CARBO-SR-35.2</b>	2.00	2176.68	146.2	18.10	6.01
<b>C-CARBO-SR-35.3</b>	1.98	2158.67	140.8	17.15	5.72
<b>C-CARBO-CR-14.1</b>	1.98	2179.45	187.9	22.92	0.95
<b>C-CARBO-CR-14.2</b>	1.99	2172.54	181.5	22.13	0.93
<b>C-CARBO-CR-14.3</b>	1.99	2178.61	180.9	22.19	0.87
<b>C-CARBO-CR-28.1</b>	1.96	2132.18	171.3	20.65	3.45
<b>C-CARBO-CR-28.2</b>	1.99	2170.47	168.4	20.46	3.78
<b>C-CARBO-CR-28.3</b>	2.00	2176.01	164.8	20.27	3.25
<b>C-CARBO-CR-35.1</b>	1.94	2159.36	163.4	19.00	5.54
<b>C-CARBO-CR-35.2</b>	1.99	2168.94	151.7	18.51	5.12

<b>C-CARBO-CR-35.3</b>	1.97	2170.75	150.8	18.43	5.23
<b>C-CONTROL-35-1</b>	1.95	2122.01	161.1	18.98	3.65
<b>C-CONTROL-35-2</b>	1.97	2119.50	166.3	20.29	3.22
<b>C-CONTROL-35-3</b>	1.98	2138.77	178.8	22.08	3.15

Nota: **CARBO** = Muestra Carbonatada; **CONTROL** = Muestra sin carbonatar; **SR** = Sin Recubrimiento; **CR** = Con Recubrimiento

Los datos completos de dimensiones, densidad, carga máxima, factor de corrección y esfuerzo de compresión para cada cilindro, así como la clasificación del modo de falla, se encuentran en el **Anexo 10**, en la **Tabla 26** y **Tabla 27**

**Figura 3:** Comparación de la resistencia a compresión probetas con y sin recubrimiento bajo carbonatación acelerada.



Nota: **SR** = Sin Recubrimiento; **CR** = Con Recubrimiento

El registro fotográfico del proceso de ensayo a compresión, incluyendo alineación vertical y patrón de rotura, se identifican en la **Figura 44**, **Figura 45** y **Figura 46**. Además, que puede identificarse todo el procedimiento descrito en el **Anexo 10**.

Las probetas del grupo control conservaron los valores más altos de resistencia a compresión, resultado esperado dado que su matriz cementicia permaneció libre de alteraciones químicas al no someterse a carbonatación acelerada. En ausencia de agresión por CO<sub>2</sub> el hormigón mantiene la integridad microestructural y la capacidad mecánica asociadas a su dosificación original [15].

Mientras que las probetas sometidas a carbonatación registraron una disminución progresiva de la resistencia a compresión conforme avanzó el tiempo de exposición, tendencia vinculada a la transformación de los productos de hidratación y al reajuste de la porosidad interna [1], [4]. Esta pérdida de resistencia fue más acusada en las probetas sin recubrimiento, lo que indica que la falta de protección superficial favorece una penetración más rápida del CO<sub>2</sub> y acelera el deterioro de las propiedades mecánicas del material.

Si bien algunos autores indican que la carbonatación puede generar una densificación superficial inicial del hormigón, debido a la formación de carbonato de calcio en los poros

[1], este efecto suele ser limitado a capas muy superficiales y no necesariamente se traduce en una mejora del comportamiento mecánico global.

En el estudio la disminución de la resistencia puede asociarse al avance del frente carbonatado hacia zonas internas del hormigón donde la modificación de la microestructura y la reducción de la alcalinidad pueden afectar la cohesión del material, especialmente bajo exposición prolongada [4], [15]

Las probetas con recubrimiento mostraron valores de resistencia superiores respecto a las probetas sin protección para los mismos tiempos de exposición, lo que sugiere que la limitación del ingreso de CO<sub>2</sub> contribuyó indirectamente a conservar las propiedades mecánicas del hormigón [1]

No obstante, es importante señalar que la resistencia a compresión es una propiedad global del material y que la carbonatación, por sí sola, no constituye el único factor que puede influir en su variación, por lo que los resultados deben interpretarse de manera conjunta con el análisis de la profundidad de carbonatación.

#### 4.4. Análisis de variación porcentual de la profundidad de carbonatación

Con el fin de cuantificar el efecto del recubrimiento inhibitor, se calculó la reducción porcentual de la profundidad promedio de carbonatación entre las probetas sin recubrimiento y aquellas con tratamiento superficial, para cada período de exposición.

**Tabla 3:** Variación porcentual de la profundidad de carbonatación por grupos de exposición

<b>Tiempo de exposición (días)</b>	<b>Profundidad promedio sin recubrimiento (mm)</b>	<b>Profundidad promedio con recubrimiento (mm)</b>	<b>Reducción porcentual (%)</b>
<b>14</b>	1.43	0.92	35.75 %
<b>28</b>	4.34	3.49	19.45 %
<b>35</b>	5.89	5.30	10.02 %

De acuerdo con la **Tabla 3**. A los 14 días, la diferencia porcentual entre ambos grupos fue del 35.75 %, siendo menor la profundidad promedio en las probetas con recubrimiento. De forma continua, En el período de 28 días, la diferencia porcentual registrada fue del 19.45 %. Y finalmente Para los 35 días, la variación porcentual entre grupos fue del 10.02 %. Los valores obtenidos muestran una disminución progresiva en la magnitud relativa de la diferencia conforme aumenta el tiempo de exposición.

Estos resultados evidencian que el recubrimiento a base de sílice de cáscara de arroz actúa como barrera frente al ingreso de CO<sub>2</sub>, particularmente en etapas tempranas de exposición acelerada, por lo que, al contrastar con el estudio de Wan, Su, Li [25], quienes reportaron reducciones del 11.0 al 45.7% a 28 días y 6.8 al 33.5% a 56 días utilizando nano-sílice incorporada en la mezcla, se observa que ambas estrategias son efectivas para mitigar la carbonatación, aunque operan mediante mecanismos distintos: el recubrimiento actúa como barrera superficial que limita el ingreso de CO<sub>2</sub>, mientras que la nano-sílice mejora la microestructura interna mediante reacción puzolánica, un hallazgo convergente en ambos estudios es la tendencia decreciente de la efectividad protectora con el tiempo de exposición, lo que sugiere que, independientemente del mecanismo de protección (superficial o interno), la durabilidad a largo plazo requiere estrategias optimizadas o complementarias que mantengan su capacidad de protección durante períodos prolongados de exposición a ambientes agresivos.

#### 4.5. Análisis de variación porcentual de la resistencia a compresión

De manera complementaria, se evaluó la variación porcentual de la resistencia promedio a compresión entre probetas con y sin recubrimiento, con el objetivo de analizar el impacto estructural asociado al avance de la carbonatación.

**Tabla 4:** Variación porcentual de la resistencia a compresión por grupos de exposición

Tiempo de exposición (días)	Resistencia promedio sin recubrimiento (MPa)	Resistencia promedio con recubrimiento (MPa)	Diferencia porcentual (%)
14	21.52	22.41	4.01 %
28	18.95	20.46	7.41 %
35	17.77	18.85	5.72 %

De acuerdo con la **Tabla 4**, la diferencia porcentual en resistencia a compresión entre probetas con y sin recubrimiento fue del 4.01 % a los 14 días, aumentó a 7.41 % a los 28 días y se ubicó en 5.72 % a los 35 días. Esta evolución refleja que el efecto protector del recubrimiento se hace más evidente en etapas intermedias del proceso de carbonatación, cuando la difusión del CO<sub>2</sub> en las probetas sin tratamiento alcanza mayor profundidad, mientras que la ligera reducción de la diferencia a los 35 días podría asociarse a una estabilización relativa de la cinética de deterioro en ambas series. Estos valores permiten cuantificar de forma objetiva la magnitud del beneficio aportado por el tratamiento superficial en cada etapa del ensayo.

En conjunto, estos resultados muestran que, aunque la carbonatación afecta principalmente la alcalinidad y el recubrimiento del acero, también puede influir gradualmente en el comportamiento mecánico del hormigón, siendo el efecto del recubrimiento más evidente en la variable de profundidad que en la resistencia estructural, estos valores son consistentes con Li [26], quienes reportaron mejoras del 3.7% al 17.3% utilizando recubrimiento inorgánico en condiciones similares, siendo particularmente comparables las magnitudes en etapas tempranas de exposición, por su parte, Reis [27], encontraron incrementos superiores al 52% con recubrimientos tradicionales multicapa después de 60 días de carbonatación, las diferencias en magnitud pueden atribuirse principalmente al tipo de recubrimiento (sistema multicapa complejo vs. inhibidor de aplicación superficial) y a la duración de exposición (60 días vs. 35 días máximos). La tendencia decreciente observada entre 28 y 35 días (+7.41% → +5.72%) sugiere que el recubrimiento evaluado proporciona protección efectiva en etapas iniciales, aunque su capacidad de mejora mecánica puede estabilizarse con exposiciones prolongadas.

#### 4.6. Evaluación diagnóstica de los núcleos extraídos del Puente San Vicente

Los núcleos extraídos del puente San Vicente fueron analizados con un enfoque estrictamente diagnóstico, con el objetivo de caracterizar el estado del hormigón existente sin establecer relaciones causales entre variables. La resistencia fue estimada inicialmente mediante el uso del esclerómetro, seguido del ensayo destructivo en prensa hidráulica

**Tabla 5:** Comparación entre la resistencia estimada por esclerómetro y la resistencia determinada por ensayo de compresión en núcleos.

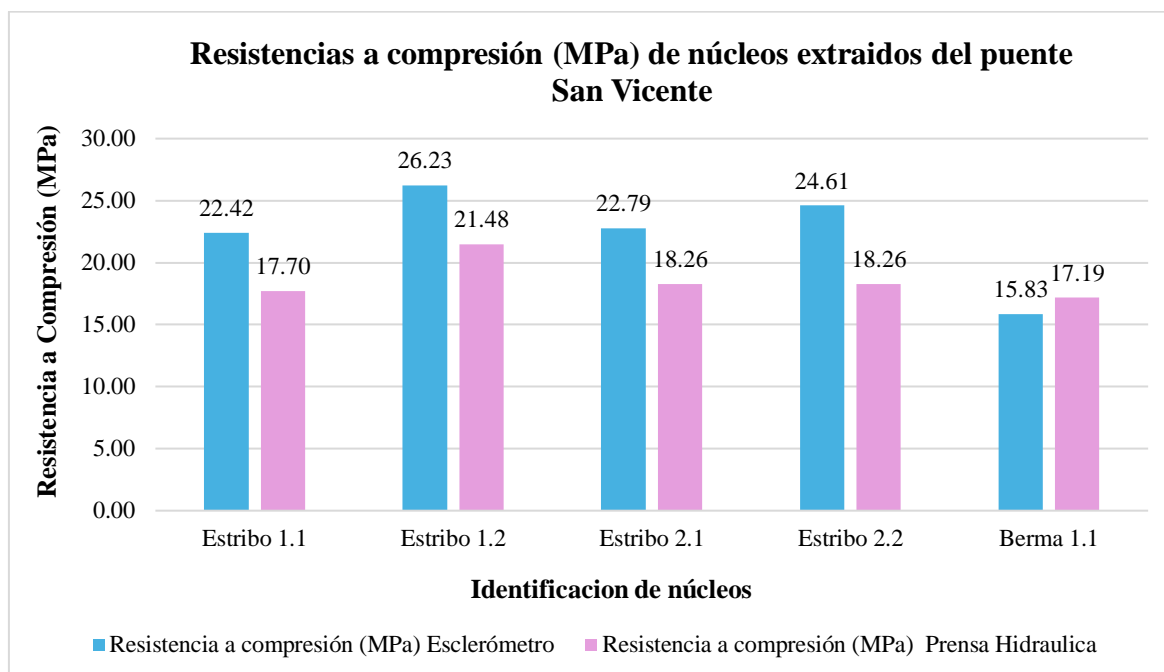
Elemento	Ubicación	Esclerómetro (MPa)	Prensa hidráulica (MPa)	Diferencia Porcentual (%)
<b>Estribo 1</b>	Punto 1	22.42	17.70	26.65
<b>Estribo 2</b>	Punto 2	26.23	21.48	22.12
<b>Estribo 2</b>	Punto 1	22.79	18.26	24.79
<b>Estribo 2</b>	Punto 2	24.61	18.26	34.76
<b>Berma 3</b>	Punto 1	15.83	17.19	7.90

La **Tabla 5** identifica que los resultados muestran diferencias que oscilaron aproximadamente entre el 30 % y 35 %, de acuerdo con el ACI 228.1R [20], es el rango de valores estimados mediante esclerómetro y los obtenidos por rotura de núcleos, comportamiento coherente con la variabilidad esperada entre métodos no destructivos y

destructivos, debido a la influencia de factores como la condición superficial del hormigón, el contenido de humedad y la heterogeneidad interna del material, lo cual explica las diferencias observadas respecto al ensayo por rotura.

La comparación completa entre los valores del esclerómetro y la resistencia por rotura de cada núcleo se halla en el **Anexo 4** en las **Tabla 19** y **Tabla 20**. E incluyendo el registro de los 10 impactos por punto de cada ubicación, se encuentra en el **Anexo 2** en las **Tabla 13** hasta la **Tabla 17**.

