

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

TESIS

EFFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO₂, DEL CONCRETO DE F'_c=210 Kg/Cm², EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Para optar el Grado Académico de

DOCTOR EN CIENCIAS

Presentada por:

Mcs. CÉSAR PELAYO MOSQUEIRA RAMÍREZ

Asesor:

Dr. VALENTÍN VÍCTOR PAREDES OLIVA

CAJAMARCA, PERÚ
2019

COPYRIGHT©. 2019 by
CESAR PELAYO MOSQUEIRA RAMIREZ
Todos los derechos reservados

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA
CIENCIAS AGRARIAS**

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

MENCIÓN: GESTION AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

TESIS APROBADA

**EFFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO₂, DEL CONCRETO
DE F'_c=210 Kg/Cm², EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN
Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

Para optar el Grado Académico de

DOCTOR EN CIENCIAS

Presentada por:

Mcs: CÉSAR PELAYO MOSQUEIRA RAMÍREZ

JURADO EVALUADOR

Dr. Valentin Víctor Paredes Oliva
Asesor

Dr. Juan Edmundo Chávez Rabanal
Jurado Evaluador

Dr. Glicerio Eduardo Torres Carranza
Jurado Evaluador

Dr. Marcial Hidelso Mendo Velásquez
Jurado Evaluador

CAJAMARCA, PERÚ
2019



Universidad Nacional de Cajamarca
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD
Escuela de Posgrado
CAJAMARCA - PERU



PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Siendo las 16... horas, del día 01 de octubre del año dos mil diecinueve, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el Dr. JUAN EDMUNDO CHÁVEZ RABANAL, Dr. GLICERIO EDUARDO TORRES CARRANZA, Dr. MARCIAL HIDELSO MENDO VELÁSQUEZ y en calidad de Asesor, el Dr. VALENTIN VICTOR PAREDES OLIVA. Actuando de conformidad con el Reglamento Interno de la Escuela de Posgrado y el Reglamento del Programa de Doctorado de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se inició la SUSTENTACIÓN de la tesis titulada: **EFFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO₂, DEL CONCRETO DE F[']c=210 Kg/Cm², EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN**; presentada por el M.Cs. CÉSAR PELAYO MOSQUEIRA RAMÍREZ

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó APROBACIÓN..... con la calificación de 18 (Dieciocho) : EXCELENTE..... la mencionada Tesis; en tal virtud, el M.Cs. CÉSAR PELAYO MOSQUEIRA RAMÍREZ, está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **DOCTOR EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias, Mención **GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES**

Siendo las 17:30 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.


.....
Dr. Valentin Victor Paredes Oliva
Asesor


.....
Dr. Juan Edmundo Chávez Rabanal
Presidente Jurado Evaluador


.....
Dr. Glicerio Eduardo Torres Carranza
Jurado Evaluador


.....
Dr. Marcial Hidelso Mendo Velásquez
Jurado Evaluador

Dedicatoria

A Dios y la buena Madre María

Dedico este modesto y sencillo trabajo como gesto de agradecimiento a Dios y a la buena Madre María por haberme regalado la vida, amor y fortaleza para culminar la presente investigación.

A la Memoria de mis padres María Jesús Aurelia y Roberto Pelayo

Por estar siempre a mi lado cuando más los necesité. Aunque de manera espiritual y en especial mi madre quien en su paso por este mundo terrenal con su infinito amor, sacrificio y constante dedicación logró hacerme de mí un profesional.

A mis hermanos; Lady, Roberto, Jorge, Enrique

A Lady, por su sacrificio, esfuerzo, lucha constante por verme profesional que el Señor lo tenga en su Gloria, con su infinita misericordia.

A Roberto por ser ejemplo de superación, maestro y guía, quien me enseñó, que en este mundo estamos de paso y que cada cosa que haga la realice con pasión que con ello se logra el éxito.

A Jorge por enseñarme que jamás me deje amilanar por el cansancio y la desesperación, el estudio es la libertad y que en cada acción que realiza siempre encontrare a Dios.

A Enrique por ser el hermano que siempre confió en mí, por ser comprensivo, emblema de desprendimiento, por haber compartido los mejores y peores momentos de mi vida.

A mi esposa Sonia

De manera muy especial, dedico el presente trabajo a mi esposa, por su inmenso amor, apoyo e impulso constante en todos mis sueños emprendidos. Mi gratitud y eterno amor, quien es mi vida entera.

A mis hijos Katherine y Cesar.

Por la bendición y motivación que dan sentido a mi vida en mi vida, la luz que ilumina mi camino, y ser mi fuente de inspiración y superación

Índice de contenidos

Índice de contenidos	vi
Lista de tablas	x
Lista de figuras	xv
Agradecimiento	xx
Lista de abreviaturas	xxi
Resumen	xxiv
Abstract	xxv
Capítulo I Introducción	1
Capítulo II Marco teórico	5
2.1. Antecedentes	5
2.2. Bases teóricas	18
2.2.1. El cemento portland	18
2.2.2. Clasificación del cemento portland	18
2.2.3. Características físicas y químicas del cemento portland tipo I	19
2.2.3.1. Peso específico del cemento portland	19
2.2.3.2. Fineza del cemento portland	19
2.2.3.3. Resistencias mecánicas	20
2.2.4. Los agregados para el concreto	20
2.2.4.1. Clasificación de los agregados	20
2.2.4.2. Funciones del agregado	21
2.2.4.3. Interacción agregado – concreto	21
2.2.5. Propiedades del concreto en estado endurecido	22
2.2.5.1. Peso unitario del concreto	22
2.2.5.2. Resistencia a compresión	23
2.2.5.3. Módulo de elasticidad del concreto	23
2.2.5.4. Relación de esfuerzo-deformación del esfuerzo a compresión	24
2.2.6. Proceso de la carbonatación	26
2.2.7. Estándares de control de concreto en resistencia a compresión	28
2.2.8. Estudio estadístico	29
2.2.8.1. Estudio estadístico del comportamiento mecánico del concreto	30
2.2.8.2. Prueba de ajuste a una distribución normal	31
2.2.8.3. Variable aleatoria “Z”	31
2.2.8.4. Estadística descriptiva	32
2.2.9. Fórmulas a para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados para el concreto	33

Capítulo III	Materiales y métodos	35
3.1.	Materiales, equipos y herramientas	35
3.1.1.	Materiales	35
3.1.2.	Equipos	35
3.1.3.	Herramientas	35
3.2.	Metodología	36
3.2.1.	Ubicación	36
3.2.2.	Procedimiento	37
Capítulo IV	Resultados y discusión	42
A.	Características físicas y mecánicas de los agregados	42
B.	Materiales complementarios a utilizar	45
C.	Caracterización de la carbonatación acelerada del concreto	45
D.	Diseño de mezcla	46
E.	Resistencia a compresión de muestras de concreto de $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$	46
1.	Resistencia a compresión del concreto de $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$ de muestras patrón	46
1.1.	Prueba de ajuste a una distribución normal	48
1.2.	Variable aleatoria “Z” de la resistencia a compresión de muestras patrón	49
1.3.	Estadística descriptiva	50
2.	Resistencia a compresión del concreto de $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$ de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO_2 en períodos de: 30; 60; 90 y 120 días	51
2.1.	Prueba de ajuste a una distribución normal	53
2.2.	Variable aleatoria “Z” de la resistencia a compresión de muestras recubiertas con Aditivo Chema Seal®	54
2.3.	Estadística descriptiva	57
3.	Resistencia a compresión del concreto de $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$ de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 en los períodos de: 30; 60; 90 y 120 días	58
3.1.	Prueba de ajuste a una distribución normal	60
3.2.	Variable aleatoria “Z” de la resistencia a compresión de muestras sin recubrimiento	61
3.3.	Estadística descriptiva	64
4.	Comparativo de la resistencia a compresión de las muestras de concreto	65
4.1.	Comparativo de la resistencia a la compresión: muestra patrón versus muestras recubiertas con Chema Seal®, expuestas a CO_2 , en diferentes períodos de estudio	65
4.2.	Resistencia a la compresión de muestra patrón versus muestras sin recubrimiento expuestas a CO_2 , en diferentes períodos de estudio	69
4.3.	Comparativo entre muestras con aditivo versus muestras sin aditivo en diferentes tiempos de exposición al CO_2 .	69
F.	Profundidad de carbonatación de muestras	69
1.	Profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$,	

	Expuestos al CO ₂ , por un período de 30, 60, 90 y 120 días, recubiertas con Chema Seal®	69
1.1.	Prueba de ajuste a una distribución normal	70
1.2.	Variable aleatoria “Z” de la profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo	71
1.3.	Estadística descriptiva	72
2.	Profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, expuestos al CO ₂ , por un período de 30, 60, 90 y 120 días, sin recubrimiento	74
2.1.	Prueba de ajuste a una distribución normal	74
2.2.	Variable aleatoria “Z” de la profundidad de carbonatación de muestras sin Recubrimiento	74
2.3.	Estadística descriptiva	78
3.	Comparativo de la profundidad de carbonatación de las muestras de concreto	78
3.1.	Comparativo de la variación de la profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , en diferentes períodos de estudio	78
3.2.	Variación de la profundidad de carbonatación de muestras Sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	79
3.3.	Comparativo de la profundidad de carbonatación de muestra con aditivo versus muestras sin aditivo en diferentes tiempos de exposición al CO ₂	80
3.4.	Comparativo de la resistencia a compresión vs profundidad de carbonatación de muestra con aditivo en diferentes tiempos de exposición al CO ₂	81
3.5.	Comparativo de la resistencia a compresión vs profundidad de carbonatación de muestra sin aditivo en diferentes tiempos de exposición al CO ₂	82
G.	Peso de muestras.	82
1.	Variación del peso de las muestras entre inicial (28 días de Curado), peso recubierto Con aditivo y peso luego de la exposición al CO ₂ , a los 30, 60, 90 y 20 días	83
2.	Variación del peso promedio de las muestras entre en las diferentes etapas y tiempos de exposición al CO ₂ , recubiertas con aditivo	84
3.	Variación del peso de las muestras sin recubrimiento; entre peso inicial (28 días de curado) y peso luego de la exposición al Co ₂ , a los 30, 60, 90 y 20 días	85
4.	Variación del peso promedio de las muestras sin recubrimiento en las diferentes Etapas y tiempos de exposición al CO ₂	86
5.	Comparativo de pesos de muestra con aditivo versus muestras Sin aditivo en Diferentes tiempos de exposición al CO ₂	89
Capítulo V	Conclusiones	87
	Propuesta	88
Capítulo VI	Referencias bibliográficas	89

Capítulo VII	Apéndices	94
A.	Características físicas y mecánicas de los agregados	94
B.	Diseño de mezcla	100
1.	Propiedades del cemento	100
2.	Características físicas del agregado fino	100
3.	Características físicas del agregado grueso	101
4.	Características estructurales	101
5.	Método volúmenes absolutos	101
6.	Cantidad de materiales por m ³	102
7.	Proporcionamiento de materiales	102
C.	Resistencia a compresión de muestras de concreto	103
1.	Resistencia a compresión de muestras patrón	103
2.	Resistencia a compresión del concreto de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ por un período de 30 días	104
3.	Resistencia a compresión del concreto de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ por un período de 30 días	105
4.	Resistencia a compresión del concreto de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ por un período de 60 días	106
5.	Resistencia a compresión del concreto de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ por un período de 60 días	107
6.	Resistencia a compresión del concreto de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ por un período de 90 días	108
7.	Resistencia a compresión del concreto de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ por un período de 90 días	109
8.	Resistencia a compresión del concreto de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , 120 días	110
9.	Resistencia a compresión del concreto de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ por un período de 120 días	111
D.	Profundidad de carbonatación de muestras	112
E.	Pesos, diámetro y altura de muestras carbonatadas	114
F.	Propuesta	116
	Cartilla de aplicación de recubrimiento en estructuras de concreto con aditivo	116
	Manual de hoja de cálculo para la estimación de la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión del concreto de $f'c=210$ kg/cm ² para Cajamarca	117
G.	Panel fotográfico	123
	Anexos	130
1.	Hoja técnica de cementos portland tipo I	130
2.	Inspección técnica vehicular	131
3.	Hoja técnica aditivo Chema Seal®	132

Lista de tablas

Tabla 1.	Fabricación de cementos en el Perú	19
Tabla 2.	Estándares para el control del concreto	28
Tabla 3.	Factores de modificación para la desviación estándar	29
Tabla 4.	Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra	29
Tabla 5.	Coefficiente de variación y grado de uniformidad en el concreto	30
Tabla 6.	Número de muestras para cada etapa de estudio	39
Tabla 7.	Características físicas y mecánicas de los agregados	39
Tabla 8.	Gases emitidos por el vehículo utilizado en la carbonatación acelerada	46
Tabla 9.	Proporciones de materiales en peso y volumen para concreto de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	46
Tabla 10.	Valores característicos del concreto de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de muestra patrón	47
Tabla 11.	Valores probabilísticos de la resistencia a compresión de muestras patrón	48
Tabla 12.	Valores de “Z” para las resistencias a la compresión de 15 muestras patrón	49
Tabla 13.	Parámetros estadísticos para las muestras patrón	50
Tabla 14.	Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 30 días	52
Tabla 15.	Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 60 días	52
Tabla 16.	Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 90 días	53
Tabla 17.	Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 120 días	53
Tabla 18.	Valores probabilísticos de la resistencia a compresión de muestras recubiertas con aditivo, expuestas a CO_2 , en los períodos de 30; 60; 90 y 120 días	53
Tabla 19.	Valores de “Z” de resistencias a la compresión de muestras recubiertas con aditivo, expuestas a CO_2 , por 30 días	54
Tabla 20.	Valores de “Z” de resistencias a la compresión de muestras recubiertas con aditivo, expuestas a CO_2 , por 60 días	54
Tabla 21.	Valores de “Z” de resistencias a la compresión de muestras recubiertas con aditivo, expuestas a CO_2 , por 90 días	55

Tabla 22.	Valores de “Z” de resistencias a la compresión de muestras recubiertas con aditivo, expuestas a CO ₂ , por 120 días	55
Tabla 23.	Parámetros estadísticos de la resistencia a compresión de muestras, recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ en diferentes períodos de estudio	57
Tabla 24.	Valores característicos del concreto f'c = 210 kg/cm ² , promedio de las muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ 30 días	58
Tabla 25.	Valores característicos del concreto f'c = 210 kg/cm ² , promedio de las muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ 60 días	58
Tabla 26.	Valores característicos del concreto f'c = 210 kg/cm ² , promedio de las muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ 90 días	59
Tabla 27.	Valores característicos del concreto f'c = 210 kg/cm ² , promedio de las muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ 120 días	59
Tabla 28.	Valores probabilísticos de resistencia a la compresión de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ en los períodos de 30; 60; 90 y 120 días	60
Tabla 29.	Valores de “Z” para la resistencia a la compresión muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ , 30 días	61
Tabla 30.	Valores de “Z” para la resistencia a la compresión muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ , 60 días	61
Tabla 31.	Valores de “Z” para la resistencia a la compresión muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ , 90 días	61
Tabla 32.	Valores de “Z” para la resistencia a la compresión muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ , 120 días	61
Tabla 33.	Parámetros estadísticos de resistencia a la compresión de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ en los diferentes períodos de estudio	64
Tabla 34.	Profundidad de carbonatación de muestras de concreto de f'c = 210 kg/cm ² , recubiertas con aditivo Chema Seal® expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	70
Tabla 35.	Valores probabilísticos de la profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ en períodos de 30; 60; 90 y 120 días	70
Tabla 36.	Valores de “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo, expuestas a CO ₂ , 120 días	72
Tabla 37.	Parámetros estadísticos de la profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos	73

Tabla 38	Profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, sin recubrimiento expuestas a CO_2 , en los diferentes períodos de estudio	74
Tabla 39	Valores probabilísticos de la profundidad de carbonatación de las muestras recubiertas con Aditivo Chema Seal®, expuestas a CO_2 en los períodos de 30; 60; 90 y 120 días	74
Tabla 40.	Valores de “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 , 30 días	75
Tabla 41.	Valores de “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 , 60 días	75
Tabla 42.	Valores de “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 , 90 días	75
Tabla 43.	Valores de “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 , 120 días	75
Tabla 44.	Parámetros estadísticos de profundidad de carbonatación muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO_2 , en diferentes períodos de estudio	78
Tabla 45.	Contenido de humedad del agregado fino	94
Tabla 46.	Contenido de humedad del agregado grueso	94
Tabla 47.	Ensayos de determinación de granulometría del agregado fino (primera muestra)	94
Tabla 48.	Ensayos de determinación de granulometría del agregado fino (segunda muestra)	95
Tabla 49.	Ensayos de determinación de granulometría del agregado fino (tercera muestra)	95
Tabla 50.	Ensayos de determinación de granulometría del agregado grueso (primera muestra)	96
Tabla 51.	Ensayos de determinación de granulometría del agregado grueso (segunda muestra)	97
Tabla 52.	Ensayos de determinación de granulometría del agregado grueso (tercera muestra)	97
Tabla 53	Módulo de fineza del agregado fino	98
Tabla 54.	Módulo de fineza del agregado grueso	98
Tabla 55.	Determinación del peso específico del agua para el agregado fino	98
Tabla 56.	Determinación de factor f	98
Tabla 57.	Determinación del peso unitario suelto	98
Tabla 58.	Determinación del peso unitario compactado	98
Tabla 59.	Determinación del peso específico	99
Tabla 60.	Determinación del peso específico del agua para el agregado grueso	99
Tabla 61.	Determinación de factor f	99
Tabla 62.	Determinación del peso unitario suelto	99
Tabla 63.	Determinación del peso unitario compactado	99

Tabla 64. Determinación del peso específico	99
Tabla 65. Absorción del agregado fino	100
Tabla 66. Absorción del agregado grueso	100
Tabla 67. Determinación porcentaje de material más fino del agregado fino	100
Tabla 68. Determinación porcentaje de material más fino del agregado grueso	100
Tabla 69. Abrasión del agregado grueso	100
Tabla 70. Dosificación de materiales en peso como en volumen para concreto de $f'c=210\text{kg/cm}^2$	102
Tabla 71. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras patrón en estado endurecido y prueba a compresión, módulo de elasticidad	103
Tabla 72. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ por un período de 30 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad	104
Tabla 73. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ por un período de 30 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad	105
Tabla 74. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ por un período de 60 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad	106
Tabla 75. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ por un período de 60 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad	107
Tabla 76. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ por un período de 90 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad	108
Tabla 77. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ por un período de 90 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad	109
Tabla 78. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ por un período de 120 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad	110
Tabla 79. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ por un período de 120 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad	111

Tabla 80. Profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , 30 días	112
Tabla 81. Profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , 60 días	112
Tabla 82. Profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , 90 días	112
Tabla 83. Profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , 120 días	112
Tabla 84. Profundidad de carbonatación de muestras sin Recubrimiento, expuestas a CO ₂ , 30 días	113
Tabla 85. Profundidad de carbonatación de muestras sin Recubrimiento, expuestas a CO ₂ , 60 días	113
Tabla 86. Profundidad de carbonatación de muestras sin Recubrimiento, expuestas a CO ₂ , 90 días	113
Tabla 87. Profundidad de carbonatación de muestras sin Recubrimiento, expuestas a CO ₂ , 120 días	113
Tabla 88. Características de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , 30 días	114
Tabla 89. Características de las muestras sin recubrimiento,expuestas a CO ₂ , 30 días	114
Tabla 90. Características de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , 90 días	114
Tabla 91. Características de las muestras sin recubrimiento,expuestas a CO ₂ , 60 días	114
Tabla 92. Características de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , 90 días	115
Tabla 93. Características de las muestras sin recubrimiento,expuestas a CO ₂ , 30 días	115
Tabla 94. Características de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , 120 días	115
Tabla 95. Características de las muestras sin recubrimiento,expuestas a CO ₂ , 120 días	115

Lista de figuras

Figura 1.	Curva esfuerzo – deformación del concreto en compresión	24
Figura 2.	Efecto de la velocidad de carga en la resistencia a la compresión del concreto	25
Figura 3.	Módulo tangente y secante del concreto	26
Figura 4.	Proceso de carbonatación	27
Figura 5.	Curva de distribución normal	29
Figura 6.	Fotografía satelital de la ubicación de la investigación	36
Figura 7.	Ubicación de toma de datos de la profundidad de carbonatación	37
Figura 8.	Esquema de procedimiento de la investigación	41
Figura 9.	Curva de distribución granulométrica promedio de 3 ensayos agregado fino	43
Figura 10.	Curva de distribución granulométrica promedio de 3 ensayos agregado grueso	43
Figura 11.	Gráfico esfuerzo – formación promedio de 15 muestras patrón	47
Figura 12.	Diagrama de dispersión de valores “Z” para cilindros de concreto	49
Figura 13.	Histograma de frecuencias para la resistencia a compresión de muestras patrón.	50
Figura 14.	Gráfico esfuerzo – formación promedio de 15 muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO ₂ 30 días	51
Figura 15.	Gráfico esfuerzo – formación promedio de 15 muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO ₂ 60 días	51
Figura 16.	Gráfico esfuerzo – formación promedio de 15 muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO ₂ 90 días	52
Figura 17.	Gráfico esfuerzo – formación promedio de 15 muestras recubiertas con aditivo expuestas a 120 días	52
Figura 18.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 30 días a CO ₂ recubiertas con aditivo	55
Figura 19.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 60 días a CO ₂ recubiertas con aditivo	55
Figura 20.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 90 días a CO ₂ recubiertas con aditivo	56

Figura 21.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 120 días a CO ₂ recubiertas con aditivo	56
Figura 22.	Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 30 días a CO ₂ recubiertas con aditivo	56
Figura 23.	Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 60 días a CO ₂ recubiertas con aditivo	56
Figura 24.	Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 90 días a CO ₂ recubiertas con aditivo	57
Figura 25.	Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 120 días a CO ₂ recubiertas con aditivo	57
Figura 26.	Gráfico esfuerzo – deformación promedio de 15 muestras sin recubrimiento expuesta a CO ₂ 30 días	58
Figura 27.	Gráfico esfuerzo – deformación promedio de 15 muestras sin recubrimiento expuesta a CO ₂ 60 días	58
Figura 28.	Gráfico esfuerzo – deformación promedio de 15 muestras sin recubrimiento expuesta a CO ₂ 90 días	59
Figura 29.	Gráfico esfuerzo – deformación promedio de 15 muestras sin recubrimiento expuesta a CO ₂ 120 días	59
Figura 30.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 30 días a CO ₂ sin recubrimiento	62
Figura 31.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 60 días a CO ₂ sin recubrimiento	62
Figura 32.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 90 días a CO ₂ sin recubrimiento	62
Figura 33.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 120 días a CO ₂ sin recubrimiento	63
Figura 34.	Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 30, 60, 90 y 120 días a CO ₂ sin recubrimiento	63

Figura 35.	Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 30, 60, 90 y 120 días a CO ₂ sin recubrimiento	63
Figura 36.	Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 30, 60, 90 y 120 días a CO ₂ sin recubrimiento	63
Figura 37.	Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 30, 60, 90 y 120 días a CO ₂ sin recubrimiento	63
Figura 38.	Comparativo de resistencia a compresión de muestra patrón versus muestras recubiertas con Chema Seal®, expuestas CO ₂ en diferentes períodos de estudio	65
Figura 39.	Curvas esfuerzo-deformación promedio máximo de las muestras recubiertas con aditivo, en los diferentes períodos de estudio	65
Figura 40.	Curvas esfuerzo-deformación promedio en el punto de máxima inflexión de la muestra patrón, recubiertas con aditivo, para los diferentes períodos de estudio	65
Figura 41.	Comparativo de resistencia a compresión de especímenes de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, muestra patrón versus muestras sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	67
Figura 42.	Curvas esfuerzo-deformación promedio máximo de las muestras sin recubrimiento, en diferentes períodos de estudio	67
Figura 43.	Curvas esfuerzo-deformación promedio en el punto de máxima inflexión de la muestra patrón, sin recubrimiento, en los diferentes períodos de estudio	67
Figura 44.	Comparativo de resistencia a compresión de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, entre muestras con y sin recubrimiento con aditivo, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	69
Figura 45.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 120 días a CO ₂ recubiertas con aditivo	72
Figura 46.	Histograma de frecuencias para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas un período de 120 días a CO ₂ , recubiertas con aditivo Chama Seal®	73
Figura 47.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 30 días a CO ₂ sin recubrimiento	75

Figura 48.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 60 días a CO ₂ sin recubrimiento	76
Figura 49.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 90 días a CO ₂ sin recubrimiento	76
Figura 50.	Diagrama de dispersión de los valores “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 120 días a CO ₂ sin recubrimiento	76
Figura 51.	Histograma de frecuencias para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 30 días a CO ₂ sin recubrimiento	77
Figura 52.	Histograma de frecuencias para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 60 días a CO ₂ sin recubrimiento	77
Figura 53.	Histograma de frecuencias para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 90 días a CO ₂ sin recubrimiento	77
Figura 54.	Histograma de frecuencias para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 120 días a CO ₂ sin recubrimiento	77
Figura 55.	Variación de la profundidad de carbonatación promedio de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	78
Figura 56.	Variación de la profundidad de carbonatación promedio de muestras, sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	79
Figura 57.	Comparativo de la profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$, entre muestras con y sin recubrimiento con aditivo, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	80
Figura 58.	Comparativo de la resistencia a compresión Vs profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$, recubrimiento con aditivo, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	81
Figura 59.	Comparativo de la resistencia a compresión Vs profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$, sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	82
Figura 60.	Variación del peso promedio de muestras expuestas 30, 60, 90 y 120 días a CO ₂ , Con recubrimiento de aditivo	83