**Figura 4:** Comparación entre resistencia por esclerómetro y resistencia por rotura de núcleos.



Por esta razón, los resultados obtenidos mediante esclerómetro fueron utilizados únicamente como referencia preliminar, siendo la resistencia obtenida por rotura la empleada como valor representativo del comportamiento mecánico del material.

#### 4.7. Carbonatación en núcleos del puente: análisis sin correlación

El ensayo con fenolftaleína [13], aplicado a los núcleos permitió identificar la profundidad de carbonatación presente en el hormigón del puente San Vicente. Cabe aclarar que el análisis presentado en este apartado se refiere a la carbonatación desarrollada bajo condiciones naturales de servicio en el puente San Vicente, cuya exposición se ha producido durante años. En consecuencia, la interpretación aquí realizada responde a una escala temporal distinta a la empleada en los ensayos acelerados de laboratorio, sin que ello

implique equivalencias directas entre ambos escenarios, sino un contraste complementario entre comportamiento acelerado y comportamiento real en servicio.

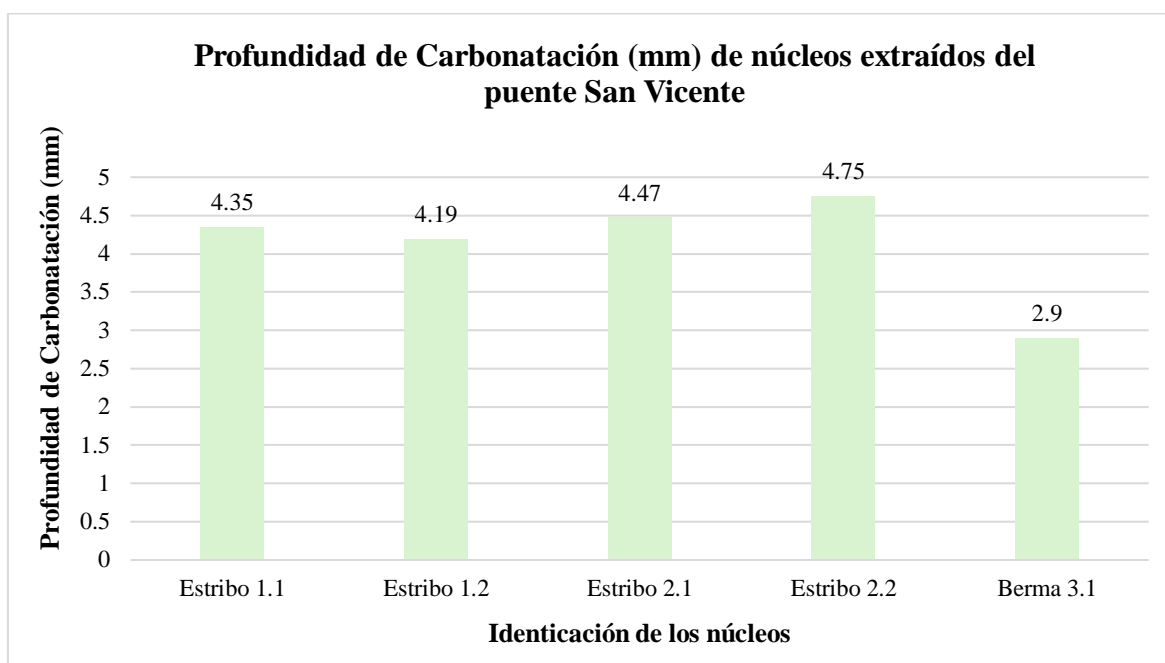
**Tabla 6:** Resultados del nivel de carbonatación (mm) de los núcleos del puente San Vicente

<b>Elemento</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Profundidad de Carbonatación</b>	<b>Nivel de Carbonatación</b>
		<b>Promedio (mm)</b>	
<b>Estribo 1</b>	Punto 1	4.35	Intermedia
<b>Estribo 2</b>	Punto 2	4.19	Intermedia
<b>Estribo 2</b>	Punto 1	4.47	Intermedia
<b>Estribo 2</b>	Punto 2	4.75	Intermedia
<b>Berma 3</b>	Punto 1	2.9	Superficial

Los valores individuales de las cuatro mediciones por núcleo y el cálculo del promedio se detallan en el **Anexo 3, Tabla 18**.

Los valores obtenidos evidenciaron la existencia de carbonatación superficial e intermedia en distintos elementos, lo cual refleja la exposición prolongada de la estructura a condiciones ambientales. Sin embargo, no se estableció una correlación directa entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión de los núcleos, debido a la presencia de múltiples variables no controladas, tales como deficiencias constructivas, variaciones en la dosificación original, compactación, curado y envejecimiento del material [12]

**Figura 5:** Profundidad de Carbonatación (mm) de núcleos extraídos del puente San Vicente



En este contexto, los resultados deben interpretarse como un diagnóstico del estado actual del hormigón y no como una relación causa–efecto atribuible exclusivamente a la carbonatación.

#### **4.8. Análisis estadístico mediante ANOVA**

Con el objetivo de determinar si las diferencias observadas entre los grupos de probetas eran estadísticamente significativas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA).

El ANOVA permitió evaluar en forma simultánea el efecto de:

1. La colocación del recubrimiento inhibidor.
2. El tiempo de exposición a la carbonatación acelerada (14, 28 y 35 días).

Y esto a la vez se aplica sobre las variables de respuesta como lo son: La profundidad de carbonatación y Resistencia a compresión.

##### **4.8.1. Análisis de la variación de la profundidad de carbonatación (mm) para los grupos evaluados.**

Con el propósito de evaluar el comportamiento del hormigón frente a la carbonatación acelerada, se analizaron los resultados correspondientes a los distintos grupos experimentales, considerando tanto el tiempo de exposición como la aplicación del recubrimiento inhibidor a base de sílice de cáscara de arroz. En esta etapa descriptiva, se

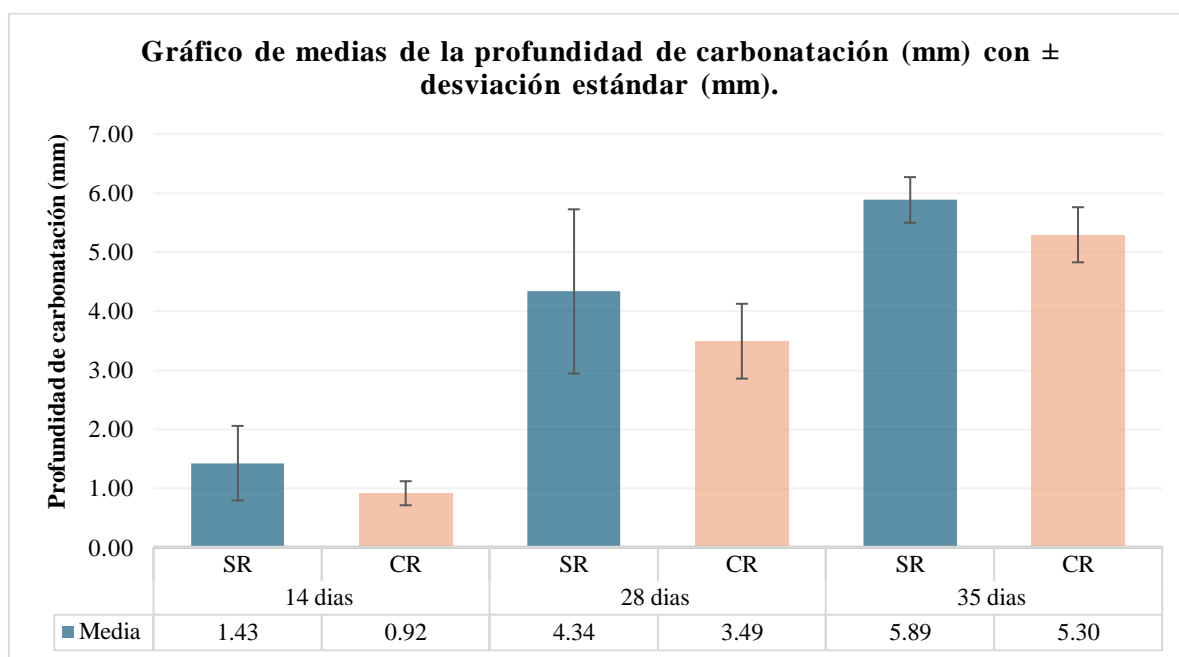
determinaron los valores medios y la variabilidad de la profundidad de carbonatación para cada condición evaluada, lo que permitió caracterizar la tendencia general de los datos y verificar la consistencia interna de las series experimentales antes de proceder al análisis estadístico inferencial. Este enfoque escalonado de lo descriptivo a lo inferencial asegura que las conclusiones posteriores se sustenten en una comprensión clara del comportamiento observado, minimizando interpretaciones derivadas de dispersión experimental o valores atípicos no detectados.

**Tabla 7:** Medias y varianzas de la profundidad de carbonatación (mm) para los grupos evaluados.

<b>Grupos</b>	<b>Carbonatación acelerada (días)</b>	<b>Recubrimiento Inhibidor</b>	<b>Media (mm)</b>	<b>Desviación estándar (mm)</b>
<b>1</b>	14	Sin Recubrimiento	1.53	0.631
		Con Recubrimiento	0.92	0.204
<b>2</b>	28	Sin Recubrimiento	4.34	1.391
		Con Recubrimiento	3.83	0.634
<b>3</b>	35	Sin Recubrimiento	5.89	0.387
		Con Recubrimiento	5.30	0.467

Los valores presentados en la **Tabla 7** muestran un incremento progresivo de la profundidad de carbonatación conforme aumenta el tiempo de exposición, comportamiento esperado debido al avance del dióxido de carbono hacia el interior del hormigón. Asimismo, se observa que las muestras con recubrimiento presentan menores profundidades promedio en comparación con aquellas sin tratamiento, lo que sugiere un efecto de barrera del recubrimiento superficial frente al ingreso de CO<sub>2</sub>.

**Figura 6:** Medias de profundidad de carbonatación (mm) con su desviación estándar (mm).



Nota: **SR** = Sin Recubrimiento; **CR** = Con Recubrimiento

La Figura 6 muestra las medias de la profundidad de carbonatación para los distintos grupos evaluados, considerando la condición de recubrimiento. Las barras representan los valores promedio y las barras de error corresponden a la desviación estándar, lo cual permite visualizar la dispersión de los datos empleada posteriormente en el análisis de varianza (ANOVA) [5]

#### 4.8.2. Análisis de la variación de la resistencia a compresión (MPa) para los grupos evaluados.

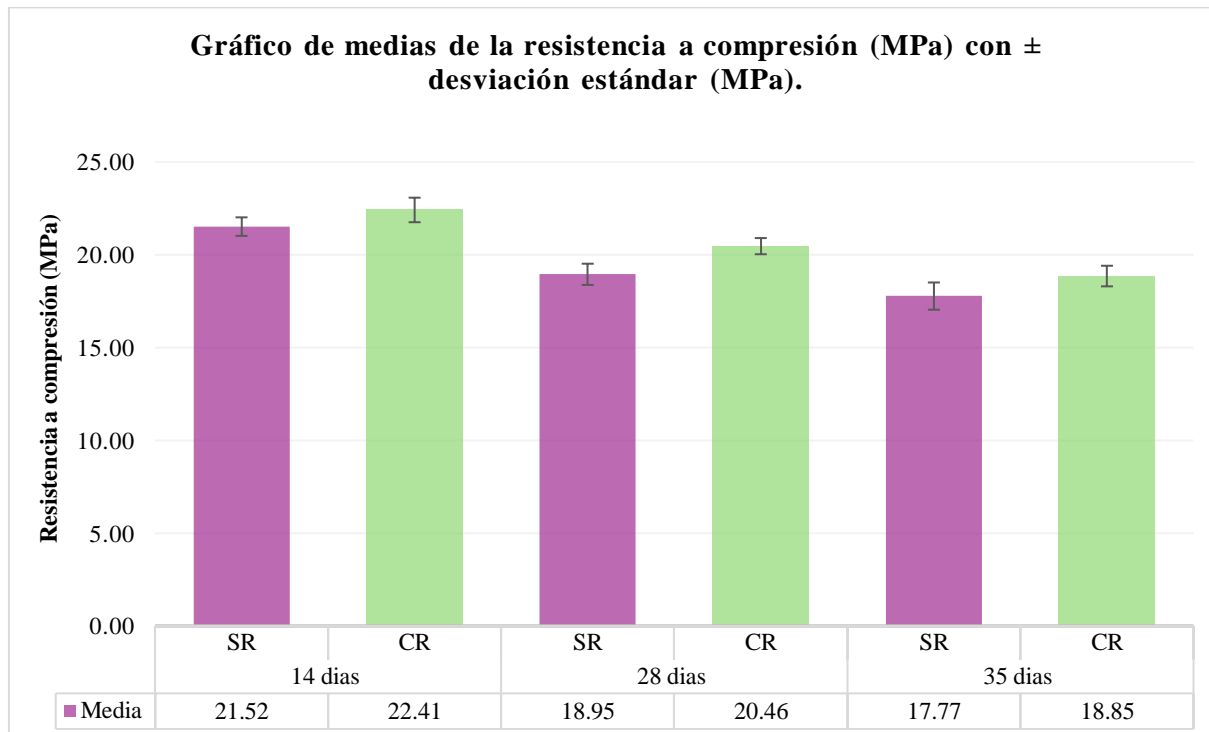
Se analizó la variación de la resistencia a compresión en función del tiempo de exposición a la carbonatación acelerada y la condición del recubrimiento con el propósito de identificar la evolución de la capacidad portante del hormigón a medida que avanza el deterioro químico. Determinando así que el recubrimiento inhibidor a base de sílice de cáscara de arroz ejerce un efecto protector significativo ya que retardando la pérdida de resistencia asociada a la reducción del pH y a la transformación de la matriz cementicia [16].