Figura 61.	Variación del peso promedio de muestras expuestas 30, 60, 90 y 120 días a CO ₂ , Con recubrimiento de aditivo	83
Figura 62.	Variación del peso promedio de muestras expuestas 30, 60, 90 y 120 días a CO ₂ , Con recubrimiento de aditivo	83
Figura 63.	Variación del peso promedio de muestras expuestas 30, 60, 90 y 120 días a CO ₂ , Con recubrimiento de aditivo	83
Figura 64.	Variación de pesos promedio de muestras de concreto de $f^{\prime}c = 210 \text{ kg/cm}^2$, Recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	84
Figura 65.	Variación de peso promedio de muestras expuestas 30 días a CO ₂ , sin recubrimiento	85
Figura 66.	Variación de peso promedio de muestras expuestas 60 días a CO ₂ , sin recubrimiento	85
Figura 67.	Variación de peso promedio de muestras expuestas 90 días a CO ₂ , sin recubrimiento	85
Figura 68.	Variación del peso promedio de muestras expuestas 120 días a CO ₂ , sin recubrimiento	85
Figura 69.	Variación de pesos promedio de muestras de concreto de $f^{\prime}c = 210 \text{ kg/cm}^2$, sin recubrimiento, expuestas a CO ₂ , en los diferentes períodos de estudio	86
Figura 70.	Comparativo del peso de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal® Vs peso de las muestras sin recubrimiento, en los diferentes períodos de estudio	86
Figura 71.	Curva de distribución granulométrica del agregado fino (primera muestra)	94
Figura 72.	Curva de distribución granulométrica del agregado fino (segunda muestra)	95
Figura 73.	Curva de distribución granulométrica del agregado fino (tercera muestra)	96
Figura 74.	Curva de distribución granulométrica del agregado grueso (primera muestra)	96
Figura 75.	Curva de distribución granulométrica del agregado grueso (segunda muestra)	97
Figura 76.	Curva de distribución granulométrica del agregado grueso (tercera muestra)	98
Figura 77.	Panel Fotográfico del proceso de la investigación	123

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi gratitud a mi asesor Dr. Valentín Paredes Oliva, por haberme brindado su confianza, apoyo y dedicación para desarrollar con éxito la presente Investigación.

A los docentes de la Escuela de postgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a los integrantes del Programa de Doctorado en Ciencias de la mención: Gestión Ambiental y Recursos Naturales; por haber compartido sus experiencias, conocimientos; por transmitirnos su sabiduría para la mejora continua de la educación superior, pilar fundamental del aprendizaje, desarrollo humano y social.

A la Facultad de Ingeniería, por haber tenido la benevolencia de brindarme sus instalaciones y equipos para el desarrollo de la investigación.

A los alumnos y en especial a Leiner Guerrero Gonzales, por el apoyo desinteresado recibido; en la etapa de investigación desarrollada en el laboratorio de la Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería.

Lista de abreviaturas

A.	:	Área promedio del espécimen de concreto en metros cuadrados
A.	:	Masa de la muestra secada al horno en el aire en gramos
A. Fino.	:	Agregado fino
A. Grueso.	:	Agregado grueso
a/c oW/C.	:	Relación agua - cemento
ACI.	:	American Concrete Institute (Instituto Americano del Concreto).
ALT.	:	Altura.
ASTM.	:	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)
B.	:	Masa de la muestra de ensayo de superficie saturada seca al aire en gramos
C.	:	Masa aparente de la muestra de ensayo saturada en agua en gramos
°C.	:	Grados Celsius
C/R.	:	Con recubrimiento
Ca(OH)₂	:	Dihidróxido de calcio, hidróxido de calcio, hidróxido cálcico
CaCO₃.	:	Trioxocarbonato (IV) de calcio, carbonato de calcio, carbonato cálcico
Cc.	:	Coefficiente de curvatura.
CEM.	:	Cemento.
cm.	:	Centímetros.
cm²	:	Centímetros cuadrados
CO Ralentí (%)	:	Monóxido de carbono emitido, en las revoluciones por minuto del motor cuando no está acelerado
CO.	:	Monóxido de carbono
CO+CO₂ Ralenti (%)	:	Monóxido de carbono y dióxido de carbono emitido, en las revoluciones por minuto del motor cuando no está acelerado
CO₂	:	Dióxido de carbono
CO₂-H₂O.	:	Ácido carbónico
CORRIG.	:	Corregido
CSH.	:	Silicato de calcio hidratado
Cu.	:	Coefficiente de uniformidad
DBMC.	:	International Conférence on Durability of Building Materials and Components (Conferencia internacional sobre la durabilidad de los materiales y componentes de construcción)
DIÁM.	:	Diámetro
Ec.	:	Módulo de elasticidad del concreto en kg/cm ²
EC.	:	Ecuación
ESF.	:	Esfuerzo

f .	: Factor de calibración del recipiente para el ensayo
f'c.	: Resistencia especificada a la compresión del concreto
f'cr.	: Resistencia promedio a la compresión requerida del concreto
FA.	: Fly Ash (ceniza volante)
FORM.	: Fórmula
FT-IR.	: Infrarrojo de Transformada de Fourier
g.	: Gramos
g/cm ³	: Gramos por centímetro cúbico
H ₂ O.	: Agua
HC Ralenti (ppm).	: Hidrocarburos no quemados en las revoluciones por minuto del motor cuando no está acelerado
HCl.	: Ácido clorhídrico o cloruro de hidrogeno
HR.	: Humedad relativa
IJSR.	: International Journal of Science and Research (Revista Internacional de Ciencia e Investigación)
IP.	: Índice de plasticidad
<i>k</i> .	: Constante en funcion de la humedad relativa
K(OH).	: Hidróxido de potasio, hidróxido potásico
Kg.	: Kilogramos
kg/cm ²	: Kilogramos por centímetro al cuadrado
kg/m ³	: Kilogramos por metro cúbico
lt/m ³	: Litros por metro cúbico
m.	: Metro
m ³	: Metro cúbico
Mf.	: Módulo de fineza
ml.	: Metro lineal
mm.	: Milímetros
MOD. ELAST	: Módulo de elasticidad
MP.	: Muestra patrón
<i>n</i> .	: Número de ensayos consecutivos de resistencia
Na(OH)	: Hidróxido de sodio, hidróxido sódico o hidrato de sodio
NMX.	: Normas Mexicanas
NTE.	: Norma técnica de edificaciones
NTP.	: Norma técnica peruana
(OH) ₂	: Dihidróxido
P.	: Carga aplicada al espécimen de concreto en kilogramos
(P).	: Valor Probabilístico
P.U.	: Peso unitario

P_1	: Masa seca de la muestra original en gramos
P_2	: Masa seca de la muestra luego del lavado en gramos
pH.	: Potencial de hidrógeno
pie ³	: Pie cúbico
PM10.	: Particulate Matter (partículas de material contaminantes orgánicos del aire que miden menos de 10 μm de diámetro)
PROM.	: Promedio
ROT.	: Rotura
RPM.	: Revoluciones por minuto
S.	: Masa de la muestra saturada superficialmente seca en gramos
S/R.	: Sin recubrimiento
SO ₂	: Dióxido de azufre, óxido de azufre (IV), anhídrido sulfuroso.
SS.	: Desviación estándar de la muestra
T.	: Temperatura ambiente
t .	: Tiempo en años
T°.	: Temperatura
Tc.	: Tiempo de curado inicial
Tm.	: Tonelada
μm .	: Micrómetro, micrón o micra (equivalente a una milésima parte de un milímetro)
VOL.	: Volumen
W.	: Peso unitario del concreto en kg/m^3
W%	: Contenido de humedad en porcentaje
(W).	: Estadístico de contraste Shapiro-Wilk
x .	: Profundidad de carbonatación en milímetros
\bar{X} .	: Promedio de n resultados de ensayos de resistencia
X_i .	: Ensayo individual de resistencia
Z.	: Distribución Normal Tipificada
μ .	: Población como tal o medida del conjunto de datos
σ .	: Varianza de la población o desviación estándar

RESUMEN

El ser humano en su afán de generar bienestar ha creado materiales que permiten edificar usando el concreto, su desarrollo y crecimiento también permitió la creación de máquinas y equipos que facilitan los trabajos y forjen prosperidad; estas maquinarias generan efectos: en la salud del ser humano, en las infraestructuras y medio ambiente que los alberga. Es por ello que esta investigación tiene como objeto determinar el efecto del tiempo de exposición al CO₂, del concreto de $f'c=210$ kg/cm², en profundidad de carbonatación y resistencia a compresión. La profundidad de carbonatación se determinó mediante el test de fenolftaleína, la que en muestras sin recubrimiento con aditivo resistente a la intemperie estuvo directamente relacionada con el tiempo de exposición al CO₂ y en las recubiertas presentaron resistencia inicial para luego continuar con la relación descrita. La resistencia a compresión del concreto se determinó en la máquina universal, que comparando resultados obtenidos con testigos patrón, las muestras recubiertas mostraron inicialmente una tendencia creciente hasta en un 13%, luego una disminución progresiva en función al período de exposición, describiendo la ecuación $Y=-1,11E^{-06}X^4+3,99E^{-04} X^3-4,90E^{-02} X^2+2,12X+230,44$. En cambio, en las muestras no recubiertas la disminución fue gradual desde el inicio caracterizando la función $Y = - 8,36E^{-07}X^4+2,76E^{-04}X^3-3,64E^{-02}X^2+1,85X+230,44$. Se realizaron 140 ensayos: 05 muestras para diseño de mezclas, 15 experimentos por cada variación del tiempo de exposición a CO₂ (30, 60, 90, 120 días) y por tipo de muestra. Los testigos de concreto fueron expuestos en un depósito hermético al CO₂, simulando un ambiente totalmente saturado.

Palabras Claves: Profundidad de carbonatación, Carbonatación del concreto, Resistencia a compresión del concreto, Exposición del concreto a CO₂.

ABSTRACT

The human being in his eagerness to generate well-being has created materials that allow the concrete to be used, its development and growth also allowed the creation of machines and equipment that facilitate jobs and forge prosperity; These machines generate effects: in the health of the human being, in the infrastructure and environment that houses them. That is why this research aims to determine the effect of CO₂ exposure time, of the concrete of $f'c = 210 \text{ kg / cm}^2$, in depth of carbonation and compressive strength. The carbonation depth was determined by the phenolphthalein test, which in samples uncoated with weather-resistant additive was directly related to the time of exposure to CO₂ and in the coatings presented initial resistance and then continued with the described relationship. The compressive strength of the concrete was determined in the universal machine, which comparing results obtained with standard controls, the coated samples initially showed an increasing trend up to 13%, then a progressive decrease depending on the exposure period, describing the equation $Y = -1,11 E^{-06} X^4 + 3,99 E^{-04} X^3 - 4,90 E^{-02} X^2 + 2,12 X + 230,44$. In contrast, in the uncoated samples the decrease was gradual from the beginning characterizing the function $Y = -8,36 E^{-07} X^4 + 2,76 E^{-04} X^3 - 3,64 E^{-02} X^2 + 1,85 X + 230,44$. 140 tests were performed: 05 samples for mixing design, 15 experiments for each variation of the CO₂ exposure time (30, 60, 90, 120 days) and by type of sample. Concrete witnesses were exposed in a CO₂-tight tank, simulating a fully saturated environment.

Keywords: Carbonation depth, Concrete carbonation, Concrete compression residence, Concrete exposure to CO₂

Capítulo I

Introducción

El concreto como material de construcción es y ha sido generosamente utilizado en todo el mundo por su relativo bajo costo, gran resistencia a compresión y capacidad de moldearse. Siendo el cemento el producto principal, las majestuosas ciudades están llenas de colosales estructuras de concreto, por lo que el cemento continúa siendo solicitado para la ejecución de obras de envergadura.

El Perú en los últimos años ha mostrado un gran crecimiento en la industria inmobiliaria de Latinoamérica; existiendo el despegue en el desarrollo urbano, así como la ejecución de obras de gran envergadura de carácter estatal y privado, con una producción aproximada de 6,86 millones de toneladas de cemento, ocupando el puesto 42 de producción de cemento en el mundo.(Cementos-Inka, 2017).

A pesar de la gran bondad que ofrece el concreto en las construcciones, este se ve afectado por una serie de factores tanto internos como externos, siendo la segunda causa más común de deterioro el fenómeno natural de la carbonatación. Una consecuencia de la carbonatación es la disminución del pH del hormigón desde 13 hasta 9 después del proceso. La profundidad carbonatación y la consecuente reducción de la alcalinidad del mismo generan la despasivación del concreto, pudiendo llegar eventualmente a la profundidad de las armaduras; que con la presencia de humedad y oxígeno producirá la corrosión del acero de refuerzo, llevando a la fisuración y desprendimiento del recubrimiento del concreto (Martínez, 2010).