**Tabla 8:** Medias y varianzas de la resistencia a compresión (MPa) para los grupos evaluados.

Grupos	Carbonatación acelerada (días)	Recubrimiento Inhibidor	Media (MPa)	Desviación estándar (MPa)
1	14	Sin Recubrimiento	21.52	0.499
		Con Recubrimiento	22.41	0.661
2	28	Sin Recubrimiento	18.95	0.572
		Con Recubrimiento	20.46	0.435
3	35	Sin Recubrimiento	17.77	0.733
		Con Recubrimiento	18.65	0.555

Los resultados obtenidos muestran diferencias en los valores promedio de resistencia a compresión entre los distintos grupos evaluados. En general, se evidencia una tendencia a la reducción de la resistencia conforme aumenta el nivel de carbonatación, fenómeno asociado a la modificación del pH y a los cambios microestructurales del hormigón producto del avance del proceso carbonatante.

**Figura 7:** Medias de resistencia a compresión (MPa) con su desviación estándar (MPa)



Nota: **SR** = Sin Recubrimiento; **CR** = Con Recubrimiento

La Figura 7 muestra las medias de la resistencia a compresión para los distintos grupos evaluados, considerando la condición de recubrimiento. Las barras representan los

valores promedio y las barras de error corresponden a la desviación estándar, lo cual permite visualizar la dispersión de los datos empleada posteriormente en el análisis de varianza (ANOVA) [5]

**Tabla 9:** Análisis ANOVA de los resultados de Resistencia a compresión (MPa) y Profundidad de carbonatación promedio (mm) de las probetas ensayadas.

<b>Variables Dependientes</b>	<b>Variables Independientes</b>	<b>P - valor</b>	<b>F</b>	<b>F Crítico</b>	<b>Existen diferencias significativas</b>
<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>	Grupo con y sin recubrimiento inhibidor	2.25E-05	44.66469	4.74722	SI
	Tiempo de exposición a carbonatación acelerada 14, 28 Y 35 días	3.33729E-09	149.20973	3.88529	SI
<b>Profundidad de carbonatación (mm)</b>	Grupo con y sin recubrimiento inhibidor	3.2873E-05	41.25867	4.74722	SI
	Tiempo de exposición a carbonatación acelerada 14, 28 Y 35 días	5.7101E-13	652.73464	3.88529	SI

Los resultados del análisis mostraron que, para un nivel de significancia convencional, existieron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos, particularmente entre las probetas con y sin recubrimiento sometidas a los tiempos de exposición más prolongados. Esto indica que el recubrimiento a base de sílice de cáscara de arroz tuvo un efecto significativo en la reducción del avance del frente carbonatado y en la conservación de la resistencia a compresión del hormigón.

Los resultados del ANOVA [5] fueron valores de significancia inferiores a 0.05 para ambos factores evaluados confirmando de manera estadística que el tiempo de exposición a la carbonatación acelerada y la aplicación del recubrimiento inhibidor influyeron de manera significativa en el comportamiento del hormigón.

Es importante señalar que, si bien esta prueba detecta diferencias entre grupos no llega a definir por sí misma el sentido físico ni la magnitud práctica del fenómeno. Y su interpretación se complementó con el análisis técnico de las tendencias observadas

asegurando que las conclusiones combinen el rigor estadístico con la coherencia de los mecanismos de deterioro asociados a la carbonatación.

#### 4.9. Análisis post hoc de Tukey – Profundidad de carbonatación

Con el fin de identificar específicamente las diferencias entre probetas con y sin recubrimiento en cada período de exposición, se aplicó la prueba post hoc de Tukey para la variable profundidad de carbonatación.

**Tabla 10:** Análisis post hoc de Tukey para profundidad de carbonatación

Tiempos de carbonatación	Variable Dependiente	Variables Independientes	P - valor	$\alpha$	Existen diferencias significativas
14 días	Profundidad de carbonatación (mm)	Grupo con recubrimiento inhibidor	0.04039	0.05	SI
		Grupo sin recubrimiento inhibidor			
28 días	Profundidad de carbonatación (mm)	Grupo con recubrimiento inhibidor	0.01301	0.05	SI
		Grupo sin recubrimiento inhibidor			
35 días	Profundidad de carbonatación (mm)	Grupo con recubrimiento inhibidor	0.01805	0.05	SI
		Grupo sin recubrimiento inhibidor			

En el período de 14 días, el análisis arrojó un valor de  $p = 0.040397$ , inferior al nivel de significancia adoptado ( $\alpha = 0.05$ ), lo que confirma la existencia de diferencias estadísticas entre ambas condiciones experimentales. Este resultado coincide con la diferencia observada en las medias, donde las probetas sin recubrimiento presentaron mayores profundidades.

A los 28 días, el valor obtenido por el Tukey fue  $p = 0.013015$ , confirmando que la diferencia entre los grupos con y sin recubrimiento se mantuvo estadísticamente significativa. En esta etapa se observó una mayor separación entre las medias de profundidad de carbonatación, lo cual concuerda con la cinética esperada del proceso: a medida que avanza la exposición, la difusión del  $\text{CO}_2$  en las probetas sin protección se intensifica, mientras que el recubrimiento inhibitor continúa ejerciendo su efecto de barrera. Esta divergencia progresiva refuerza la evidencia de que el tratamiento superficial modula la velocidad de avance del frente carbonatado, incluso en fases intermedias del deterioro acelerado.

A los 35 días, la prueba indicó un valor de  $p = 0.018053$ , reafirmando que la condición del recubrimiento influyó significativamente en la profundidad medida bajo condiciones de carbonatación acelerada.

Los resultados del análisis post hoc de Tukey confirmaron que el recubrimiento inhibitor generó diferencias significativas respecto al grupo sin tratamiento en todos los períodos evaluados 14, 28 y 35 días para la variable profundidad de carbonatación. Esta consistencia en los hallazgos refuerza la evidencia de que el efecto protector del tratamiento superficial no es circunstancial, sino que se mantiene activo durante toda la exposición acelerada llegando a retardar de forma sostenida el avance de la carbonatación y validando su potencial como estrategia de mitigación del deterioro por  $\text{CO}_2$ .

#### **4.10. Análisis post hoc de Tukey – Resistencia a compresión**

Se aplicó la prueba post hoc de Tukey para evaluar la variable resistencia a compresión comparando estadísticamente las probetas con y sin recubrimiento en cada tiempo de exposición 14, 28 y 35 días. Este análisis permitió identificar si las diferencias observadas en la capacidad portante del hormigón eran atribuibles al efecto del recubrimiento inhibitor aportando así un respaldo cuantitativo a la interpretación técnica de los resultados mecánicos.

**Tabla 11:** Análisis post hoc de Tukey para resistencia a compresión

Tiempos de carbonatación	Variable Dependiente	Variab Independientes	P - valor	$\alpha$	Existen diferencias significativas
14 días	Resistencia a compresión (MPa)	Grupo con recubrimiento inhibidor	0.036532	0.05	SI
		Grupo sin recubrimiento inhibidor			
28 días	Resistencia a compresión (MPa)	Grupo con recubrimiento inhibidor	0.002245	0.05	SI
		Grupo sin recubrimiento inhibidor			
35 días	Resistencia a compresión (MPa)	Grupo con recubrimiento inhibidor	0.045417	0.05	SI
		Grupo sin recubrimiento inhibidor			

En el período de 14 días, se obtuvo un valor de  $p = 0.0365327$ , indicando diferencias significativas entre grupos. Esta diferencia, aunque menor en magnitud porcentual respecto a la variable profundidad, confirma que la condición del recubrimiento influyó en el comportamiento mecánico.

Para los 28 días, el valor registrado fue  $p = 0.0022452$ , mostrando una diferencia altamente significativa entre probetas con y sin tratamiento superficial y de acuerdo con la tendencia observada en los valores promedio.

Y a los 35 días, el análisis de Tukey arrojó un valor de  $p = 0.0454172$  aunque muy cercano al límite de significancia llega a dar validez el efecto del recubrimiento se mantiene detectable incluso en etapas avanzadas de la exposición acelerada.

En conjunto, los valores de  $p$  registrados en los tres períodos evaluados de 14, 28 y 35 días evidencian que la condición superficial del hormigón influyó de manera consistente en su comportamiento mecánico, reforzando la evidencia de que el recubrimiento a base de sílice de cáscara de arroz contribuye a preservar la resistencia del material frente al avance del frente carbonatado.

#### **4.11. Resultados del análisis post hoc**

En conjunto, los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba post hoc de Tukey confirman que las diferencias observadas entre probetas con y sin recubrimiento presentan sustento estadístico al nivel de significancia adoptado ( $\alpha = 0.05$ ).

Al analizar la variable “profundidad de carbonatación” por medio de las pruebas post hoc se confirmó la existencia de diferencias estadísticamente significativas en los tres períodos evaluados 14, 28 y 35 días. Y en cuanto a la “resistencia a compresión” también se identificaron diferencias significativas entre las probetas con y sin recubrimiento en cada etapa de exposición, lo que sugiere que la barrera superficial no solo limita la penetración del CO<sub>2</sub> sino que contribuye a preservar las propiedades mecánicas del hormigón.

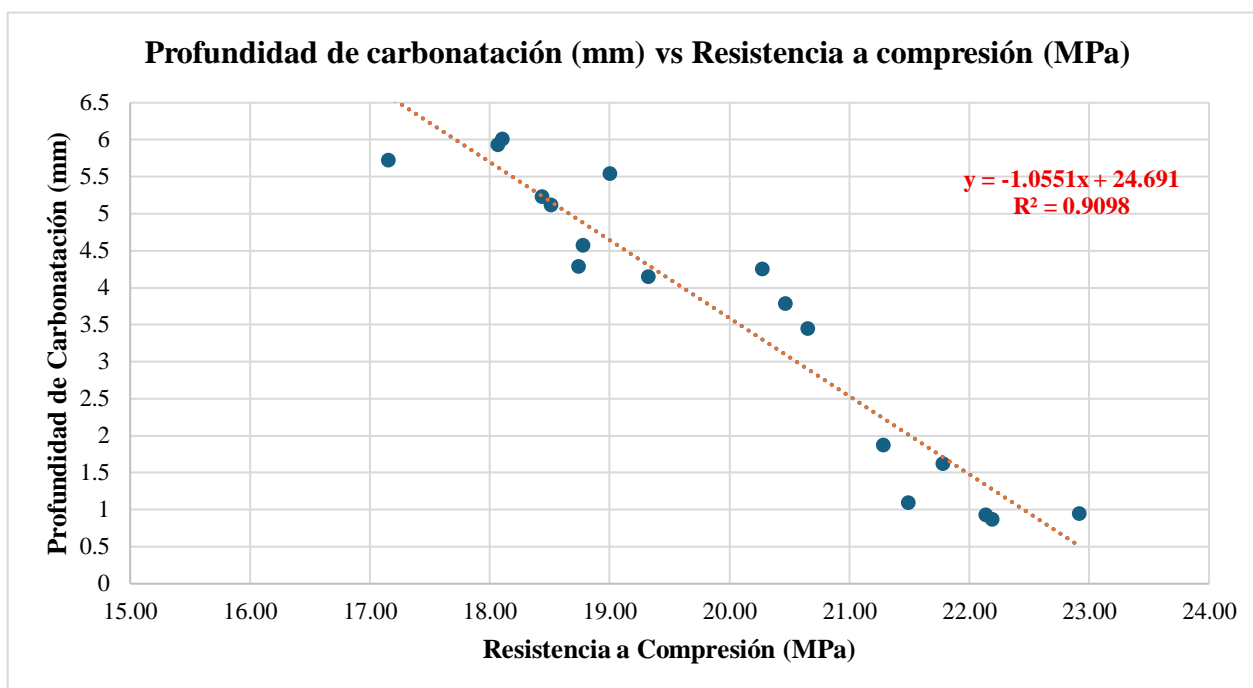
Los resultados respaldan estadísticamente el comportamiento observado bajo carbonatación acelerada y validan que la aplicación del recubrimiento inhibidor influyó de forma significativa en el desempeño del material durante todo el programa experimental. Sin embargo estas afirmaciones se alinean con el alcance del estudio acelerado y no deben interpretarse como equivalencias directas a la durabilidad real de estructuras expuestas a condiciones naturales.