El ser humano a partir de los años 80 – 90 ha desarrollado velozmente las áreas científicas y tecnológicas mostrando la necesidad de efectuar sus actividades de manera cada vez más rápida, acorde al tiempo que estamos viviendo, congruente a la globalización, por lo que se vale de equipos, herramientas y medios para optimizar el tiempo; una muestra son los vehículos motorizados, los mismos que para poder desplazarse requieren de energía de alguna fuente y

transformarla mediante el motor en energía cinética para que las ruedas giren y se produzca el desplazamiento, esta transformación produce emisiones de CO y CO₂, las que en el concreto aceleran el proceso de carbonatación y corroe rápidamente a las estructuras metálicas, etc. (Blancarte, 2011).

Los efectos del tiempo de exposición del concreto ante la emisión de CO₂, en las estructuras de concreto armado en el Perú son bastante reducidos, por consiguiente se desconoce la magnitud de daños que se pueden producir en las mismas, esta brecha de conocimiento trae consigo no tomar en consideración medidas necesarias a fin de proteger las estructuras de concreto armado del fenómeno de carbonatación natural que ocurre todos los días a las miles de estructuras existentes en el mundo, haciéndolas cada día que pasa más vulnerables. El avance de carbonatación de las estructuras será lento por el tiempo o muy rápido en eventos como incendios que se producen en sistemas estructurales, lo que afectan a la economía, por los costos que se invierten en remediar sus efectos en reparaciones o por el colapso total que podía producirse.

El incremento del parque automotor en el Perú es preocupante; pues como es bien conocido, los vehículos motorizados son una fuente generadora de monóxido de carbono; al cierre del 2015 alcanzó un total de 2,5 millones de vehículos y el mercado de baterías llegó a 1,23 millones. Se estima que el 2016 el parque automotor cerró con 2,6 millones de vehículos (Fernández & Concepción, 2014), empeorando esta situación la gran población de vehículos usados o antiguos los que emiten mayor cantidad de gases contaminantes.

El parque automotor en Cajamarca no está exento del incremento, pues según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones – Oficina General de Planificación y Presupuesto, año 2012, en el año 2004 que se tenía 8 882 unidades vehiculares, al 2012 se tiene 19 673 unidades, sin considerar el incrementado de vehículos motorizados menores como mototaxis y motos lineales.

El estudio propuesto permite comprender el comportamiento del concreto expuesto a CO₂, tanto en profundidad de carbonatación como en resistencia, y con ello aplicarlo en algunas

inspecciones a estructuras con fines de determinar la posibilidad de efectuar reforzamiento, mejoramiento o reparación; especialmente las de carácter emblemático o tradicionales o de gran inversión, minimizando costos y riesgos al efectuar alguna de las actividades descritas.

El efecto de exposición del concreto al CO₂ (Carbonatación) elaborado con materiales extraídos de las canteras de la ciudad de Cajamarca no han sido evaluados, siendo preocupante pues que algunos estudiosos han denominado a la carbonatación como el primer cáncer del concreto, lo que ha impulsado el interés en desarrollar el presente estudio de investigación.

Descrita la problemática existente en las estructuras de concreto armado de la ciudad de Cajamarca expuesta a CO₂, vulnerables al deterioro, por la ocurrencia del fenómeno de carbonatación tanto natural como por exposición continua de emisiones de gases de vehículos que albergan en sus instalaciones; limitado conocimiento del fenómeno para poder prevenirlo.

Planteando la interrogante de investigación: ¿Cuál es el efecto del tiempo de exposición al CO₂, del concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, en la profundidad de carbonatación y en la resistencia a compresión?. La misma que condujo a exponer la teoría que: “El tiempo de exposición al CO₂ del concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, tiene un efecto negativo en el concreto; al aumentar la profundidad de carbonatación disminuye la resistencia a la compresión concreto por cada 30 días de exposición”.

El objetivo general fue: determinar el efecto del tiempo de exposición del concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ al CO₂ en la profundidad de carbonatación y en la resistencia a compresión.

Así mismo, se ha tenido en consideración los siguientes objetivos específicos:

Determinar la profundidad de carbonatación en el concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ frente a la exposición de CO₂.

Determinar la resistencia a la compresión en el concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ frente a la exposición de CO₂ y finalmente proponer una alternativa de mitigación de riesgo en estructuras sometidas a exposición continua a CO₂.

La investigación por ser de diseño experimental, de tipo correlacional, para la recopilación de información se usó el método cuantitativo a fin de evaluar las variables de estudio de los tiempos de exposición de las muestras concreto al CO₂; para lo que se empleó equipos e instrumentos del laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, donde se efectuó la investigación, elaborándose especímenes de concreto $f'c = 210$ kg/cm² en una cantidad suficiente y necesaria para este tipo de estudios según normativa vigente, con agregados producidos por canteras locales que son utilizados en la ejecución de construcciones de la ciudad de Cajamarca (cantera Aguilar-Tartar Chico ubicado en el Km 1+100 Carretera Baños del Inca - Otuzco), material al el que se determinó las características físicas y mecánicas, se diseñó la mezcla para un concreto de $f'c = 210$ kg/cm², se fabricaron 140 unidades, curándolas en inmersión al agua por 28 días; 05 fueron para diseño de mezclas, 15 para cada variación del tiempo de exposición a CO₂ (30, 60, 90, 120 días) y por tipo de muestra (recubiertas y no recubiertas con aditivo). Los testigos de concreto fueron expuestos al CO₂ en un depósito hermético, simulando un ambiente totalmente saturado, compuesto por un tanque plástico conectado a una moto lineal, la que indujo CO₂, al cumplir los tiempos de exposición se efectuaron los ensayos tanto de resistencia a compresión en la máquina universal, para determinar la profundidad de carbonatación se aplicó el test de fenolftaleína (solución al 1% de fenolftaleína en hidro-alcohol, 70% de alcohol y 30% de agua), coloreando con un tono violáceo las zonas alcalinas, e incoloras zonas carbonatadas, las que se midieron con un vernier en 6 puntos.

Los valores obtenidos fueron procesados y analizados en la hoja de cálculo Microsoft Excel 2013 y por métodos estadísticos con el programa Statgraphics con el que se determinó los promedios, análisis de varianza y prueba de hipótesis; lo permitió contar con la rigurosidad científica deseada.

Capítulo II

Marco teórico

2.1. Antecedentes

Los estudios sobre el tema son bastante reducidos, pues los existentes han sido orientados a las ramas de la Ingeniería Mecánica o Ciencias Químicas, no obstante estos estudios proyectan una visión a la investigación realizada.

Gaspar & Muñoz (1977) en España; investigaron la acción del CO₂, en cemento el portland, cómo influye en las características químicas y físico-mecánicas. Lo hizo mediante la preparación de cuatro series de muestras con relación a/c = 0,50; teniendo como resultados: la longitud de las probetas de pasta pura permanece constante, por el contrario, el peso experimenta un ligero incremento, en aquellas probetas sometidas a la acción del CO₂ durante 7 días y que se curaron previamente en la cámara húmeda. A medida que aumenta el tiempo de permanencia en la atmósfera con CO₂, se aumenta las resistencias a flexión. Las probetas que fueron sometidas a exposición de CO₂ mostraron 80 y 50 % de carbonatación. Así mismo concluye que la acción del CO₂ sobre los compuestos hidratados del cemento portland produce modificación de la estructura mineralógica y de la composición química de dichos compuestos. La reacción de carbonatación de las probetas de pasta de cemento hidratado produce una disminución del pH, un ligero aumento del peso de dichas probetas y un incremento de las resistencias mecánicas a flexión. Las modificaciones experimentadas por los compuestos del cemento portland hidratado, son tanto más profundas cuanto menor es el tiempo de curado previo en cámara húmeda de las probetas de pasta, y mayor el tiempo a que están sometidas a la acción del CO₂. El CO₂ sobre los compuestos anhidros del cemento portland afecta a su estructura mineralógica y a su composición química.

Valdéz (1998) en México estudió: Efectos del dióxido de carbono en morteros con ceniza volante, de conformidad a los criterios del ACI; diseñó cuatro mezclas de mortero con relaciones a/c 0,35; 0,45; 0,55 y 0,65, efectuando ensayos de contenido de aire atrapado (ASTM-C-231-04,

2004), sometió a ensayos de compresión de especímenes curados durante 28 días (ASTM-C-39/C39M-03, 2005), determinó la absorción de los morteros no carbonatados a los de 28 días (ASTM-C-642-97, 1997), efectuó la prueba de permeabilidad al agua de los especímenes a los 28 días, realizó análisis porosimétricos del mortero carbonatado y no carbonatado; así mismo la carbonatación acelerada, con ello obtuvo los siguientes resultados: Que la relación entre el consumo de cementante, las relaciones a/c y la resistencia a la compresión; son las mismas relaciones de los morteros fabricados solo con cemento portland y morteros fabricados con cemento portland con ceniza volante, los mismos que también presentan resultados similares a los 28 días; para una sustitución del 25% del cemento. Lo anteriormente descrito confirma la potencialidad puzolánica de la ceniza de MICARE (Minera Carbonífera de Río Escondido). El peso volumétrico obtenido para las cuatro relaciones a/c disminuyó de 2 200 a 2160 kg/m³ al aumentar la relación a/c, pues la absorción incrementa conforme aumenta la relación a/c, para morteros con a/c de 0,35 la absorción fue del 5,2%; mientras que para el mortero con a/c de 0,65 fue del 6,7%. En cuanto a permeabilidad al agua, en los morteros sin carbonatar el coeficiente de permeabilidad (Darcy) acrecienta al incrementar la relación a/c. En morteros no carbonatados y carbonatados al aplicar el proceso acelerado de carbonatación para un mismo tiempo de exposición, la tendencia de los morteros es de disminuir el pH conforme se aumenta la relación a/c. En los análisis porosimétricos realizados a los morteros no carbonatados y carbonatados para las cuatro relaciones a/c, con y sin ceniza, se determinó que en los morteros con ceniza existió una reducción en la porosidad por efecto de la carbonatación de un 7,7 a un 3,5 %, al aumentar la relación a/c ya que el CO₂ reacciona con el hidróxido de calcio y forma carbonatos de calcio que ocupan mayor volumen que el hidróxido, reduciendo por consiguiente la porosidad. Para los morteros sin ceniza la reducción varió de 7,4 a un 3,1% respectivamente. En morteros con ceniza sin carbonatar se presenta un incremento en la porosidad, que varía de un 15,6 % para la relación a/c de 0,35 un 24,3 % para la relación a/c de 0,65 y al carbonatarse estos valores son reducidos a

12,1 y 16,6% respectivamente. Para el caso de los morteros sin ceniza y sin carbonatar se presenta un acrecentamiento en la porosidad, variando de un 13,2 % para la relación a/c de 0,35 a un 17,4 % para la relación a/c de 0,65, y al carbonatarse estos valores son reducidos a 5,8 y a 14,3% respectivamente. Finalmente concluye que: Al aumentar la relación a/c de 0,35 a 0,65 la porosidad se incrementa en 8,7% para morteros no carbonatados, al carbonatar los morteros la porosidad disminuye en 4,5% respectivamente. Conforme se incrementa las relaciones a/c, aumentan los porcentajes de macroporos y se disminuyen los porcentajes de mesoporos, esto es por efecto de la reacción de carbonatación; la producción de los carbonatos de calcio es más intensa en los mesoporos y por consiguiente, su contribución a la porosidad es total.

Montani (2000) en México en el artículo científico: La carbonatación, enemigo olvidado del concreto menciona: La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. Es un proceso bien comprendido que ha sido investigado y documentado perfectamente. Así mismo define ¿Qué es la carbonatación?, Factores que afectan la carbonatación, Estrategias de reparación y protección; concluye enfatizando la necesidad de que Estados Unidos reconozca a la carbonatación como una causa seria de la corrosión del acero de refuerzo, por lo que es necesario para evitar esta secuela se efectúen las pruebas de la profundidad de carbonatación, y deben siempre incluirse en la evaluación del concreto dañado por corrosión.

Moreno, Domínguez, Cob, & Duarte (2004) en México publicaron el estudio del efecto que causa la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación usando cámara de aceleración, para ello diseñaron cuatro diferentes tipos de mezclas de concreto para su estudio en ambientes acelerados de CO₂, con el fin de determinar sus coeficientes de carbonatación para cada una. Por cada mezcla se elaboraron 12 probetas cilíndricas de concreto simple de 7,5 cm de diámetro y de 15 cm de altura para realizar las pruebas de profundidad de carbonatación, 4 probetas de 10 cm de diámetro y de 20 cm de altura para determinar la porosidad, y 3 probetas de 15 cm de diámetro

y de 30 cm de altura las cuales se utilizaron para determinar el esfuerzo a la compresión. También elaboraron por cada mezcla 3 probetas de concreto en forma de prismas de 5 x 10 x 20 cm. reforzadas con dos varillas de acero # 3, a las que las expusieron a carbonatación acelerada en una cámara por 121 días. Como conclusión mencionan que existe una relación entre la pérdida de masa por secado al ambiente y el tipo de mezcla; a mayor a/c, mayor porcentaje de pérdida de masa. La profundidad de carbonatación varía de acuerdo al tipo de mezcla siendo mayor profundidad de carbonatación conforme aumenta relación a/c.