#### **4.12. Análisis de correlación entre profundidad de carbonatación y resistencia**

Es importante precisar que el análisis de correlación se circunscribió exclusivamente a las probetas de laboratorio, donde las condiciones de exposición, dosificación y curado fueron estrictamente controladas, garantizando la homogeneidad necesaria para establecer relaciones estadísticas válidas. Por el contrario, en los núcleos extraídos del puente San Vicente convergen múltiples variables inherentes a la construcción y al envejecimiento natural como variaciones en la dosificación original, condiciones de compactación, curado in situ y exposición ambiental no uniforme que introducen dispersión en los datos y dificultan la identificación de patrones correlacionales confiables. Esta delimitación metodológica permite interpretar los coeficientes de Pearson y Spearman como indicadores del comportamiento del material bajo condiciones reproducibles, sin extrapolar conclusiones a escenarios reales donde la complejidad de factores intervinientes requiere enfoques de evaluación complementarios [5].

El coeficiente de Pearson se utilizó para analizar la existencia de una relación lineal entre ambas variables, mientras que el coeficiente de Spearman permitió evaluar la relación monótonica, independientemente de la distribución de los datos [5], [6]

**Figura 8:** Profundidad de carbonatación (mm) vs Resistencia a compresión (MPa)



La correlación negativa indica que, conforme aumenta el avance del frente carbonatado, la resistencia del hormigón tiende a disminuir bajo las condiciones controladas del ensayo. Sin embargo, la presencia de correlación estadística no implica necesariamente causalidad directa, ya que la resistencia a compresión puede verse influenciada por múltiples factores adicionales.

**Tabla 12:** Resultados de la aplicación de las pruebas de correlación estadística entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión

Tipo de Correlación	Variables Independientes	Coefficiente de correlación	Interpretación
Pearson	Profundidad de carbonatación (mm)	$r = -0.953856$	Correlación negativa muy fuerte
	Resistencia a compresión (MPa)		
Spearman	Profundidad de carbonatación (mm)	$\rho = -0.900000$	Correlación negativa muy fuerte
	Resistencia a compresión (MPa)		

**Nota:** El análisis de correlación se realizó exclusivamente con probetas sometidas a carbonatación acelerada, sin considerar probetas de control.

Con el propósito de evaluar la relación entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión del hormigón, se aplicaron los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman [5], [6]. El análisis se efectuó exclusivamente con las probetas sometidas a carbonatación acelerada, sin considerar probetas de control, con el fin de

analizar el comportamiento del material bajo condiciones efectivas de exposición al dióxido de carbono.

El coeficiente de correlación de Pearson arrojó un valor de  $r = -0.9539$ , acompañado de un p-valor significativamente menor a 0.05, lo que indica la existencia de una correlación lineal negativa muy fuerte entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión [5], [6]. Este resultado evidencia que el incremento del frente de carbonatación se asocia directamente con una disminución progresiva de la resistencia mecánica del hormigón.

De manera complementaria, el análisis no paramétrico mediante el coeficiente de Spearman presentó un valor de  $\rho = -0.90$ , también con un p-valor inferior al nivel de significancia adoptado, confirmando la presencia de una correlación negativa muy fuerte entre ambas variables [5], [6]. Este resultado valida la tendencia observada independientemente de la distribución de los datos y del tamaño muestral.

Ambos coeficientes afirman que el avance de la profundidad de carbonatación incide de forma directa y significativa estadísticamente en la resistencia a compresión del hormigón. Y de acuerdo con lo establecido en la literatura técnica, que indica que la progresiva reducción del pH y las reconfiguraciones microestructurales propias del proceso alteran la cohesión interna de la matriz cementicia y se repercuten en el desempeño mecánico global del hormigón [1], [4].

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- a) La investigación demostró que la carbonatación acelerada influye significativamente en las propiedades del hormigón, reduciendo progresivamente su resistencia a compresión (coeficiente de correlación de Pearson  $r = - 0.953856$ ), mientras que la aplicación del recubrimiento a base de sílice de cáscara de arroz constituyó una alternativa técnica viable y sostenible para mitigar el avance del frente carbonatado, aportando una solución con potencial aplicación en estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes agresivos, como el puente San Vicente de la vía Riobamba-Macas. Estos resultados confirman que el incremento de la profundidad de carbonatación se asocia con una disminución de la resistencia mecánica del hormigón.
  
- b) La evaluación in situ del hormigón del puente San Vicente mediante extracción de núcleos y ensayo con fenolftaleína evidenció la presencia de carbonatación en condiciones reales de servicio, con profundidades que oscilaron entre 2.9 mm ubicando un nivel superficial en la berma y 4.75 mm identificando un nivel intermedio en estribos, reflejando el envejecimiento progresivo de la estructura expuesta a condiciones ambientales naturales. Estos valores obtenidos tras años de exposición real contrastan con los ensayos acelerados de laboratorio pero complementan la comprensión del fenómeno bajo diferentes escalas temporales.
  
- c) Los núcleos extraídos del puente San Vicente presentaron resistencias a compresión entre 17.19 MPa y 21.48 MPa, con una diferencia promedio del 23.25% respecto a las estimaciones obtenidas con el esclerómetro, confirmando que los métodos no destructivos son útiles para obtener referencias preliminares aceptables pero que la resistencia real debe determinarse mediante ensayos destructivos conforme a ASTM C42/C42M, dada la influencia de variables como la humedad superficial y las condiciones de ejecución original.
  
- d) Se formuló con éxito un recubrimiento inhibidor sostenible utilizando sílice purificada de cáscara de arroz, con rendimiento promedio de calcinación del 17.10% demostrado en **Anexo 6**. La mezcla se formuló con 100 g de sílice, 50 g de maicena y 20 g de silicato de sodio como se indica en el **Anexo 7**, demostrando viabilidad técnica que promueve

un adecuado acogimiento ambiental y económico al aprovechar y transformar un residuo agroindustrial, alineándose con los principios de economía circular al generar un material funcional para la protección de hormigón que reduzca el impacto ambiental que se asocie a su disposición final.

- e) El proceso de carbonatación acelerada inducido en probetas durante 14, 28 y 35 días evidenció un avance progresivo del frente carbonatado, alcanzando profundidades de 1.43 mm, 4.34 mm y 5.89 mm en probetas sin recubrimiento, y de 0.92 mm, 3.49 mm y 5.30 mm en probetas con recubrimiento. Paralelamente, se observó una disminución progresiva de la resistencia a compresión conforme aumentó el tiempo de exposición, siendo este comportamiento más evidente en las probetas sin recubrimiento, aunque el impacto mecánico fue moderado en comparación con la variación de profundidad, lo cual es consistente con el comportamiento físico del fenómeno que afecta inicialmente la alcalinidad antes de generar deterioros estructurales significativos. Estos resultados confirman que el recubrimiento a base de sílice de cáscara de arroz redujo el avance del frente carbonatado bajo condiciones de carbonatación acelerada.
  
- f) El análisis comparativo entre probetas tratadas y no tratadas demostró que el recubrimiento redujo la profundidad de carbonatación entre 35.75% a los 14 días, 19.45% a los 28 días y 10.02% a los 35 días, lo que indica una mayor eficacia en etapas tempranas del proceso. El análisis de correlación reveló una relación inversa muy fuerte entre profundidad de carbonatación y resistencia a compresión con un coeficiente de Pearson de  $r = - 0.9539$ , y complementado con un coeficiente de Spearman  $\rho = - 0.90$ . Las pruebas ANOVA y Tukey confirmaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) en todos los períodos evaluados identificados en las **Tabla 9**, **Tabla 10** y **Tabla 11**, validando que la aplicación del recubrimiento influyó significativamente en la reducción del avance del frente carbonatado y en la conservación de las propiedades mecánicas del hormigón, lo que demuestra un efecto mitigador del tratamiento superficial frente al ingreso de  $\text{CO}_2$ .
  
- g) La evaluación de los núcleos identificados en la **Tabla 6** permitió constatar la presencia de carbonatación en servicio, es fundamental recalcar que estos resultados no deben extrapolarse directamente a equivalencias en años de vida útil. El programa experimental acelerado fue diseñado con fines comparativos y controlados, por lo que su interpretación

debe circunscribirse al alcance metodológico del estudio, evitando generalizaciones sobre el desempeño real a largo plazo sin considerar las variables específicas de cada estructura.

- h) El uso de sílice de cáscara de arroz se posiciona como un componente prometedor para el desarrollo de recubrimientos protectores de bajo impacto. Su implementación en estrategias de mitigación de la carbonatación no solo responde a la necesidad de mejorar la durabilidad del hormigón armado, sino que también promueve la valorización de residuos agroindustriales, alineando la innovación en materiales con los objetivos de sostenibilidad y economía circular.,
- i) La comparación entre los resultados de laboratorio y los núcleos extraídos del puente permitió establecer un contraste entre comportamiento acelerado y comportamiento en servicio real, aportando una visión integral del fenómeno de carbonatación bajo diferentes condiciones de exposición.
- j) La estandarización de los procedimientos de ensayo permitió establecer un rigor dentro de las mediciones de la profundidad de carbonatación por un único evaluador sugerido en el **Anexo 3** y la toma de múltiples lecturas por probeta identificadas en la **Tabla 25** contribuyó a minimizar la variabilidad experimental y fortalecer la confiabilidad de los datos obtenidos respaldando la solidez de las inferencias estadísticas realizadas.

## 5.2. Recomendaciones

- A. Se recomienda ampliar los períodos de exposición en futuros ensayos de carbonatación acelerada con intervalos superiores a los 35 días que se evaluaron en este estudio. Esta extensión permitiría estudiar el comportamiento del recubrimiento inhibitor en etapas más avanzadas del deterioro analizando la estabilidad de su capacidad protectora a lo largo del tiempo.
- B. Se sugiere complementar los ensayos acelerados con diseños de exposición ambiental controlada o *in situ* para contrastar el avance del fenómeno bajo condiciones naturales. Para facilitar una calibración más precisa entre la aceleración de laboratorio y el envejecimiento real del hormigón pero sin establecer equivalencias directas entre ambas escalas temporales.
- C. En investigaciones posteriores se sugiere utilizar cámaras de carbonatación equipadas con sensores de monitoreo continuo de concentración de CO<sub>2</sub> juntamente con temperatura y humedad relativa, para garantizar condiciones experimentales más estandarizadas y reproducibles que reduzca la incertidumbre de la estimación empírica de las variables ambientales.
- D. Por el tamaño muestral reducido ( $n = 3$  por grupo) los resultados obtenidos mediante ANOVA y Tukey deben interpretarse como evidencia preliminar únicamente. Se recomienda que futuras investigaciones incrementen el número de especímenes por grupo experimental para mejorar la robustez estadística y la validez de los resultados.
- E. Se sugiere evaluar el desempeño del recubrimiento bajo distintas variables de formulación y aplicación como pudieran ser espesores de capa, las proporciones de componentes, los tipos de cemento y relaciones agua/cemento. Esta caracterización permitiría optimizar la formulación identificando la configuración más eficiente y permita definir rangos de aplicabilidad para diferentes contextos estructurales.
- F. Se aconseja evaluar el desempeño del recubrimiento a base de sílice de cáscara de arroz en diferentes condiciones de dosificación, espesores de aplicación y tipos de hormigón,

con el fin de optimizar su efectividad y determinar su aplicabilidad en distintos contextos estructurales.

- G. Se aconseja incorporar técnicas de caracterización microestructural como porosimetría por intrusión de mercurio, el análisis termogravimétrico y microscopía electrónica de barrido, pues aportarían evidencia directa sobre el mecanismo de acción del recubrimiento identificando la modificación de la red porosa y la interacción fisicoquímica entre la sílice, la pasta cementicia y el CO<sub>2</sub>.
- H. Se sugiere considerar la aplicación del recubrimiento como medida preventiva en obras nuevas o como intervención de mantenimiento en estructuras existentes expuestas a ambientes con riesgo de carbonatación.
- I. En futuras investigaciones se debería evaluar el recubrimiento frente a otros mecanismos de deterioro como la penetración de cloruros, los ciclos de humedad-secado y el ataque por sulfatos, para determinar si el sistema mantiene su eficacia en escenarios de exposición combinada más cercanos a la realidad de muchas infraestructuras viales.
- J. Para concluir, se recomienda continuar explorando la valorización de residuos agroindustriales como materia prima para materiales de protección del hormigón. Profundizar en este campo no solo fortalecerá la sostenibilidad de las prácticas constructivas, sino que también fomentará el desarrollo de soluciones técnicas locales, económicamente viables y ambientalmente responsables.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th edition. Harlow, England, 2011.
- [2] V. G. Papadakis, C. G. Vayenas, and M. N. Fardis, “Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation,” *ACI Mater. J.*, vol. 88, no. 4, pp. 363–373, 1991.
- [3] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, and R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Weinheim, Germany, 2004.
- [4] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th edition. New York, USA, 2014.
- [5] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th edition. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017.
- [6] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 6.<sup>a</sup> edición. México D. F., México: McGraw-Hill Education, 2018.
- [7] American Concrete Institute, “ACI 562-19: Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures,” Farmington Hills, Michigan, USA, 2019.
- [8] G. A. Habeeb and H. B. Mahmud, “Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material,” *Materials Research*, vol. 13, pp. 185–190, 2010.
- [9] ASTM International, “ASTM C42/C42M – Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete,” West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [10] American Concrete Institute, “ACI 222R-11: Protection of Metals in Concrete Against Corrosion,” Farmington Hills, MI, USA, 2011.
- [11] K. Tuutti, “Corrosion of Steel in Concrete,” Stockholm, Sweden, 1982.
- [12] Fédération internationale du béton (fib), “fib Model Code for Concrete Structures,” Lausanne, Switzerland, 2010.
- [13] RILEM Technical Committee 56-MHM, “CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth,” 1989.

- [14] AENOR, “UNE-EN 13295:2004. Products and systems for the protection and repair of concrete structures — Test methods — Determination of resistance to carbonation,” Madrid, Spain, 2004.
- [15] V. T. Ngala and C. L. Page, “Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 7, pp. 995–1007, 1997.
- [16] American Concrete Institute, “ACI 201.2R-08: Guide to Durable Concrete,” Farmington Hills, MI, 2016.
- [17] K. Ganesan, K. Rajagopal, and K. Thangavel, “Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 8, pp. 1675–1683, 2008.
- [18] ASTM International, “ASTM C805/C805M – Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete,” West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [19] ASTM International, “ASTM C39/C39M – Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [20] American Concrete Institute, “ACI 228.1R-03: In-Place Methods to Estimate Concrete Strength,” Farmington Hills, Michigan, USA, 2003.
- [21] International Organization for Standardization, “ISO 1920-12: Testing of concrete — Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete — Accelerated carbonation method,” Geneva, Switzerland, 2015.
- [22] Nordtest, “NT Build 356: Concrete, Repairing Materials and Protective Coatings — Determination of Resistance to Carbonation,” Espoo, Finland, 2007.
- [23] C. Andrade, C. Alonso, and F. J. Molina, “Cover cracking as a function of reinforcement corrosion,” *Mater. Struct.*, vol. 32, no. 8, pp. 435–443, 1999.
- [24] American Concrete Institute, “ACI 201.2R-16: Guide to Durable Concrete,” Farmington Hills, MI, USA, 2016.
- [25] H. Wan, X. Su, and Z. Li, “Effects of nano silica on carbonation resistance of concrete,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 275, p. 02001, 2019.

- [26] Q. Li, Z. Li, G. Yuan, and Q. Shu, “The effect of a proprietary inorganic coating on compressive strength and carbonation depth of simulated fire-damaged concrete,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 65, no. 11, pp. 651–659, 2013.
- [27] Rúben. Reis, Aires. Camões, Maria. Ribeiro, Rui. Malheiro, and Eduardo. Fernandes, “Concrete Protection Against Carbonation by Traditional Coatings,” *Sci*, vol. 8, no. 2 <https://doi.org/10.3390/sci8020029>, p. 29, 2026.
- [28] ASTM International, “ASTM C31/C31M – Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field,” West Conshohocken, PA, USA, 2020.

## ANEXOS

### **Anexo 1:** Extracción y preparación de núcleos de hormigón del puente San Vicente (ASTM C42/C42M)

La extracción de núcleos de hormigón se realizó in situ en el puente objeto de estudio, con el fin de obtener muestras representativas para los ensayos de resistencia a compresión y evaluación de la carbonatación, el procedimiento se desarrolló conforme a los lineamientos establecidos en la ASTM C42/C42M [9], normativa que regula la obtención y preparación de núcleos de hormigón endurecido.

La operación de extracción se planificó en cinco puntos seleccionados en la estructura: dos ubicados en los estribos considerando el lado derecho como el izquierdo y un punto adicional en la berma en la zona central. Se buscó capturar la variabilidad del comportamiento del hormigón en elementos sometidos a distintas condiciones de exposición ambiental y niveles de sollicitación estructural, obteniendo una muestra representativa que refleja la heterogeneidad propia de una estructura en servicio para fortalecer la validez diagnóstica de los ensayos posteriores y permitiendo una interpretación más robusta del estado real del material.

Previamente a la perforación, se hizo la instalación y anclaje de la máquina extractora de núcleos sobre cada elemento estructural, el anclaje se efectuó mediante pernos mecánicos, utilizando un rotomartillo para la perforación inicial, garantizando la estabilidad del equipo y la correcta alineación durante el proceso de extracción, la secuencia de trabajo inició en el estribo izquierdo, continuó en el estribo derecho, se repitió el procedimiento en el segundo estribo y, finalmente, se realizó la extracción en la berma.



**Figura 9:** Anclaje del extractor de núcleos al elemento con pernos mecánicos.

En la berma se utilizó un detector de acero con el objetivo de identificar la presencia de armaduras y evitar la extracción en zonas con refuerzo para asegurar así la integridad estructural del elemento antes de la perforación.



**Figura 10:** Detector de acero de refuerzo.

Durante el proceso de perforación se empleó abundante agua, la cual cumplió una doble función: refrigerar la corona diamantada y reducir la generación de polvo, evitando alteraciones térmicas que pudieran afectar las propiedades del hormigón extraído, una vez completada la extracción, los núcleos obtenidos fueron retirados cuidadosamente, identificados y colocados en fundas plásticas herméticas para su transporte al laboratorio.



**Figura 11:** Extracción del núcleo.

El almacenamiento en fundas plásticas se realizó con el fin de conservar la humedad interna de las muestras, minimizando la pérdida de agua y preservando las condiciones originales del hormigón, de acuerdo con las recomendaciones técnicas para ensayos posteriores de resistencia y durabilidad, finalmente, los núcleos fueron trasladados al laboratorio para su preparación y evaluación correspondiente.



**Figura 12:** Núcleo extraído.

## **Anexo 2:** Ensayo no destructivo con esclerómetro tipo Schmidt (ASTM C805/C805M)

El ensayo con esclerómetro se realizó in situ con el objetivo de estimar de manera no destructiva la resistencia a compresión del hormigón en los mismos puntos donde posteriormente se efectuó la extracción de núcleos, permitiendo así una comparación directa entre resultados indirectos y directos, el procedimiento se desarrolló conforme a los lineamientos establecidos en la ASTM C805/C805M [18], normativa aplicable para la evaluación de la dureza superficial del hormigón mediante martillo de rebote.

El ensayo se ejecutó en cinco puntos previamente definidos en la estructura (dos estribos, lados derecho e izquierdo, y un punto en la berma), garantizando coherencia espacial entre los distintos métodos de evaluación empleados en la investigación, en cada punto de medición se realizaron 30 impactos o disparos, distribuidos uniformemente sobre la superficie del hormigón, evitando zonas con defectos visibles o segregación,

Durante la ejecución del ensayo, el esclerómetro fue colocado en posición perpendicular a la superficie del elemento, correspondiendo a un ángulo de inclinación de  $90^\circ$ , este aspecto fue considerado fundamental, ya que el valor del índice de rebote depende directamente de la orientación del equipo, siendo necesario relacionar los resultados obtenidos con la curva de calibración correspondiente al ángulo de aplicación.



**Figura 13:** Ensayo con el esclerómetro, ángulo de  $90^\circ$ .

Los valores individuales registrados en cada punto fueron posteriormente analizados y depurados, descartando lecturas atípicas cuando correspondía, y se procedió al cálculo del valor promedio del índice de rebote para cada zona evaluada, por lo que, este valor promedio fue considerado como representativo del comportamiento superficial del hormigón en cada punto de ensayo, finalmente, a partir del índice de rebote promedio y considerando el ángulo de aplicación de 90°, se realizó la estimación de la resistencia a compresión del hormigón.

**Tabla 13:** Valores del esclerómetro en el primer estribo lado derecho.

<b>Ubicación</b>	<b>Estribo 1</b>	<b>Derecha</b>	<b>Angulo °</b>	<b>-90</b>
<b>#golpe</b>	Valor esclerómetro	Valor del Punto (N/mm <sup>2</sup> )	Valor del Punto (kg/cm <sup>2</sup> )	Valor de Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>1</b>	23	15.7	160.09	228.62
<b>2</b>	24	16.7	170.29	
<b>3</b>	25	17.7	180.49	
<b>4</b>	26	19.4	197.82	
<b>5</b>	26	19.4	197.82	
<b>6</b>	27	20.6	210.06	
<b>7</b>	27	20.6	210.06	
<b>8</b>	34	30.4	309.99	
<b>9</b>	34	30.4	309.99	
<b>10</b>	36	33.3	339.56	

**Tabla 14:** Valores del esclerómetro en el primer estribo lado izquierda.

<b>Ubicación</b>	<b>Estribo 1</b>	<b>Izquierda</b>	<b>Angulo °</b>	<b>-90</b>
<b>#golpe</b>	Valor esclerómetro	Valor del Punto (N/mm <sup>2</sup> )	Valor del Punto (kg/cm <sup>2</sup> )	Valor de Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>1</b>	26	19.4	197.82	267.47
<b>2</b>	29	23.3	237.59	
<b>3</b>	30	24.5	249.83	
<b>4</b>	30	24.5	249.83	
<b>5</b>	30	24.5	249.83	
<b>6</b>	32	27.5	280.42	
<b>7</b>	33	28.4	289.59	
<b>8</b>	33	28.4	289.59	
<b>9</b>	34	30.4	309.99	
<b>10</b>	35	31.4	320.19	

**Tabla 15:** Valores del esclerómetro en el segundo estribo lado derecha.

<b>Ubicación</b>	<b>Estribo 2</b>	<b>Derecha</b>	<b>Angulo °</b>	<b>-90</b>
<b>#golpe</b>	Valor esclerómetro	Valor del Punto (N/mm2)	Valor del Punto (kg/cm2)	Valor de Resistencia (kg/cm2)
1	22	14.2	144.80	232.39
2	25	17.7	180.49	
3	27	20.6	210.06	
4	28	21.6	220.26	
5	29	23.3	237.59	
6	30	24.5	249.83	
7	31	25.5	260.02	
8	31	25.5	260.02	
9	32	27.5	280.42	
10	32	27.5	280.42	

**Tabla 16:** Valores del esclerómetro en el segundo estribo lado izquierda.

<b>Ubicación</b>	<b>Estribo 2</b>	<b>Izquierda</b>	<b>Angulo °</b>	<b>-90</b>
<b>#golpe</b>	Valor esclerómetro	Valor del Punto (N/mm2)	Valor del Punto (kg/cm2)	Valor de Resistencia (kg/cm2)
1	23	15.7	160.09	250.95
2	25	17.7	180.49	
3	26	19.4	197.82	
4	28	21.6	220.26	
5	28	21.6	220.26	
6	28	21.6	220.26	
7	31	25.5	260.02	
8	32	27.5	280.42	
9	38	36.3	370.15	
10	40	39.2	399.72	

**Tabla 17:** Valores del esclerómetro en la berma lado derecha.

<b>Ubicación</b>	<b>Berma</b>	<b>Derecha</b>	<b>Angulo °</b>	<b>-90</b>
<b>#golpe</b>	Valor esclerómetro	Valor del Punto (N/mm2)	Valor del Punto (kg/cm2)	Valor de Resistencia (kg/cm2)
1	21	13.2	134.60	161.42
2	21	13.2	134.60	
3	21	13.2	134.60	
4	22	14.2	144.80	
5	22	14.2	144.80	
6	22	14.2	144.80	
7	22	14.2	144.80	
8	24	16.7	170.29	
9	25	17.7	180.49	
10	32	27.5	280.42	

### **Anexo 3:** Medición de profundidad de carbonatación con fenolftaleína (RILEM CPC-18)

El ensayo de determinación de la profundidad de carbonatación se realizó en los núcleos de hormigón previamente extraídos de la estructura, con el objetivo de identificar la penetración del CO<sub>2</sub> en el hormigón del puente, el procedimiento se desarrolló conforme a los lineamientos técnicos recomendados por RILEM CPC-18 [13], y metodologías comúnmente empleadas para la evaluación de carbonatación en hormigón endurecido.

Importante hay que mencionar que un núcleo fue cortado transversalmente para exponer una superficie fresca de hormigón, evitando superficies previamente alteradas por la perforación o el almacenamiento, por lo que, este corte permitió una observación clara del frente de carbonatación, el resto de los núcleos se los midió tal cual.



**Figura 14:** Corte del núcleo transversalmente.

Luego, se aplicó una solución indicadora de fenolftaleína mediante goteo directo sobre la superficie del núcleo, la aplicación se realizó en un mínimo de cuatro puntos distribuidos sobre la sección transversal, con el fin de obtener una medición representativa y reducir la variabilidad local del material, rápidamente, la fenolftaleína actúa como indicador de pH: las zonas no carbonatadas, adquieren una coloración rosada o fucsia, mientras que las zonas carbonatadas permanecen incoloras debido a la reducción de alcalinidad provocada por la reacción del CO<sub>2</sub>.



**Figura 15:** Colocación de la fenolftaleína.

Una vez evidenciado el límite entre la zona carbonatada y no carbonatada, se procedió a medir la profundidad de carbonatación desde la superficie exterior del núcleo hasta el frente de cambio de coloración, las mediciones se realizaron utilizando un pie de rey (calibrador vernier), garantizando precisión en milímetros, para cada núcleo se registraron al menos cinco valores individuales, a partir de los cuales se determinó un valor promedio representativo de la profundidad de carbonatación en cada punto de muestreo.