Babiche (2004) en Perú a través del Instituto Peruano de Energía Nuclear publicó: Carbonatación del recubrimiento de concreto; en el que se menciona que el acero de refuerzo y el concreto conforman el “hormigón armado” porque presentan una buena adherencia y sus coeficientes de dilatación térmica son del mismo orden. La carbonatación, es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. En estructuras de concreto que no contengan acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias, sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia adentro desde la superficie expuesta del concreto, y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión. Aunque la carbonatación es una causa de la corrosión menos importante que los cloruros, no por ello es menos seria en términos del daño que provoca y del dinero que cuesta remediar sus efectos, concluyendo que es importante el uso de inhibidores de corrosión aplicados a la superficie que se difundan a través del concreto.

Thiery, Dangla, Villain, & Platret (2005) en Francia en la X-DBMC International Conférence On Durability of Building Materials and Components; presentaron un modelo de predicción para la carbonatación a través iones de $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ y reacciones químicas, en el que mencionan que es un hecho reconocido que la corrosión del acero reduce la capacidad de servicio y la seguridad del hormigón armado. Por lo general, las condiciones de alta alcalinidad en el hormigón conducen

a la formación de una capa pasiva en la superficie del acero. Sin embargo, la difusión natural del dióxido de carbono atmosférico (CO_2) en el hormigón induce una disminución del valor de pH del agua intersticial después de reacciones con hidratos tales como portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y silicato de calcio hidratado CSH. Concluye que el modelo propuesto basado en la transferencia de CO_2 - H_2O acopladas y reacciones químicas genera resultados interesantes, que permiten mejorar la comprensión global de los procesos de carbonatación y constituyen una poderosa herramienta de predicción.

Carvajal, Silva, Valiente, & Venegas (2007) en Chile en la revista científica de la Construcción publicaron: Los efectos de la carbonatación acelerada en distintos tipos de cemento y hormigones. Se realizó la investigación experimental en diversos tipos de cemento chileno y tres razones agua/cemento (0,45; 0,50 y 0,55), teniendo como conclusión: En base a las probetas cortadas por la mitad, que se aplicó fenolftaleína, se determinó que los cementos que presentaron el mejor comportamiento frente al ataque de CO_2 fueron el Portland corriente, el segundo un 25% menos efectivo; la penetración de CO_2 en probetas confeccionadas con la razón a/c de 0,45 fue aproximadamente el 50% inferior a la penetración obtenida con las razones a/c de 0,50 y 0,55; entre otras.

Chavéz, Pérez, Reyes, Corvo, & Osorno (2010) en Cuba publicaron: Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación, para ello construyeron 12 vigas de concreto simple (15 x 15 x 60 cm), de las cuales se elaboraron 6 vigas de concreto con relación a/c 0,49 y 6 vigas de concreto con relación a/c 0,69; se realizaron en los agregados pruebas de absorción, humedad, permeabilidad, consolidación y granulometría de acuerdo a los requerimientos de las normas mexicanas (NMX-C-111, 2004). La relación a/c empleada para la elaboración de la mezcla, se eligió considerando las características de absorción que presentó el agregado grueso proveniente de la trituración de roca caliza. Llega a concluir que los factores principales en el proceso de carbonatación son la porosidad del concreto y de la humedad relativa

del medio ambiente. Así mismo la relación a/c repercutió en el proceso de avance del frente de carbonatación en el concreto elaborado con agregados calcáreos. El uso de ensayo acelerado mediante cámara de carbonatación es una herramienta importante que permite aproximar en períodos cortos las condiciones de avance de la neutralización del concreto originados por el CO₂.

Galán (2011) en España estudió: La carbonatación del hormigón teniendo en consideración la combinación de CO₂ con fases hidratadas del cemento y frente al cambio de pH, lo desarrollo de manera experimental, para ello fabricó pastas de cemento, morteros y hormigones (concretos), los que se sometieron a diferentes procesos de carbonatación natural, acelerada y supercrítica. Con diferentes técnicas de caracterización, teniendo como resultados experimentales dos bloques; el primero de carbonatación natural y el segundo de acelerada, siendo las más importantes y de interés para el investigador las que menciono: ***Carbonatación Natural: (Pastas; Cantidad de CO₂ Vs Tiempo)***. Las probetas fabricadas con cemento con caliza, presentan valores considerablemente superiores al resto. El parámetro *A* (la amplitud), equivale al máximo de absorción de CO₂ varían entre 15 y 30% en el exterior y entre 15 y 20% en el interior. Las probetas del interior son las que menor máximo de CO₂ absorbido presentan, variando a/c 0,6 entre 12 y 20% y en las de a/c 0,45 entre 14 y 23%. En el exterior protegido entre 17 y 30% para a/c 0,6 y entre 18 y 38% para las de a/c 0,45. En el exterior no protegido los valores se encuentran entre 18 y 35% en las de a/c 0,6 y entre 17 y 26% en las de 0,45. ***(Porosidad)***. Probetas a los 28 días con relación a/c 0,6 presentan mayor porosidad que las de a/c 0,45, en algunos casos llegando incluso al doble. En general, el volumen de poros en las probetas de a/c 0,45 se encuentra entre 20 y 30% y en las de 0,6 entre 30 y 40%. ***(Medida y Peso)***. En probetas de a/c 0,5 y 0,45 las pérdidas de peso en el secado son ligeramente inferiores en las de a/c 0,45, y las ganancias posteriores ligeramente superiores en las de a/c 0,5. ***(Profundidad del frente de cambio de pH vs tiempo $x = k \cdot \sqrt{t}$)***.

Galán (2011). También menciona que los hormigones tipo edificación presentan constantes de proporcionalidad superiores, alrededor del doble. (***Cantidad de CO₂ combinado en un año***). Las probetas del exterior no protegido absorben más CO₂ en la zona de pH<8-9 que las del exterior protegido, las probetas del interior son las que menos absorben, en el exterior no protegido varían entre 15 y 25%, en el exterior protegido entre 10 y 25%, y en interior entre 5 y 20%. ***Carbonatación Acelerada: (Carbonatación de pastas a 0,5% CO₂ 1 año: Peso)***. Existe una pérdida de peso durante estabilización en (Humedad relativa) HR constante y una ganancia de peso por carbonatación 0,5% CO₂ en HR constante. (***Profundidad del frente de cambio de pH***). Mediante el indicador de pH de fenolftaleína solo las probetas estabilizadas y carbonatadas en HR de 53% y 65% presentaban un pH inferior a 8, siendo esta mayor en las probetas de mayor a/c. En ambas relaciones a/c la ‘profundidad’ de las probetas carbonatadas al 53% de HR es mayor que la de las probetas carbonatadas al 65%. (***Porosimetría***). Antes de la carbonatación las probetas tienen porosidades similares, alrededor del 25%, después de la carbonatación las probetas disminuyen su porosidad, lo que implica que no tiene ninguna relación con la humedad relativa, con la mayor o menor carbonatación, ni con la relación a/c. En consecuencia concluye: Que se logró obtener las ecuaciones que describen la evolución temporal de los procesos de absorción de CO₂, y avance del frente de pH en el hormigón. Asimismo, encontró ecuaciones sigmoidales para describir la distribución espacial del carbonato cálcico y de la portlandita en el interior del material. Los parámetros relacionados con las propiedades mecánicas y químicas del cemento y del hormigón. Las propiedades de durabilidad del hormigón armado se consiguen gracias a la acción protectora que el hormigón ejerce sobre el acero. Además de suponer una barrera física que dificulta la entrada de agentes agresivos, la elevada alcalinidad del hormigón desarrolla sobre el acero una capa pasiva que lo mantiene inalterado mientras no se modifiquen esas condiciones. La carbonatación, produce una disminución del pH, la que, si llega a alcanzar la armadura da lugar a la destrucción de la capa pasiva del acero y a la corrosión generalizada

del mismo; el principal producto de la reacción de carbonatación es el carbonato cálcico, el que, por su estabilidad hasta temperaturas por encima de los 600°C fija el CO₂ de manera irreversible en condiciones normales de presión y temperatura.

Campos (2011) en México, desarrolló la investigación: Carbonatación del concreto en condiciones aceleradas y naturales: Aplicación al ambiente de la zona metropolitana de Monterrey, lo realizó con especímenes de forma cilíndrica de 7,5 x 15 cm. los que para cuantificar la carbonatación natural fueron sometidos en laboratorio a un ambiente de 22±2°C y 50±5% humedad relativa. A carbonatación acelerada, fueron almacenados en un cuarto con una humedad relativa de 60 % y una concentración de CO₂ de 5 y 100%. Para el 100% de concentración de CO₂ se realizaron pruebas a 1, 2 y 5 días, para el 5% de concentración de CO₂ se realizaron pruebas a 1,26 meses de exposición, con lo que obtuvo los siguientes resultados: Determinó la relación entre el coeficiente de carbonatación y la resistencia a la compresión a los 28 días. La misma que a igual resistencia a la compresión, el coeficiente de carbonatación aumenta conforme crece el porcentaje de reemplazo de la ceniza volante. Existen fuertes relaciones entre la carbonatación realizada en un ambiente natural con la realizada en condiciones aceleradas. En consecuencia concluye: Que el coeficiente de carbonatación aumenta, con el incremento de ceniza volante adicionada. El coeficiente de carbonatación es mayor, para especímenes con bajo contenido de CaO en la ceniza volante. Existen fuertes relaciones entre la profundidad de carbonatación de especímenes expuestos al ambiente natural y los expuestos a una cámara de carbonatación acelerada.

Lee, Kim, Lee, & Cho (2012) en Corea, en la International Journal of Civil and Environmental Engineering, publicaron el estudio para el grado de carbonatación en concreto utilizando el indicador de fenolftaleína, en el que se menciona que una estructura de concreto se diseña y construye con un propósito de uso, y se espera que mantenga su función por muchos años lo cual es el objetivo. Sin embargo, a medida que pasa el tiempo, las estructuras se deterioran

gradualmente y luego se degrada hasta el punto en que la estructura no puede ejercer la función para la cual fue construida. El tema de durabilidad es importante, pero esta se ve afectada especialmente por el daño que causa el cloruro, la carbonatación, el congelamiento-descongelamiento, etc. En el estudio presentado resaltan que la carbonatación es una de las principales causas del deterioro de la durabilidad de una estructura de hormigón, por lo que se investigó este factor cómo afecta al concreto a través de una técnica de análisis de microestructura, utilizando el método indicador existente y el método de medición del progreso de la carbonatación de forma cuantitativa se estudió simultáneamente utilizando un espectrómetro FT-IR (Infrarrojo de Transformada de Fourier) junto con la técnica de análisis de microestructura. Para la investigación se elaboró una muestra de forma cúbica de $50 \times 50 \times 50$ mm según lo normado por la ASTM. Dichas muestras las elaboró con cenizas volantes en una proporción de reemplazo del 20% de cemento Portland en masa, para determinar el cambio en la profundidad de la carbonatación en función de la relación agua/cemento, siendo en las proporciones de 0,40; 0,45; 0,50, y se elaboraron muestras de hormigón en 3 piezas en cada prueba para un total de 155, con lo que se midió el cambio de profundidad. Como resultado obtuvo que a medida que la relación a/c aumentó, la profundidad de la carbonatación apareció notablemente. En los casos de pasta y mortero, no hubo diferencias significativas en la velocidad de aumento en la profundidad de carbonatación.

Moreano & Palmisano (2012) en Perú efectuaron el estudio: Afectación de la contaminación atmosférica, efectos en la infraestructura del campus universitario debido a la emisión de partículas PM10 y CO, para ello se escogió un área de muestra en la Pontificia Universidad Católica del Perú, el campus universitario que cuenta con vida silvestre, áreas verdes, tráfico de personas y vehículos siguiendo la metodología de toma de muestras conocida como monitoreo densiométrico pasivo de la calidad del aire; teniendo como resultados: Que existe contaminación, más por el lado de las partículas en suspensión que por las de monóxido pues los valores

resultaron por debajo de los estándares permitidos, por lo que se optó por utilizar datos vigentes de otro compuesto, SO_2 y de esta manera poder desarrollar ecuaciones que expliquen la presencia de ciertos fenómenos y cuantificarlos, así mismo concluye: que la solución para corregir o disminuir el efecto de las emisiones en los materiales estudiados, es efectuar barreras verdes, las que debido a sus características propias, funcionan como filtros naturales.

Tung (2013) en Francia en *The Open Civil Engineering Journal* publica: modelamiento de procesos de carbonatación en materiales de cemento, dicho estudio lo efectuó preparando muestras de mortero de cemento y pasta de cemento a las que sometió a carbonatación acelerada a 20°C , 65% de humedad relativa, 20% ó 50% de concentración de CO_2 . La profundidad de carbonatación se determinó usando la prueba clásica de fenolftaleína. Se hizo el análisis termogravimétrico. Obteniéndose diferentes factores que influyen en el proceso de carbonatación, tales como: concentración de CO_2 , tipo de material, exposición superficial al CO_2 , porosidad accesible al agua, duración de la carbonatación. En base a los resultados experimentales, se desarrolló una simulación numérica para predecir la profundidad de carbonatación.