**Figura 16:** Medición de profundidad de carbonatación con la fenolftaleína con el pie de rey.

**Tabla 18:** Medición de profundidad de carbonatación con la fenolftaleína con el pie de rey en 4 puntos diferentes y el promedio.

<b>Ubicación</b>	<b>Medición 1 (mm)</b>	<b>Medición 2 (mm)</b>	<b>Medición 3 (mm)</b>	<b>Medición 4 (mm)</b>	<b>Promedio (mm)</b>
<b>Estribo 1</b>	4.3	4.4	4.32	4.38	<b>4.35</b>
<b>Estribo 2</b>	4.1	4.25	4.22	4.19	<b>4.19</b>
<b>Estribo 3</b>	4.5	4.42	4.48	4.48	<b>4.47</b>
<b>Estribo 4</b>	4.8	4.7	4.72	4.78	<b>4.75</b>
<b>Berma</b>	3.25	3.35	3.28	3.32	<b>3.3</b>

#### **Anexo 4:** Ensayo de resistencia a compresión de núcleos y cilindros (ASTM C39/C39M)

Para la determinación de la resistencia a compresión, antes de ser sometidas a carga, los núcleos fueron inspeccionadas visualmente para verificar la ausencia de defectos severos o irregularidades que pudieran afectar la medición, entonces se procedió a determinar las dimensiones reales de cada espécimen, mediante, la medición de tres alturas distribuidas longitudinalmente y la medición de dos diámetros en direcciones perpendiculares entre sí, y el peso respectivamente.



**Figura 17:** Peso y dimensión de los núcleos.

Después, los núcleos fueron colocadas centradas en la prensa hidráulica de compresión, asegurando alineación vertical adecuada para evitar cargas excéntricas, por lo que, la carga fue aplicada de manera continua y controlada hasta alcanzar la rotura, registrándose la carga máxima soportada, valor proporcionado por el sistema de lectura de la máquina, el procedimiento se realizó conforme a lo establecido en la ASTM C42/C42M [9]



**Figura 18:** Alineación vertical.



**Figura 19:** Resistencia a compresión de los núcleos.

Una vez producida la rotura, se procedió a identificar el modo de falla, clasificándolo según los patrones establecidos por la normativa (tipos 1 a 3), esta clasificación permitió verificar que la fractura correspondiera a un comportamiento típico de compresión y no a defectos de alineación o irregularidades en la superficie de apoyo.



**Figura 20:** Rotura de los núcleos.

Los valores individuales obtenidos en cada ensayo fueron registrados de forma sistemática lo que permitió organizar los datos de manera consistente y facilitar la comparación directa con las profundidades de carbonatación medidas mediante fenolftaleína. Esta estrategia de procesamiento aseguró que el análisis integrado de ambas variables resistencia a compresión y avance de la profundidad de carbonatación se sustentara en criterios homogéneos y se refuerce la coherencia metodológica del contraste entre grupos.

**Tabla 19:** Resultados de la resistencia a compresión de los núcleos.

Dimensiones												
Identificación	Ubicación	D (mm)	L (mm)	P (Kg)	Relación (L/D)	Sección Transversal (mm <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Carga Máxima (KN)	Factor de corrección del esfuerzo (L/D)	Esfuerzo de compresión (MPa)	Esfuerzo de compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	Estribo	74.89	150.78	1.521	2.01	4404.33	0.00066	2290.42211	77.964	1	17.70	180.50
2	Estribo	75.28	154.61	1.581	2.05	4450.91	0.00069	2297.44534	95.599	1	21.48	219.02
4	Estribo	75.32	153.04	1.556	2.03	4455.05	0.00068	2282.18998	81.361	1	18.26	186.22
4	Estribo	75.32	153.04	1.556	2.03	4455.05	0.00068	2282.18998	81.361	1	18.26	186.22
3	Berma	75.05	155.45	1.576	2.07	4423.76	0.00069	2291.78679	76.038	1	17.19	175.27

**Tabla 20:** Diferencia de la resistencia a compresión con esclerómetro y prensa hidráulica de los núcleos.

<b>Ubicación</b>	<b>Resistencias con Esclerómetro</b>	<b>Resistencias con Prensa Hidráulica</b>	<b>% de Diferencia</b>
<b>Estribo</b>	22.42	17.70	26.65
<b>Estribo</b>	26.23	21.48	22.12
<b>Estribo</b>	22.79	18.26	24.79
<b>Estribo</b>	24.61	18.26	34.76
<b>Berma</b>	15.83	17.19	7.90

## **Anexo 5:** Fabricación y curado de probetas cilíndricas de hormigón (ASTM C31/C31M)

Con el propósito de evaluar el comportamiento del hormigón frente al proceso de carbonatación acelerada y comparar muestras con y sin tratamiento inhibidor, se procedió a la elaboración de probetas cilíndricas de hormigón en laboratorio.



**Figura 21:** Cantera Cerro Negro.

Antes de mezclar los agregados y el cemento fueron sometidos a una inspección visual rigurosa para descartar la presencia de material orgánico o partículas extrañas que pudieran afectar en la hidratación o afectar la consistencia de la pasta cementicia. La dosificación se estableció con el objetivo de alcanzar una resistencia aproximada de 230 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de curado y se adoptó una relación agua/cemento de 0.55. Resultando adecuado para el rango de resistencia esperado que equilibra la trabajabilidad de la mezcla fresca con el desarrollo óptimo de la microestructura, sin introducir excesos de agua que debiliten la matriz o dificulten su compactación.

Las cantidades empleadas fueron:

- Ripio triturado: 47.5 kg
- Polvo de piedra: 28.5 kg
- Cemento: 24.95 kg
- Agua: aproximadamente 13–14 litros



**Figura 22:** Ripio triturado.



**Figura 23:** Polvo de piedra.



**Figura 24:** Cemento.

Todos los materiales fueron pesados individualmente antes del mezclado para garantizar precisión en la dosificación.

El mezclado se prolongó hasta alcanzar una masa homogénea y uniforme para la distribución adecuada de los agregados finos y gruesos dentro de la pasta cementicia. Este cuidado buscó minimizar la segregación y asegurar que las probetas presentaran una microestructura consistente para que las variaciones observadas en los ensayos posteriores pudieran atribuirse al efecto de la carbonatación y no a heterogeneidades en la fabricación.



**Figura 25:** Mezclado de materiales.

El hormigón fresco se vertió en moldes cilíndricos de acero de medidas estandarizadas 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, esto con una lubricación previa de las paredes internas con una fina capa aceite quemado para un desmolde cuidadoso. Esta preparación garantizó un desencofrado limpio y sin adherencias para preservar la integridad de la probeta para los ensayos posteriores.



**Figura 26:** Aplicación de aceite quemado en los moldes.

El llenado de los moldes se realizó en capas de acuerdo con las sugerencias de las laboratoristas, esto mediante la compactación manual para eliminar vacíos para una adecuada densificación del material.



**Figura 27:** Llenado de los moldes.

Las probetas fueron desencofradas a las 24 horas, conforme a los procedimientos establecidos en la ASTM C31/C31M [28] después, fueron colocadas en la piscina de curado con agua saturada con cal, mantenida en condiciones controladas en el laboratorio de la UNACH durante 35 días, y se usó de agua con cal para mantener un ambiente alcalino, evitando la lixiviación de compuestos y asegurando condiciones óptimas de hidratación del

cemento, por lo que, este proceso garantizó el desarrollo adecuado de resistencia antes de someter las probetas al proceso de carbonatación acelerada.

#### **Anexo 6:** Proceso de obtención de sílice a partir de cáscara de arroz

Se consiguió la cascarilla de arroz como residuo ecológico, el material fue sometido a un proceso de molienda mecánica hasta obtener una granulometría fina, favoreciendo la homogeneidad térmica durante la calcinación.



**Figura 28:** Proceso de molienda mecánica.

Luego, el material molido fue colocado en crisoles cerámicos y sometido a un proceso de calcinación a 700 °C durante 8 horas, en horno de laboratorio con control de temperatura, este procedimiento permitió la combustión controlada del material orgánico y la obtención de ceniza pura conforme a estudios que indican que temperaturas entre 600 y 700 °C favorecen la formación de sílice amorfa con alta reactividad [4]



**Figura 29:** Crisoles cerámicos



**Figura 30:** Mufla a 700°.

La reacción térmica elimina todo tipo de impurezas, dejando como residuo una ceniza o sílice, entonces, con el fin de eliminar impurezas metálicas y compuestos alcalinos presentes en la ceniza, se realizó un tratamiento ácido mediante ácido clorhídrico (HCl), así que, la ceniza fue mezclada con la solución ácida en recipiente adecuado y sometida a agitación mecánica controlada durante aproximadamente 2 horas, utilizando una plancha agitadora con movimiento constante, mejorando la pureza de la sílice.



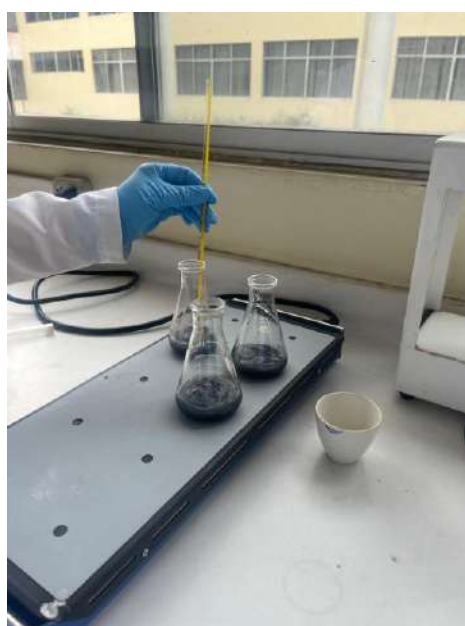
**Figura 31:** Obtención de la sílice después de 8 horas en la mufla a 700°.



**Figura 32:** Preparación del ácido clorhídrico.



**Figura 33:** Mezcla de la sílice con el ácido clorhídrico.



**Figura 34:** Plancha agitadora.

Luego, la mezcla fue sometida a filtración mediante sistema de vacío, utilizando agua destilada para el lavado sucesivo del material sólido, el lavado se repitió tantas veces como fue necesario hasta alcanzar un pH cercano a 8, medido con el papel de pH, asegurando la neutralización de residuos ácidos y la estabilidad química del material obtenido.



**Figura 35:** Extracción del ácido clorhídrico con el agua destilada en la maquina extractora de vacíos.

Una vez neutralizado el material, se procedió al secado en estufa de laboratorio, hasta eliminar completamente la humedad residual, el resultado final fue una sílice purificada de cascarilla de arroz, libre de impurezas significativas y apta para su utilización como componente activo en el recubrimiento inhibitor, por lo tanto, este material fue posteriormente empleado en la formulación del recubrimiento aplicado sobre las probetas de hormigón para evaluar su desempeño frente al proceso de carbonatación acelerada.



**Figura 36:** Secado y obtención de sílice para el recubrimiento sostenible propuesto.

**Tabla 21:** Pesos obtenidos en sílice del martes 05 de agosto de 2025.

<b>Fecha:</b>	<b>Martes 05 de agosto de 2025</b>						
<b>Capacidad de Crisol</b>	Numero de Crisol	Peso del Crisol [g]	Peso Tamo de Arroz [g]	Peso Crisol + Ceniza [g]	Peso Ceniza [g]	Rendimiento %	Rendimiento Promedio
<b>100</b>	13	61.9506	15.4151	64.3694	2.4188	15.69%	17.07%
<b>100</b>	14	70.5120	15.0227	73.1332	2.6212	17.45%	
<b>100</b>	15	61.7818	15.1236	64.5147	2.7329	18.07%	

**Tabla 22:** Pesos obtenidos en sílice del miércoles 06 de agosto de 2025.

<b>Fecha:</b>	<b>Miércoles 06 de agosto de 2025</b>						
<b>Capacidad de Crisol</b>	Numero de Crisol	Peso del Crisol [g]	Peso Tamo de Arroz [g]	Peso Crisol + Ceniza [g]	Peso Ceniza [g]	Rendimiento %	Rendimiento Promedio
<b>100</b>	1	54.8543	20.3997	58.4101	3.5558	17.43%	16.60%
<b>100</b>	2	62.0811	21.3299	65.5775	3.4964	16.39%	
<b>100</b>	3	62.8616	20.0962	66.2928	3.4312	17.07%	
<b>100</b>	4	62.8863	20.3040	66.3485	3.4622	17.05%	
<b>100</b>	5	62.4806	20.0420	65.8949	3.4143	17.04%	
<b>100</b>	6	61.3643	20.0880	64.9395	3.5752	17.80%	
<b>100</b>	7	62.4519	20.5695	66.1246	3.6727	17.86%	
<b>100</b>	8	70.5023	20.7494	73.9054	3.4031	16.40%	
<b>100</b>	13	70.5120	20.5217	73.7131	3.2011	15.60%	
<b>100</b>	14	57.5589	20.1456	60.8956	3.3367	16.56%	
<b>50</b>	11	45.0143	12.0461	46.7013	1.687	14.00%	
<b>50</b>	12	38.6493	12.0493	40.5706	1.9213	15.95%	