Iloro, Sota, & Ortega (2013) en Brasil en el IX International Congress on Pathology and Repair of Structures presentaron el estudio: Carbonatación acelerada de morteros: Influencia de las adiciones minerales y la edad de curado. En el trabajo evaluaron la influencia de las adiciones minerales y la edad de curado en la cinética del proceso de carbonatación de morteros de igual razón a/c, lo realizaron en una cámara de carbonatación acelerada, donde se mantuvieron constantes la humedad, la temperatura y la concentración de CO_2 (40 000 ppm); concluyendo que: Las resistencias a compresión de todos los morteros se han incrementado con la edad de curado. El mortero patrón presento mayor volumen de material carbonatable y consecuentemente la menor profundidad de carbonatación mientras que los otros morteros

con reemplazo de adiciones han presentado mayores profundidades en concordancia con el volumen de material carbonatable.

Fridh & Lars-olof (2014) en Suecia en la XIII Conference on Durability of Building Materials and Components presentaron: Modelo y técnica para determinar el grado de carbonatación. Este artículo propone y demuestra una técnica de medición junto con un modelo de carbonatación. El modelo revela la importancia de determinar el grado de carbonatación como un límite móvil donde la tasa depende de la cantidad de CO₂ en el aire, el coeficiente de difusión de CO₂ en el concreto carbonatado y la cantidad de CaO que puede ser gaseado. El grado de carbonatación se obtiene mediante la disolución de hormigón en HCl y controlando el aumento de presión que genera la liberación de CO₂. Esta presión luego se traduce a través de curvas de calibración a un contenido de CaCO₃. El líquido se analiza con respecto al contenido de calcio y el grado de carbonatación siendo esta la relación de CaCO₃ a Ca. Con esta información, es posible calcular la cantidad de absorción de CO₂ y el progreso de carbonatación en el concreto. Concluyendo que es una tarea muy importante poder evaluar todos los impactos ambientales del concreto. Cuantificar la absorción de CO₂ es uno. Para poder hacerlo, es transcendental determinar el grado y profundidad de carbonatación, ello evaluando la sección delgada de fenolftaleína es posible determinar un grado de perfil de carbonatación para la capa carbonatada y el modelo propuesto es una forma de lograr eso.

Jiménez & Moreno (2015) en México en la Conferencia de Patología presentaron el estudio de carbonatación acelerada en concretos con agregados reciclados de alta absorción, en el que mencionan que las principales causas de deterioro del concreto estructural, se debe a la reacción entre los productos de hidratación de la pasta de cemento y el dióxido de carbono presente en la atmósfera, lo que reduce los valores de pH en la solución dando lugar a la corrosión de las barras de acero de refuerzo, ello conlleva a la reducción de la vida de servicio de la estructura. El estudio lo efectuaron con 3 probetas cilíndricas de 7,5 cm de diámetro x 15 cm de

altura, por cada tipo de concreto. Las probetas fueron sometidas a un proceso de curado húmedo por inmersión durante un período de 28 días. Después de ese lapso, se dejaron secar al ambiente de laboratorio durante 6 meses, al término del cual, fueron cubiertas con una capa de pintura epóxica en las caras superior e inferior para inducir un flujo radial al ser sometidas a la acción de los gases en el interior de la cámara de aceleración. Concluyen que la resistencia a la carbonatación de los concretos disminuye al aumentar el porcentaje de reemplazo del agregado grueso normal por agregado grueso reciclado; los concretos con 0,5 en relación a/c y hasta 75% de reemplazo del agregado grueso normal por reciclado tuvieron una resistencia moderada a la carbonatación.

Czarnecki & Woyciechowski (2015) en el Bulletin of the Polish Academy of Sciences: el estudio: La carbonatación es un proceso ilimitado en el tiempo y restringido en el espacio, cuyo objetivo fue modelar matemáticamente el proceso de carbonatación que se ha basado en los resultados de investigaciones realizadas tanto en condiciones aceleradas como naturales, sus procesos y efectos, se formuló el modelo hiperbólico de carbonatación, que describió el progreso de la carbonatación como proceso ilimitado en el tiempo pero con rango restringido en profundidad concreta está limitado por el valor de un asíntota del modelo. Los resultados confirmaron estadísticamente que el modelo hiperbólico ($h = a_1 \times (w/c) + b \times t^{-0.5} + a_2 \times t_{ec}$) es un enfoque bien fundamentado.

Poonkuzhali & Kannan (2016) en la India en la International Journal of Science and Research (IJSR) publicaron el estudio experimental: Carbonatación del concreto con inducción de CO₂ en diferentes cantidades. Indicando que la alcalinidad del hormigón protege las barras de refuerzo de la corrosión, pero el fenómeno de carbonatación contribuye significativamente a la destrucción de su revestimiento pasivo, que favorece el inicio de la corrosión. Después de 28 días de curado, se colocaron muestras en la cámara con suministro de gas de dióxido de carbono, durante dos duraciones diferentes de 145 horas y 290 horas. Luego, las muestras se cortaron a 1

cm, 2 cm y 3 cm, respectivamente, de la superficie de hormigón y se trituraron, se pulverizaron, se tamizaron con un tamiz de 90 μm y el polvo que pasó a través del tamiz de 90 μm . La profundidad de carbonatación se ha analizado utilizando el indicador de fenolftaleína y la técnica infrarroja de transformación de Fourier usando espectroscopía infrarroja. Concluyendo que el aumento de las emisiones atmosféricas de dióxido de carbono aumentará la tasa de carbonatación en las estructuras de hormigón armado. En general, el dióxido de carbono presente en la atmósfera penetra en el concreto y lo carboniza y reduce su alcalinidad. A medida que el valor del pH del concreto disminuye, la capa protectora se destruye y el acero comienza a corroerse.

Van, Bonnet, Senga, & Ventura (2017) en Francia publicaron el artículo científico: Nuevo meta-modelo para determinación de la profundidad de carbonatación, en el que describen la importancia del estudio de los procesos de carbonatación en cuanto a la durabilidad y la vida útil de las nuevas estructuras de hormigón, su correcta comprensión y cuantificación son esenciales para los trabajos de mantenimiento y reparación de las estructuras existentes. Dicho documento presenta inicialmente un nuevo metamodelo desarrollado para calcular la profundidad del frente de carbonatación basado en la solución analítica de la primera ley de Fick. Los únicos datos de entrada requeridos por este modelo no numérico son: variables de material (diseño de mezcla de hormigón, tamaño nominal máximo agregado, tipo de cemento y composición química del tipo de cemento y densidad del cemento); parámetros tecnológicos (período de curado inicial (t_c)); parámetros ambientales (temperatura ambiente (T), humedad relativa externa (RH) y concentración de CO_2 en el aire ($[\text{CO}_2]_{\text{ext}}$)). El metamodelo presentado lo validaron utilizando datos experimentales de elementos de concreto expuestos a condiciones de exposición a la carbonatación natural a corto y largo plazo, diferentes tipos de cemento CEM I, CEM II, CEM III y aditivos CEM I (cenizas volantes (FA)) con diversas relaciones de agua a cemento (a/a) y tiempo de concentración.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. El cemento portland

Es un conglomerante hidráulico, obtenido por la pulverización del Clinker, y sin más adición que la piedra de yeso natural, en un porcentaje no superior al 5%, para retrasar el fraguado de los silicatos y aluminatos anhidros, que forman el Clinker. Su color es gris, más o menos oscuro, según la cantidad de óxido férrico: *Cemento Portland = Clinker Portland + Yeso* (Rivva, 2000)

2.2.2. Clasificación del cemento portland

La totalidad de los cementos empleados en el Perú son cementos portland (Magzoub, 1994) o cementos combinados (ASTM-C-595/C595M-18, 2018).

De acuerdo a lo recomendado por la Norma (Magzoub, 1994), los cinco tipos de cementos portland normal que pueden ser clasificados como estándar y cuya fabricación está normada por requisitos específicos son:

Tipo I. De uso general, donde no se requiere propiedades especiales.

Tipo II. De moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación. Especialmente adecuados para ser empleados en estructuras en ambientes agresivos y/o vaciados masivos.

Tipo III. De desarrollo rápido de resistencia con elevado calor de hidratación. Especiales para uso en los casos en que se necesita adelantar la puesta en servicios de las estructuras, o para uso en climas fríos.

Tipo IV. De bajo calor de hidratación, recomendables para concretos masivos.

Tipo V. Recomendables para ambientes muy agresivos por su alta resistencia a los sulfatos.

Los denominados «cementos adicionados» son mezclas de cemento y un material de características puzolánicas molidos en forma conjunta. En Perú se fabrican los Tipo IP, IPM, IS y ISM.

Tabla 1. Fabricación de cementos en el Perú

Nombre	Ubicación
Cementos Lima S.A.	Atocongo – Lima
Cementos Pacasmayo	Pacasmayo – La Libertad
Cemento Andino S.A.	Condorcocha – Tarma (Junín)
Yura S.A.	Yura – Arequipa
Cemento Sur S.A.	Caracote – Juliaca (Puno)
Cemento Rioja	Pucallpa – Ucayali
Cemento Inca S.A.	Lurigancho – Lima
Cemento Mochica S.R.L	Trujillo – La Libertad

Fuente: La Industria del Cemento en el Perú (Gonzáles, 2012)

2.2.3. Características físicas y químicas del cemento portland tipo I

2.2.3.1. Peso específico del cemento Portland

El peso específico del cemento corresponde al material en estado compacto. Su valor suele variar, para los cementos portland normales, entre 3,0 y 3,2. Las Normas Norteamericanas consideran un valor promedio de 3,15 y las Normas Alemanas e inglesas un valor promedio de 3,12. En el caso de los cementos combinados el valor es menor de 3,0 y depende de la fineza del material adicionado. Su determinación es particularmente necesaria en relación con el control y diseño de las mezclas de concreto. Según recomendaciones de la Norma (ASTM-C-188-95, 2003)

2.2.3.2. Fineza del cemento Portland

La fineza de un cemento es función del grado de molienda del mismo y se expresa por su superficie específica, la cual es definida como el área superficial total, expresada en centímetros cuadrados, de todas las partículas contenidas en un gramo de cemento. Se asume que todas las partículas tienen un perfil esférico.

La importancia de la fineza del cemento radica en: influencia que puede tener sobre la velocidad de hidratación, la resistencia inicial y el calor generado (Rivva, 2000).

2.2.3.3. Resistencias mecánicas

La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad física que define la capacidad del mismo para soportar esfuerzos sin falla y normalmente se emplea como uno de los criterios de aceptación por ser la más requerida desde el punto de vista estructural.

Por tanto no es sorprendente que los ensayos de resistencia sean prescritos en todas las especificaciones de cementos.

La resistencia de un cemento es función de su fineza, composición química, porcentaje de compuestos, grado de hidratación, así como del contenido de agua de la pasta. La velocidad de desarrollo de la resistencia es mayor durante el período inicial de endurecimiento y tiende a disminuir gradualmente en el tiempo. El valor de la resistencia a los 28 días se considera como la resistencia del cemento (Rivva, 2000).

2.2.4. Los agregados para el concreto

Se define como agregado al conjunto de partículas inorgánicas, de origen natural o artificial, cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados en la Norma NTP 400.011. Los agregados son la fase discontinua del concreto. Ellos son materiales que están embebidos en la pasta y ocupan entre el 62% y el 78% de la unidad cúbica del concreto.

Un adecuado conocimiento de la naturaleza física y química del concreto, así como del comportamiento de este, implica necesariamente el de los materiales que conforman la corteza terrestre, estudiados a la luz de la geología y, específicamente, de la petrología (Rivva, 2000).

2.2.4.1. Clasificación de los agregados

El agregado empleado en la preparación del concreto se clasifica en agregado fino, agregado grueso y hormigón, conocido este último como agregado integral.

Se define como agregado fino a aquel, proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas, que pasa el Tamiz de $\frac{3}{8}$ " y queda retenido en el tamiz N° 200.

El más usual de los agregados finos es la arena, definida como el producto resultante de la desintegración natural de las rocas.

Se define como agregado grueso a aquel que queda retenido en el tamiz N° 4 y es proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas. El agregado grueso suele clasificarse en grava y piedra triturada o chancada. La grava es el agregado grueso proveniente de la disgregación y abrasión natural de materiales pétreos. Se le encuentra generalmente en canteras y lechos de ríos depositado en forma natural. La piedra chancada, o piedra triturada, es el agregado grueso obtenido por trituración artificial de rocas y gravas (Rivva, 2000).

2.2.4.2. Funciones del agregado

Las tres principales funciones del agregado en el concreto son:

- a. Proporcionar un relleno adecuado a la pasta, reduciendo el contenido de esta por unidad de volumen y, por lo tanto, reduciendo el costo de la unidad cúbica de concreto.
- b. Proporcionar una masa de partículas capaz de resistir las acciones mecánicas, de desgaste, o de intemperismo, que puedan actuar sobre el concreto.
- c. Reducir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado y endurecimiento; de humedecimiento y secado; o de calentamiento de la pasta (Rivva, 2000).