**Tabla 23:** Pesos obtenidos en sílice del jueves 07 de agosto de 2025.

<b>Fecha:</b>	<b>Jueves 07 de agosto de 2025</b>						
<b>Capacidad de Crisol</b>	Numero de Crisol	Peso del Crisol [g]	Peso Tamo de Arroz [g]	Peso Crisol + Ceniza [g]	Peso Ceniza [g]	Rendimiento %	Rendimiento Promedio
<b>100</b>	1	54.8543	26.6879	59.5548	4.7005	17.61%	17.45%
<b>100</b>	2	62.0811	26.5028	66.6250	4.5439	17.14%	
<b>100</b>	3	62.8616	26.3853	67.3579	4.4963	17.04%	
<b>100</b>	4	62.8863	28.9357	68.2908	5.4045	18.68%	
<b>100</b>	5	62.4806	26.7516	67.3306	4.85	18.13%	
<b>100</b>	6	61.3643	28.1498	66.6365	5.2722	18.73%	
<b>100</b>	7	62.4519	26.9113	67.1175	4.6656	17.34%	
<b>100</b>	8	70.5023	29.1874	75.5024	5.0001	17.13%	
<b>100</b>	13	61.9506	25.3297	66.1608	4.2102	16.62%	
<b>100</b>	14	70.5120	25.1878	74.7152	4.2032	16.69%	
<b>100</b>	15	61.7818	27.2316	66.3662	4.5844	16.83%	

**Tabla 24:** Pesos obtenidos en sílice del viernes 08 de agosto de 2025.

<b>Fecha:</b>		<b>Viernes 08 de agosto de 2025</b>					
<b>Capacidad de Crisol</b>	<b>Numero de Crisol</b>	<b>Peso del Crisol [g]</b>	<b>Peso Tamo de Arroz [g]</b>	<b>Peso Crisol + Ceniza [g]</b>	<b>Peso Ceniza [g]</b>	<b>Rendimiento %</b>	<b>Rendimiento Promedio</b>
<b>100</b>	1	54.8543	27.1004	60.0131	5.1588	19.04%	
<b>100</b>	2	62.0811	26.0426	66.6528	4.5717	17.55%	
<b>100</b>	3	62.8616	26.0033	67.2313	4.3697	16.80%	
<b>100</b>	4	62.8863	25.9778	67.2635	4.3772	16.85%	
<b>100</b>	5	62.4806	26.9903	66.7844	4.3038	15.95%	
<b>100</b>	6	61.3643	26.0039	65.7196	4.3553	16.75%	17.28%
<b>100</b>	7	62.4519	26.2085	66.9042	4.4523	16.99%	
<b>100</b>	8	70.5023	25.7097	74.6294	4.1271	16.05%	
<b>100</b>	13	61.9506	25.5270	67.2359	5.2853	20.70%	
<b>100</b>	14	70.5120	27.4131	75.1208	4.6088	16.81%	
<b>100</b>	15	61.7818	27.2421	66.3020	4.5202	16.59%	

## **Anexo 7:** Formulación y aplicación del recubrimiento inhibidor sostenible

La mezcla fue elaborada utilizando las siguientes proporciones:

- Agua destilada: 850 ml.
- Sílice purificada: 100 g.
- Maicena: 50 g.
- Silicato de sodio: 20 g.



**Figura 371:** 100 gramos de sílice.



**Figura 38:** 50 gramos de maicena.

El silicato de sodio fue incorporado como agente aglutinante inorgánico, mientras que la maicena cumplió la función de espesante y estabilizador de la mezcla, favoreciendo la adherencia del recubrimiento sobre la superficie del hormigón, debido a que la sílice

representaba el mayor contenido sólido del sistema, el procedimiento de preparación se realizó de forma progresiva para garantizar homogeneidad y evitar aglomeraciones.

Inicialmente, los componentes líquidos fueron colocados en un recipiente de laboratorio y sometidos a mezcla controlada a una temperatura aproximada de 5 °C, con el fin de regular la viscosidad inicial del sistema y evitar reacciones prematuras de gelificación asociadas al silicato de sodio, luego, la maicena fue incorporada gradualmente al medio acuoso bajo agitación constante, permitiendo la formación de una suspensión homogénea, una vez alcanzada una consistencia ligeramente viscosa, se procedió a la adición progresiva de la sílice purificada, acompañada del agua restante en las proporciones establecidas, asegurando su dispersión uniforme dentro de la matriz, finalmente, la mezcla fue agitada de manera continua hasta obtener una pasta homogénea, sin grumos visibles y con consistencia adecuada para su aplicación superficial.



**Figura 39:** Mezcla de la sílice, maicena y silicato de sodio a 5°.

Una vez preparada la formulación, el recubrimiento fue aplicado sobre la superficie externa de los cilindros de hormigón previamente curados, la aplicación se realizó de manera uniforme, cubriendo completamente el perímetro lateral del cilindro, asegurando la formación de una capa continua de protección, luego, las probetas recubiertas fueron dejadas en reposo por 24 horas para permitir el secado, se repitió el proceso pasado ese tiempo, es decir se dieron dos manos cada 24 horas, permitiendo la adherencia del inhibidor antes de ser sometidas al proceso de carbonatación acelerada.



**Figura 40:** Colocación del inhibidor en los cilindros.

## **Anexo 8:** Ensayo preliminar de carbonatación acelerada: definición de tiempos de exposición

Para esta fase inicial se prepararon probetas experimentales utilizando una mezcla simple compuesta por:

- Macadán
- Hormigón
- Agua

La dosificación empleada fue aproximadamente mitad arena y mitad hormigón, sin un diseño estructural específico de resistencia, ya que el propósito no era evaluar capacidad mecánica, sino únicamente observar la rapidez de carbonatación bajo condiciones controladas, una vez moldeadas y secadas, las probetas fueron preparadas para su exposición al CO<sub>2</sub>.

Las probetas fueron colocadas dentro de fundas de polietileno con cierre hermético, conforme se describe en el planteamiento metodológico de la tesis, este sistema permitió generar un microambiente cerrado susceptible de ser enriquecido con dióxido de carbono, mediante la utilización de un tanque presurizado de CO<sub>2</sub>, se inyectó gas directamente en el interior de las fundas, buscando incrementar la concentración de dióxido de carbono respecto al ambiente natural, tras la inyección, las fundas fueron selladas para mantener la concentración interna del gas.

Se estableció un esquema de medición periódica con intervalos de 7 días, realizándose evaluaciones cada fin de semana, ya que, nosotros por motivos tradicionales, que se hace una limpieza o control cada fin de semana de cualquier actividad, decidimos tener esta secuencia, entonces esto permitió un seguimiento sistemático, durante el monitoreo se observó que a los 14 días ya se evidenciaban resultados medibles de carbonatación, entonces, ya que los primeros resultados significativos se obtuvieron a los 14 días, motivo por el cual se adoptó un esquema de evaluación en múltiplos de 7 días (14, 28 y 35 días), permitiendo uniformidad experimental, y mantener uniformidad en el análisis y facilitar la comparación entre muestras, entonces, se observó con la fenolftaleína lo carbonatado y carbonatado, aplicamos mediciones rápidas, casi nada técnico, ya que, al tener resultados favorables, lo técnico lo dejamos para los cilindros [1]



**Figura 41:** Ensayo de prueba con la fenolftaleína.

## **Anexo 9:** Diseño experimental del ensayo definitivo de carbonatación acelerada (ISO 1920-12)

Diseño experimental y grupos de evaluación para la carbonatación acelerada en cilindros de hormigón.

Una vez obtenido los cilindros, se establecieron tres condiciones experimentales:

- 9 cilindros con recubrimiento inhibidor
- 9 cilindros sin recubrimiento
- 3 cilindros de control (sin recubrimiento, sin exposición acelerada)

Los cilindros con y sin recubrimiento fueron sometidos a carbonatación acelerada y evaluados en tres tiempos de exposición:

- 14 días: 3 cilindros con recubrimiento + 3 sin recubrimiento
- 28 días: 3 cilindros con recubrimiento + 3 sin recubrimiento
- 35 días: 3 cilindros con recubrimiento + 3 sin recubrimiento

Adicionalmente, se consideraron 3 cilindros de control (sin recubrimiento), mantenidos en condiciones de laboratorio y evaluados a los 35 días para contar con una línea base de comparación frente a las probetas sometidas a exposición con CO<sub>2</sub>.

El proceso de exposición acelerada se desarrolló mediante un sistema confinado utilizando fundas de polietileno con cierre hermético (cierre a presión), dentro de las cuales se colocaron individualmente las probetas a ensayar, este sistema permitió generar un microambiente enriquecido con CO<sub>2</sub>, y la fuente de la misma fue un tanque presurizado de dióxido de carbono, conectado para la inyección directa del gas al interior de las fundas, cabe mencionar que se optó este método por no ser altamente costoso a comparación de otros métodos.



**Figura 42:** Fundas de polietileno con cierre hermético y tanque de CO<sub>2</sub>.

Con el fin de mantener una alta disponibilidad de CO<sub>2</sub> durante todo el periodo de exposición, se realizó inyección diaria de gas en cada funda hermética, cabe mencionar que se ocuparon dos, por posibles pérdidas por microfugas asociadas al sistema de cierre, por lo tanto, la reinyección diaria cumplió la función de renovación del gas, compensando, el consumo de CO<sub>2</sub> por la reacción de carbonatación, y el estado de la funda se verificó visualmente, observando su expansión “inflado” tras la inyección, lo cual evidenció la presencia del gas dentro de la funda hermética



**Figura 43:** Inyección diaria del CO<sub>2</sub> en las fundas de polietileno con cierre hermético.

## **Controles importantes dentro del ensayo**

### **Sistema de exposición al CO<sub>2</sub>**

Los cilindros fueron colocados individualmente dentro de fundas de polietileno con cierre hermético, generando un ambiente confinado susceptible de ser enriquecido con dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), la inyección del gas se realizó mediante un tanque presurizado de CO<sub>2</sub>, introduciendo el gas directamente al interior de cada funda hasta observar su expansión volumétrica.

La concentración de CO<sub>2</sub> dentro del sistema se incrementó significativamente respecto al ambiente natural ( $\approx 0.04\%$ ), mediante inyección directa diaria del gas en el interior de las fundas, aunque no se contó con un sensor digital para medición exacta de concentración, se trabajó bajo el principio de atmósfera confinada con inyección directa desde cilindro presurizado, lo cual, según literatura técnica, puede generar concentraciones superiores al 90% en volúmenes cerrados cuando el gas desplaza el aire interno.

La expansión visible de la funda tras cada inyección indicó que el volumen interno estaba siendo ocupado predominantemente por CO<sub>2</sub>, permitiendo asumir una concentración elevada dentro del rango estimado de 90–95%, valor coherente con métodos de carbonatación acelerada descritos en estudios experimentales [14]

### **Temperatura**

La exposición se realizó en ambiente de laboratorio, registrándose la temperatura ambiental promedio mediante medición directa con termómetro de ambiente, por lo tanto, la temperatura se mantuvo dentro del rango típico de laboratorio (aproximadamente 20–25 °C), condición favorable para el proceso de carbonatación, ya que la velocidad de reacción entre CO<sub>2</sub> y Ca (OH)<sub>2</sub> aumenta con temperaturas moderadas.

### **Humedad Relativa (HR 50–70%)**

Aunque no se dispuso de instrumentación específica para medir de forma continua la humedad relativa en el interior de las fundas, el monitoreo visual durante el periodo de exposición proporcionó indicadores cualitativos confiables sobre las condiciones ambientales del sistema. En particular, se observó condensación en las paredes internas de los recipientes flexibles, así como la formación de gotas superficiales fenómeno descrito

coloquialmente como "sudoración" del plástico, lo cual evidenció la presencia de un ambiente saturado de vapor de agua. Esta evidencia empírica resulta coherente con los requisitos del proceso de carbonatación, ya que la reacción entre el CO<sub>2</sub> y los compuestos alcalinos del hormigón requiere la disolución previa del gas en agua para formar ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) [13].

Desde el punto de vista químico:

- Si la humedad es muy baja menor al 40% es que la carbonatación es lenta.
- Si la humedad es muy alta mayor al 80% indica que la difusión de CO<sub>2</sub> se dificulta.
- El rango óptimo para la humedad relativa reportado en literatura es 50–70%.

La evidencia de condensación interna sugiere que el sistema se encontraba dentro de un rango de humedad favorable para la reacción se de en condiciones de carbonatación acelerada dentro del estudio

### **Renovación del gas**

La renovación del CO<sub>2</sub> se realizó de manera diaria, mediante reinyección directa en cada funda, es que durante la carbonatación el CO<sub>2</sub> es consumido por reacción con el hidróxido de calcio del hormigón, reduciendo progresivamente su concentración interna, por ello, la reposición diaria permitió:

- Mantener alta disponibilidad de CO<sub>2</sub>
- Compensar posibles pérdidas por microfugas.
- Sostener un gradiente de concentración favorable a la difusión

### **Control de fugas**

Para garantizar la hermeticidad del sistema, las fundas fueron sometidas a verificación mediante inmersión en agua después de la inyección del gas, entonces la ausencia de burbujas visibles confirmó que no existían fugas significativas en el sistema de cierre, por lo tanto, este método corresponde a una técnica empírica de verificación de estanqueidad comúnmente empleada en sistemas cerrados de baja presión.