2.2.4.3. Interacción agregado – concreto

Las propiedades del concreto resultante dependen de:

- a. La composición mineral de las partículas de agregado, la cual influye fundamentalmente sobre la resistencia, durabilidad y elasticidad del concreto.

- b. Las características superficiales de las partículas, las cuales influyen especialmente sobre la trabajabilidad, fluidez y consistencia del concreto; así como sobre la adherencia entre la pasta y el agregado.
- c. La granulometría de los agregados fino y grueso, definida por sí misma, así como por la superficie específica, módulo de fineza, y tamaño máximo del agregado grueso. Estas propiedades influyen fundamentalmente sobre las propiedades del concreto al estado no endurecido, sobre su densidad y la economía de la mezcla.
- d. El volumen de agregado por unidad de volumen del concreto, el cual influye especialmente en los cambios de volumen debidos a los procesos de humedecimiento y secado; a los procesos de calentamiento y enfriamiento; así como en el costo de la unidad cúbica de concreto.
- e. La porosidad y absorción del agregado, las cuales influyen sobre la relación agua/cemento efectiva, así como sobre las propiedades del concreto al estado no endurecido (Rivva, 2000).

2.2.5. Propiedades del concreto en estado endurecido

2.2.5.1. Peso unitario del concreto

El peso unitario del concreto es el peso varillado de una muestra representativa del concreto. Se expresa en kilos por metro cúbico.

La gravedad específica y la cantidad de cada agregado deberán afectar el peso unitario resultante de la mezcla fresca. Con agregados de alta porosidad el peso unitario del concreto puede variar dependiendo de si la absorción ha sido satisfecha por pre humedecimiento del agregado antes de la dosificación.

El peso unitario de los concretos livianos, preparados ya sea con agregado grueso natural o artificial de baja gravedad específica puede estar en valores de 480 a 1600

kg/m³. El peso unitario de los concretos pesados, preparados ya sea con agregado grueso natural o artificial de alta gravedad específica, puede elevarse hasta los 5,000 kg/m³ (Rivva, 2000).

2.2.5.2. Resistencia a compresión

La resistencia del concreto es definida como el máximo esfuerzo que puede ser soportado por dicho material sin romperse. Dado que el concreto está destinado principalmente a tomar esfuerzos de compresión, es la medida de su resistencia a dichos esfuerzos la que se utiliza como índice de su calidad (Rivva, 1992).

Notaciones:

f'c: Resistencia en compresión especificada del concreto (kg/cm²)

f'cr: Resistencia en compresión promedio requerida (kg/cm²)

2.2.5.3. Módulo de elasticidad del concreto

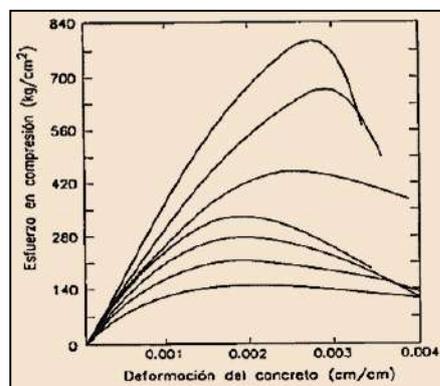
El módulo de elasticidad del concreto depende del módulo de elasticidad y relación de Poisson del agregado. Tanto en compresión como en tensión la curva esfuerzo-deformación para las rocas tiene una relación prácticamente lineal, indicando que el agregado es razonablemente elástico. Por otra parte, el mortero tiene una relación esfuerzo-deformación curvada cuando los esfuerzos exceden del 30% de la resistencia última. Ello es debido al comportamiento no lineal de la pasta y a la formación de grietas de adherencia y deslizamiento en la interface agregado-pasta. Debido a ello no hay una relación simple entre los módulos de elasticidad del concreto y el agregado.

Las investigaciones han permitido determinar que el módulo de elasticidad del concreto es una función del módulo de elasticidad de sus constituyentes y que, para una pasta dada, el módulo de elasticidad del agregado tiene un efecto menor sobre el módulo de elasticidad del concreto que aquel que puede ser estimado a partir de las proporciones volumétricas del agregado en el concreto.

En general, conforme el módulo de elasticidad del agregado se incrementa ocurre lo mismo con el del concreto, por lo que conforme el volumen de agregado se acrecienta el módulo de elasticidad del concreto deberá aproximarse al del agregado. En general se recomienda que cuando el módulo de elasticidad del concreto puede ser conocido en forma bastante segura, se realicen ensayos en concreto en vez de calcular el módulo de elasticidad a partir de las propiedades del agregado (Rivva, 2000).

2.2.5.4. Relación de esfuerzo-deformación del esfuerzo a compresión

En la Figura 1., se muestran curvas esfuerzo-deformación para concretos normales de diversas resistencias a la compresión. Las gráficas tienen una rama ascendente casi lineal cuya pendiente varía de acuerdo a la resistencia y se extiende hasta aproximadamente $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{2}$ del f_c . Posteriormente adoptan la forma de una parábola invertida cuyo vértice corresponde al esfuerzo máximo en compresión. La deformación correspondiente a este punto es mayor para los concretos más resistentes. Sin embargo, para los de menor resistencia es casi constante e igual 0,002. La rama descendente de las gráficas tiene una longitud y pendiente que varía de acuerdo al tipo de concreto. Para concretos de resistencias bajas tiende a tener menor pendiente y mayor longitud que para concretos de resistencias mayores. Se deduce que los concretos menos resistentes son los más dúctiles (Harmsen, 2002).



*Figura 1. Curva esfuerzo – deformación del concreto en compresión.
Fuente: Diseño de estructuras de concreto armado (Harmsen 2002).*

La curva esfuerzo-deformación del concreto varía de acuerdo a la velocidad de aplicación de la carga como se muestra en la Figura 2, Si ésta se incrementa a un ritmo mayor, la resistencia máxima obtenida es mayor que si la carga se incrementa a razón menor. Este efecto debe tenerse presente cuando se analice los resultados de las pruebas estándar elaboradas en el laboratorio (Harmsen, 2002)

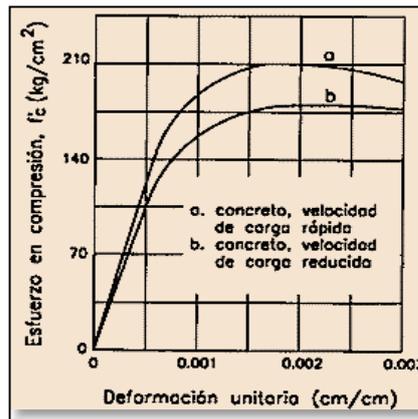


Figura 2. Efecto de la velocidad de carga en la resistencia a la compresión del concreto
Fuente: Diseño de estructuras de concreto armado (Harmsen 2002)

El módulo de elasticidad de un material es un parámetro que mide la variación de esfuerzo en relación a la deformación en el rango elástico. Es función del ángulo de la línea esfuerzo – deformación y es una medida de la rigidez o resistencia a la deformación de dicho material.

El concreto presenta un comportamiento elastoplástico y por ello los esfuerzos no son directamente proporcionales a la deformación. Por lo anterior, ha sido necesario definir términos como módulo secante y módulo tangente en un intento por convenir un valor para el módulo de elasticidad del concreto.

El módulo tangente se define como la pendiente de la recta tangente a la curva esfuerzo-deformación en un punto de ella. En particular, el módulo tangente que corresponde al esfuerzo nulo se denomina módulo tangente inicial. La determinación de este parámetro es difícil pues la recta tangente en el origen no está bien definida. Por su parte, el módulo secante es la pendiente de una recta secante a la curva, que une

el punto de esfuerzo cero con otro cualquiera de la curva. El módulo secante es más fácil de determinar que el módulo tangente, por ello, es más utilizado la Fig. 3. (Harmsen, 2002)

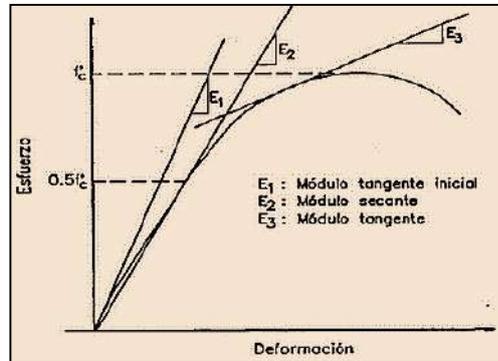


Figura 3. Módulo tangente y secante del concreto.
Fuente: Diseño de estructuras de concreto armado (Harmse. 2002)

Para definir el módulo de elasticidad del concreto, el ACI emplea el concepto de módulo secante y propone en el (ACI-318S-08, 2014).

$$E_c: 0,14 \times w^{1,5} \sqrt{f'_c} \quad \text{Donde:}$$

E_c : Módulo de elasticidad del concreto (kg/cm^2)

W : Peso unitario del concreto (kg/m^3), solo para valores entre 1 440 y 2 480 kg/m^3

f'_c : Resistencia a compresión del concreto (kg/cm^2)

Para Concreto de peso normal el módulo de elasticidad E_c se puede considerar como:

$$E_c[\text{kg/cm}^2] = 15000 \sqrt{f'_c}$$

2.2.6. Proceso de la Carbonatación

Los hidróxidos de calcio, sodio y potasio, disueltos en el componente acuoso del concreto, son los responsables del elevado pH que actúa como protector del acero, y es cuando el CO_2 penetra en el concreto que se produce una reacción entre los hidróxidos de la fase líquida intersticial y los compuestos hidratados del cemento, de tal manera que cuando todo el Ca

(OH)₂, Na(OH) y K(OH) presente en los poros ha sido carbonatado, el pH empieza a decrecer, dando como resultado un medio ácido que produce un constante y progresivo efecto corrosivo en el acero.

Cuando el valor del pH llega a niveles inferiores a 9,5 la alcalinidad del concreto ya no es suficiente para mantener pasiva la capa de óxido protectora de las armaduras de acero. Esto provoca que, ante la presencia de la humedad y del oxígeno, se active la corrosión de las armaduras embebidas en el concreto.

El concreto en estas condiciones de precariedad alcalina se conoce como “Concreto carbonatado”, que en estudios efectuados lo llaman cáncer del concreto.

Las posibilidades de cantidades excesivas de la carbonatación en el concreto están en relación directa al tiempo y la profundidad. Es por ello que el espesor del recubrimiento de las armaduras de acero es un factor determinante ante estas variables (Montani, 2000).

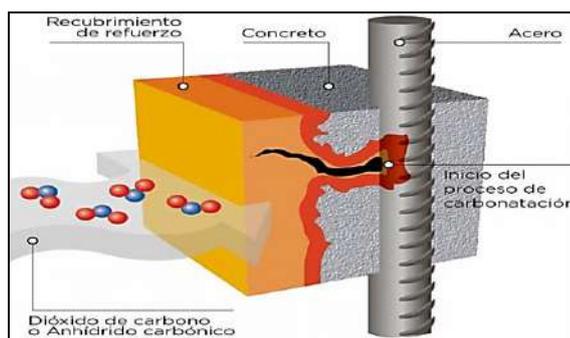


Figura 4. Proceso de carbonatación.

Fuente: El Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (Montani, 2000)

Se puede estimar la profundidad de carbonatación mediante la siguiente fórmula:

$$X = K \sqrt{T} \quad \text{Donde:}$$

X : Profundidad de carbonatación (mm).

T : Edad del elemento de estudio (años).

K : Coeficiente que depende de la humedad relativa:

$$K = 72 \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{f'c}{10}}} \right) - 0,126$$

2.2.7. Estándares de control de concreto en resistencia a compresión

El comité (ACI-214-77, 1989), propone la tabla 2 donde se dan los estándares del control del concreto mediante los resultados de desviación estándar, considerando si las operaciones fueron realizadas en construcciones en general o ensayos de laboratorio. Se realizó el análisis estándar de control del concreto para los resultados de resistencia a compresión a la edad de 28 días.

Tabla 2. Estándares para el control del concreto.

Clase de operación	Desviación estándar para los diferentes estándares de control. (kg/cm ²)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
Construcción en general	Menos de 28,1	28,1 a 35,2	35,2 a 42,2	42,2 a 49,2	Más de 49,2
Ensayos en laboratorio	Menos de 14,1	14,1 a 17,6	1,6 a 21,1	21, a 24,6	Más de 24,6

Clase de operación	Coeficiente de Variación, en Porcentaje				
	Excelente	Muy buena	Buena	Regular	Mala
Pruebas en campo	< 3	3 – 4	4 – 5	5 – 6	> 6
Ensayo en laboratorio	< 2	2 – 3	3 – 4	4 – 5	> 5

Fuente: (ACI-214-77, 1989)

De acuerdo a lo dispuesto (NTE-060, 2009); cuando se dispone de menos de 30 ensayos, pero con un mínimo de 15, la desviación estándar de la muestra calculada se incrementa por el factor indicado en la Tabla 3. Este procedimiento da como resultado una resistencia promedio requerida más conservadora (mayor). Los factores de la Tabla 3, están basados en la distribución de muestreo de la desviación estándar de la muestra y proporcionan una protección (equivalente a la del registro de 30 ensayos) contra la posibilidad de que la muestra reducida subestime la verdadera desviación estándar de la población.

$$S_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{X})^2 + (x_2 - \bar{X})^2 + \dots + (x_n - \bar{X})^2}{n-1}}, \text{ donde:}$$

S_s = desviación estándar de la muestra.