El ensayo de determinación de la profundidad de carbonatación que se realizó fue la misma que el de los núcleos de hormigón para los cilindros de hormigón, el procedimiento

se desarrolló conforme a los lineamientos técnicos recomendados por RILEM CPC-18 [13], y metodologías comúnmente empleadas para la evaluación de carbonatación en hormigón endurecido, por lo tanto, se aplicó la solución indicadora de fenolftaleína mediante goteo directo sobre la superficie del núcleo, la aplicación se realizó en un mínimo de cinco puntos distribuidos sobre la sección transversal, para recordar que las zonas no carbonatadas, adquieren una coloración rosada o fucsia, mientras que las zonas carbonatadas permanecen incoloras debido a la reducción de alcalinidad provocada por la reacción del  $\text{CO}_2$ .

Una vez evidenciado el límite entre la zona carbonatada y no carbonatada, se procedió a medir la profundidad de carbonatación desde la superficie exterior del núcleo hasta el frente de cambio de coloración, las mediciones se realizaron utilizando un pie de rey (calibrador vernier), garantizando precisión en milímetros, para cada cilindro se registraron al menos cinco valores individuales, a partir de los cuales se determinó un valor promedio representativo de la profundidad de carbonatación en cada punto de muestreo.



**Figura 44:** Medición de profundidad de carbonatación con la fenolftaleína con el pie de rey.

**Tabla 25:** Medición de profundidad de carbonatación con la fenolftaleína con el pie de rey en 4 puntos y el promedio.

<b>Identificación</b>	<b>Medición 1 (mm)</b>	<b>Medición 2 (mm)</b>	<b>Medición 3 (mm)</b>	<b>Medición 4 (mm)</b>	<b>Promedio (mm)</b>
<b>C-CARBO-SR-14.1</b>	1.05	1.12	1.1	1.09	<b>1.09</b>
<b>C-CARBO-SR-14.2</b>	1.6	1.65	1.63	1.6	<b>1.62</b>
<b>C-CARBO-SR-14.3</b>	1.55	1.6	1.58	1.55	<b>1.57</b>
<b>C-CARBO-SR-28.1</b>	4.1	4.2	4.18	4.12	<b>4.15</b>
<b>C-CARBO-SR-28.2</b>	4.25	4.35	4.3	4.26	<b>4.29</b>
<b>C-CARBO-SR-28.3</b>	4.5	4.6	4.62	4.56	<b>4.57</b>
<b>C-CARBO-SR-35.1</b>	5.85	6	5.95	5.92	<b>5.93</b>
<b>C-CARBO-SR-35.2</b>	5.95	6.05	6.03	6.01	<b>6.01</b>
<b>C-CARBO-SR-35.3</b>	5.65	5.75	5.7	5.78	<b>5.72</b>
<b>C-CARBO-CR-14.1</b>	0.92	0.98	0.96	0.94	<b>0.95</b>
<b>C-CARBO-CR-14.2</b>	0.9	0.95	0.94	0.93	<b>0.93</b>
<b>C-CARBO-CR-14.3</b>	0.85	0.9	0.88	0.85	<b>0.87</b>
<b>C-CARBO-CR-28.1</b>	3.4	3.5	3.47	3.43	<b>3.45</b>
<b>C-CARBO-CR-28.2</b>	3.7	3.85	3.8	3.77	<b>3.78</b>
<b>C-CARBO-CR-28.3</b>	3.2	3.3	3.28	3.22	<b>3.25</b>
<b>C-CARBO-CR-35.1</b>	5.5	5.6	5.55	5.51	<b>5.54</b>
<b>C-CARBO-CR-35.2</b>	5.05	5.2	5.1	5.13	<b>5.12</b>
<b>C-CARBO-CR-35.3</b>	5.18	5.3	5.25	5.19	<b>5.23</b>
<b>C-CONTROL-35-1</b>	3.6	3.7	3.68	3.62	<b>3.65</b>
<b>C-CONTROL-35-2</b>	3.18	3.3	3.25	3.15	<b>3.22</b>
<b>C-CONTROL-35-3</b>	3.1	3.2	3.18	3.12	<b>3.15</b>

Nota: **CARBO** = Muestra Carbonatada; **CONTROL** = Muestra sin carbonatar; **SR** = Sin Recubrimiento; **CR** = Con Recubrimiento

## **Anexo 10:** Registro dimensional y resultados de resistencia a compresión de cilindros

Para la determinación de la resistencia a compresión, antes de ser sometidas a carga, los cilindros fueron inspeccionados visualmente para verificar la ausencia de defectos severos o irregularidades que pudieran afectar la medición, entonces se procedió a determinar las dimensiones reales de cada espécimen, mediante, la medición de tres alturas distribuidas longitudinalmente y la medición de dos diámetros en direcciones perpendiculares entre sí, y el peso respectivamente.



**Figura 45:** Peso y dimensión de los núcleos.

Después, los cilindros fueron colocados centrados en la prensa hidráulica de compresión, asegurando alineación vertical adecuada para evitar cargas excéntricas, por lo que, la carga fue aplicada de manera continua y controlada hasta alcanzar la rotura, registrándose la carga máxima soportada, valor proporcionado por el sistema de lectura de la máquina, el procedimiento se realizó conforme a lo establecido en la ASTM C42/C42M [9]



**Figura 46:** Alineación vertical.



**Figura 47:** Resistencia a compresión de los cilindros.

Una vez producida la rotura, se procedió a identificar el modo de falla, clasificándolo según los patrones establecidos por la normativa (tipos 1 a 5), esta clasificación permitió verificar que la fractura correspondiera a un comportamiento típico de compresión y no a defectos de alineación o irregularidades en la superficie de apoyo.

Los valores obtenidos fueron registrados de manera individual para ser promediados según el grupo experimental asignado con recubrimiento, sin recubrimiento y control, para la comparación con la profundidad de carbonatación medida con el pie de rey.

**Tabla 26:** Alturas, dimensiones, promedios respectivamente de los cilindros, con el tipo de falla.

<b>Identificación</b>	<b>Altura 1 (mm)</b>	<b>Altura 2 (mm)</b>	<b>Altura 3 (mm)</b>	<b>Altura Promedio (mm)</b>	<b>Diámetro 1 (mm)</b>	<b>Diámetro 2 (mm)</b>	<b>Diámetro Promedio (mm)</b>	<b>Tipo de Falla</b>
<b>C-CARBO-SR-14.1</b>	202.07	203.30	202.11	202.49	102.44	102.37	102.41	Tipo 1
<b>C-CARBO-SR-14.2</b>	202.10	203.40	202.23	202.58	100.90	101.12	101.01	Tipo 2
<b>C-CARBO-SR-14.3</b>	201.88	201.55	202.15	201.86	101.19	101.88	101.54	Tipo 1
<b>C-CARBO-SR-28.1</b>	200.65	200.50	201.00	200.72	101.99	103.69	102.84	Tipo 2
<b>C-CARBO-SR-28.2</b>	201.26	202.36	203.84	202.49	103.96	103.86	103.91	Tipo 2
<b>C-CARBO-SR-28.3</b>	201.97	202.63	201.73	202.11	101.93	102.32	102.13	Tipo 3
<b>C-CARBO-SR-35.1</b>	202.30	201.99	203.11	202.47	104.57	104.61	104.59	Tipo 5
<b>C-CARBO-SR-35.2</b>	202.70	201.69	202.91	202.43	101.50	101.32	101.41	Tipo 2
<b>C-CARBO-SR-35.3</b>	203.27	202.70	202.48	202.82	102.35	102.12	102.24	Tipo 2
<b>C-CARBO-CR-14.1</b>	203.07	201.45	202.53	202.35	101.61	102.74	102.18	Tipo 5
<b>C-CARBO-CR-14.2</b>	202.66	203.58	202.68	202.97	102.64	101.72	102.18	Tipo 2
<b>C-CARBO-CR-14.3</b>	202.77	202.86	202.58	202.74	101.64	102.13	101.89	Tipo 3
<b>C-CARBO-CR-28.1</b>	201.80	201.79	201.78	201.79	102.30	103.24	102.77	Tipo 2
<b>C-CARBO-CR-28.2</b>	202.33	203.43	204.79	203.52	101.70	103.02	102.36	Tipo 1
<b>C-CARBO-CR-28.3</b>	202.84	203.54	202.60	202.99	101.55	101.93	101.74	Tipo 2
<b>C-CARBO-CR-35.1</b>	202.99	204.74	202.45	203.39	104.72	104.56	104.64	Tipo 2
<b>C-CARBO-CR-35.2</b>	202.52	203.36	202.72	202.87	102.33	101.97	102.15	Tipo 1
<b>C-CARBO-CR-35.3</b>	201.38	200.91	201.47	201.25	101.82	102.30	102.06	Tipo 2
<b>C-CONTROL-35-1</b>	202.44	203.35	203.41	203.07	103.68	104.22	103.95	Tipo 1

<b>C-CONTROL-35-2</b>	201.42	200.50	201.07	201.00	101.55	102.77	102.16	Tipo 2
<b>C-CONTROL-35-3</b>	202.01	200.76	201.70	201.49	101.21	101.88	101.55	Tipo 2

Nota: **CARBO** = Muestra Carbonatada; **CONTROL** = Muestra sin carbonatar; **SR** = Sin Recubrimiento; **CR** = Con Recubrimiento

**Tabla 27:** Resultados de la resistencia a compresión de los cilindros.

Identificación	D (mm)	L (mm)	P (Kg)	Relación (L/D)	Sección Transversal (mm <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Carga Máxima (KN)	Factor de corrección del esfuerzo (L/D)	Esfuerzo de compresión (MPa)	Esfuerzo de compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>C-CARBO-SR-14.1</b>	102.41	202.49	3.618	1.98	8236.30	0.00167	2169.33	177	1	21.49	219.14
<b>C-CARBO-SR-14.2</b>	101.01	202.58	3.607	2.01	8013.43	0.00162	2221.97	174.5	1	21.78	222.05
<b>C-CARBO-SR-14.3</b>	101.54	201.86	3.637	1.99	8096.95	0.00163	2225.21	172.3	1	21.28	216.99
<b>C-CARBO-SR-28.1</b>	102.84	200.72	3.615	1.95	8306.42	0.00167	2168.26	160.5	1	19.32	197.03
<b>C-CARBO-SR-28.2</b>	103.91	202.49	3.736	1.95	8480.17	0.00172	2175.73	158.9	1	18.74	191.07
<b>C-CARBO-SR-28.3</b>	102.13	202.11	3.772	1.98	8191.32	0.00166	2278.40	153.8	1	18.78	191.46
<b>C-CARBO-SR-35.1</b>	104.59	202.47	3.597	1.94	8591.52	0.00174	2067.84	155.2	1	18.06	184.20
<b>C-CARBO-SR-35.2</b>	101.41	202.43	3.559	2.00	8077.03	0.00164	2176.68	146.2	1	18.10	184.57
<b>C-CARBO-SR-35.3</b>	102.24	202.82	3.594	1.98	8208.98	0.00166	2158.67	140.8	1	17.15	174.90
<b>C-CARBO-CR-14.1</b>	102.18	202.35	3.616	1.98	8199.35	0.00166	2179.45	187.9	1	22.92	233.68
<b>C-CARBO-CR-14.2</b>	102.18	202.97	3.616	1.99	8200.15	0.00166	2172.54	181.5	1	22.13	225.70
<b>C-CARBO-CR-14.3</b>	101.89	202.74	3.601	1.99	8152.87	0.00165	2178.61	180.9	1	22.19	226.26

<b>C-CARBO-CR-28.1</b>	102.77	201.79	3.569	1.96	8295.12	0.00167	2132.18	171.3	1	20.65	210.58
<b>C-CARBO-CR-28.2</b>	102.36	203.52	3.635	1.99	8229.06	0.00167	2170.47	168.4	1	20.46	208.67
<b>C-CARBO-CR-28.3</b>	101.74	202.99	3.591	2.00	8129.68	0.00165	2176.01	164.8	1	20.27	206.71
<b>C-CARBO-CR-35.1</b>	104.64	203.39	3.777	1.94	8599.74	0.00175	2159.36	163.4	1	19.00	193.75
<b>C-CARBO-CR-35.2</b>	102.15	202.87	3.606	1.99	8195.33	0.00166	2168.94	156.7	1	19.12	194.97
<b>C-CARBO-CR-35.3</b>	102.06	201.25	3.574	1.97	8180.90	0.00165	2170.75	150.8	1	18.43	187.96
<b>C-CONTROL-35-1</b>	103.95	203.07	3.657	1.95	8486.70	0.00172	2122.01	161.1	1	18.98	193.57
<b>C-CONTROL-35-2</b>	102.16	201.00	3.492	1.97	8196.94	0.00165	2119.50	166.3	1	20.29	206.88
<b>C-CONTROL-35-3</b>	101.55	201.49	3.490	1.98	8098.54	0.00163	2138.77	178.8	1	22.08	225.13

Nota: **CARBO** = Muestra Carbonatada; **CONTROL** = Muestra sin carbonatar; **SR** = Sin Recubrimiento; **CR** = Con Recubrimiento