X_i = ensayo individual de resistencia.

\bar{X} = promedio de n resultados de ensayos de resistencia.

n = número de ensayos consecutivos de resistencia.

Tabla 3. Factores de modificación para la desviación estándar.

Número de testigos	Factor de Corrección
Menos de 15	Ver tabla 4
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 a mas	1,00

Fuente: Norma técnica de edificación (NTE-060, 2009)

Tabla 4. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
MPa $f'c < 21$	$f'cr = f'c + 7,0$
$21 \leq f'c \leq 35$	$f'cr = f'c + 8,5$
$f'c > 35$	$f'cr = 1,1 f'c + 5,0$

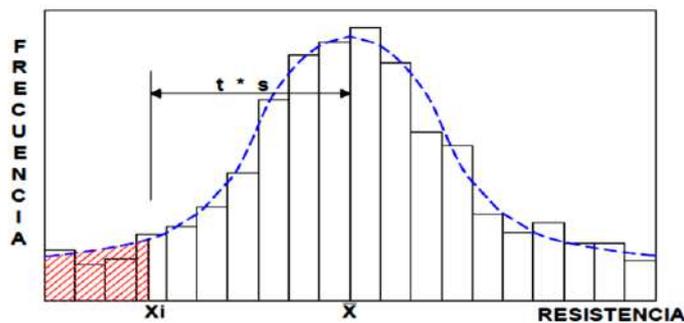
Fuente: Norma técnica de edificación (NTE-060, 2009)

2.2.8. Estudio estadístico

Lo que prima es el criterio estadístico sobre el grupo y no un valor individual, que estadísticamente no permite concluir nada. (Pasquel, 1993)

Se ha comprobado que los resultados de los ensayos de resistencia de una misma mezcla, se agrupan siguiendo una curva de distribución normal de frecuencias (distribución de Gauss o campana de Gauss). Lo anterior ha conducido a la presentación de procedimientos estadísticos sencillos, con base en los cuales se han fijado normas para la producción y aceptación de mezclas de concreto (Rivera, 2015)

Figura 5. Curva de distribución normal.



Fuente: Concreto Simple (Rivera, 2015)

De lo anterior podemos definir entonces la ecuación general de la curva de distribución normal.

$$\bar{X} = Xi + t * S$$

La ecuación de la curva de distribución normal también se puede expresar como:

$$\bar{X} = \frac{Xi}{1 - \frac{t * V}{100}}$$

En la siguiente tabla se muestran valores típicos del coeficiente de variación (V) y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto, bajo diferentes condiciones de producción.

Tabla 5. Coeficiente de variación y grado de uniformidad en el concreto

V (%)	UNIFORMIDAD DEL CONCRETO	CONDICIONES FRECUENTES EN QUE SE OBTIENE
0 – 5	Excelente	Condiciones de laboratorio.
5 – 10	Muy bueno	Preciso control de materiales y dosificación por masa.
10 – 15	Bueno	Buen control de materiales y dosificación por masa.
15 – 20	Mediano	Algún control de materiales y dosificación por masa.
20 – 25	Malo	Algún control de materiales y dosificación por volumen.
> 25	Muy malo	Ningún control de materiales y dosificación por volumen.

Fuente: Concreto Simple (Rivera, 2015)

2.2.8.1. Estudio estadístico del comportamiento mecánico del concreto

Los métodos estadísticos son aquellos que sirven para obtener conclusiones acerca de poblaciones a partir de muestras. Cuando se estudia una población, el interés se centra generalmente en una sola característica de los miembros de la población. Tal característica puede ser una variable continua, o una variable discreta. El término variable continua se aplica a variables capaces de tomar cualquier valor dentro de un intervalo de valores, la resistencia a la compresión es una variable continua, por esta razón, se empleará como distribución de frecuencia la distribución normal. Una propiedad muy importante de la curva normal es que su localización y forma quedan completamente determinadas por los valores de μ y σ . El primero establece el centro de la curva y el segundo, la dispersión de sus valores (Dicovski, 2012).

El área bajo la curva normal representa la frecuencia o probabilidad de ocurrencia. Para el desarrollo de esta investigación la probabilidad de encontrar resultados de los

ensayos entre los límites $(\mu-\sigma)$ y $(\mu+\sigma)$ es de aproximadamente 95% y la probabilidad de encontrar una fracción defectuosa es del 5%. Cabe destacar que muchas de las propiedades de los materiales, y en particular la resistencia a la compresión del concreto, no se distribuyen estrictamente según una curva normal; sin embargo, las diferencias son relativamente pequeñas y quedan ampliamente compensadas por la ventaja de emplear la distribución normal (Dicovski, 2012).

2.2.8.2. Prueba de ajuste a una distribución normal

La distribución normal es un modelo teórico desarrollado por el matemático Abraham de Moivre en 1773, y que comúnmente es aproximado en fenómenos naturales que generan variables aleatorias y continuas. Esta representa la distribución de frecuencias de una población de valores que hoy conocemos como curva normal, la cual tiene forma de una campana simétrica (Dicovski, 2012).

Para poder aceptar que los valores de la muestra para la mezcla de concreto, se ajustan a una distribución normal es necesario que se cumplan los parámetros estadísticos, el coeficiente de normalidad (P), debe encontrarse entre 0,05 y 1 para aceptar la estimación con un 95% de confiabilidad y el estadístico de contraste (W), debe ser lo más cercano a 1 pero mayor de 0,05 (Dicovski, 2012).

2.2.8.3. Variable aleatoria “Z”

Una vez comprobado que los datos de las muestras se ajustan a una distribución normal, la variable aleatoria normal que es la resistencia a la compresión de los cilindros, se estandarizará a una variable aleatoria tipificada denominada Z. Un tipo de distribución normal especial es la distribución normal tipificada (0,1), simbolizada con la letra “Z”. Esta distribución se usa mucho en pruebas de hipótesis ya que cualquier dato “Xi” de una variable normal (μ, σ) se puede convertir en dato “Zi” de una variable normal tipificada con la siguiente transformación: (Dicovski, 2012)

$$Z_i = \frac{X_i - \mu}{\sigma} \quad \text{Donde:}$$

X_i : valor dentro de un conjunto de datos (resistencia a la compresión).

μ : es la media del conjunto de datos.

σ : desviación estándar del conjunto de datos.

Generalmente para el estudio de este tipo de variables se escoge un valor de significancia del 5% debido a los errores en el laboratorio, es decir el 95% de probabilidad de ocurrencia (área bajo la curva normal) en donde métodos matemáticos avanzados han demostrado que el 95% del área total bajo la curva normal se encuentra en el intervalo $\mu - 2\sigma$ y $\mu + 2\sigma$, es decir, entre $Z = -2$ y $Z = 2$ (Dicovski, 2012).

La probabilidad de ocurrencia del 95% denota que en el intervalo $-2\sigma \leq Z \leq 2\sigma$ la probabilidad de que la media de la población (μ) se encuentre presente es del 95% en donde los valores que se encuentren fuera de este rango se considerarán datos atípicos o fracción defectuosa. La mayoría de las observaciones de un conjunto de datos están a menos de dos desviaciones estándar de la media, por lo que Z presenta resultados menores a 2, es decir el estadístico Z es mayor o igual a dos en valor absoluto el punto se encuentra fuera del intervalo considerado y debe ser rechazado (Dicovski, 2012).

2.2.8.4. Estadística descriptiva

Usualmente el investigador busca, en primer término, describir sus datos y posteriormente efectuar análisis estadísticos para relacionar sus variables; es decir, realiza análisis de estadística descriptiva para cada una de sus variables y luego describe la relación entre éstas (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010), en la investigación se determinaron: media; desviación estándar; coeficiente de variación; de acuerdo a lo descrito por (Dicovski, 2012) con el uso del programa statgraphics.

2.2.9. Fórmulas a para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados para el concreto

a) *Materiales más finos que pasan por el tamiz N° 200*

$$A = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1} \times 100 \quad (\text{Rivva, 2000}).$$

Donde:

A = Porcentaje del material más fino que pasa por el tamiz normalizado de μm (N° 200) por vía húmeda.

P_1 = Masa seca de la muestra original (g).

P_2 = Masa seca de la muestra luego del lavado (g) (Rivva, 2000).

b) *Gravedad específica y absorción del agregado grueso*

Gravedad específica en estado seco al horno.

$$\text{Gravedad específica en estado seco al horno} = \frac{A}{(B - C)}$$

Gravedad específica en estado saturado superficialmente seco:

$$\text{Gravedad Específica en estado saturado superficialmente seco} = \frac{B}{(B - C)}$$

Gravedad específica aparente:

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{(A - C)}$$

Absorción:

$$\text{Absorción \%} = \left[\frac{(B - A)}{A} \right] \times 100, \text{ donde:}$$

A = masa de la muestra secada al horno en el aire (g).

B = masa de la muestra de ensayo de superficie saturada seca al aire (g).

C = masa aparente de la muestra de ensayo saturada en agua (g) (Rivva, 2000).

c) *Determinación de la gravedad específica y absorción del agregado fino*

Gravedad específica del agregado en estado seco al horno:

$$\text{Gravedad específica en estado seco al horno} = \frac{A}{(B + S - C)}$$

Gravedad específica en estado saturado superficialmente seco: Gravedad específica sobre la base del agregado de superficie seca saturada:

$$\text{Gravedad específica en estado saturado Superficialmente seco} = \frac{S}{(B + S - C)}$$

Gravedad específica aparente:

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{(B + A - C)}$$

Absorción:

$$\text{Absorción \%} = \left[\frac{(S-A)}{A} \right] \times 100, \text{ donde:}$$

A = masa de la muestra secada al horno (g).

B = masa del picnómetro llenado de agua hasta la marca de calibración (g).

C = masa del picnómetro lleno de muestra y el agua hasta la marca de calibración (g).

S = masa de la muestra saturada superficialmente seca (g).

El peso específico, gravedad específica o densidad (según el Sistema Internacional de unidades) es el indicador de calidad de los agregados, valores elevados corresponden a materiales de buen comportamiento mientras que para valores bajos corresponden a agregados absorbentes y débiles. (Rivva, 2000).

d) Resistencia a compresión en especímenes cilíndricos de concreto.

$$\text{Resistencia} = \left[\frac{(P)}{A} \right], \text{ donde:}$$

P = carga aplicada al espécimen de concreto (Kg).

A = área promedio del espécimen de concreto (m²) (Rivva, 2000).

Capítulo III

Materiales y métodos

3.1. Materiales, equipos y herramientas

3.1.1. Materiales

- Agregados finos (arena limpia de río).
- Aceite.
- Agregado grueso (piedra chancada de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{3}{4}$ ").
- Agua.
- Alcohol etílico
- Cemento Portland Tipo I.
- Fenolftaleína.

3.1.2. Equipos

- Balanzas electrónicas de 30 kg de capacidad y aproximación 0.1gr.
- Cámara fotográfica y de filmación.
- Cronómetro.
- Deflectómetro.
- Juego de mallas para tamizar agregado fino y grueso (1", 3/4", 1/2", 3/8", N°s: 8, 16, 30, 50, 100, 200 y cazoleta)
- Máquina de ensayo a compresión universal (Prensa hidráulica).
- Máquina de Los Ángeles.
- Mezcladora, trompo mezclador eléctrico de 6 pie³ de capacidad.
- Picnómetro, pipetas graduadas de 500 ml.

3.1.3. Herramientas

- Herramientas Manuales: palanas, carretilla, baldes, espátulas, plancha de pulir y de batir, cucharones, reglas, wincha, depósitos, bandejas.
- Cono y pisón para arena, fiola de 500 ml, probeta graduada de 500 ml, canastillas o cestas de alambre.
- Mazo con cabeza de hule, de peso aproximado a 0,6 Kg.

- Moldes metálicos de 6” de diámetro y 12” de altura, varilla de acero, placa de vidrio, espátula, cucharón, badilejo, combo o mazo de goma, cono de Abrams.
- Estufa de 105 °C
- Moto lineal.
- Tanque de 1 100 litros.
- Platillos cabezales con discos de neopreno.
- Pulverizador de mano.
- Varilla de acero liso, con un extremo redondeado diámetro 16 mm y longitud 600 mm
- Vernier.

3.2. Metodología

3.2.1. Ubicación

La investigación se realizó en el Laboratorio de Ensayo de Materiales “Carlos Esparza Díaz”, edificio 1C de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, ubicada en la Av. Atahualpa N°1050.

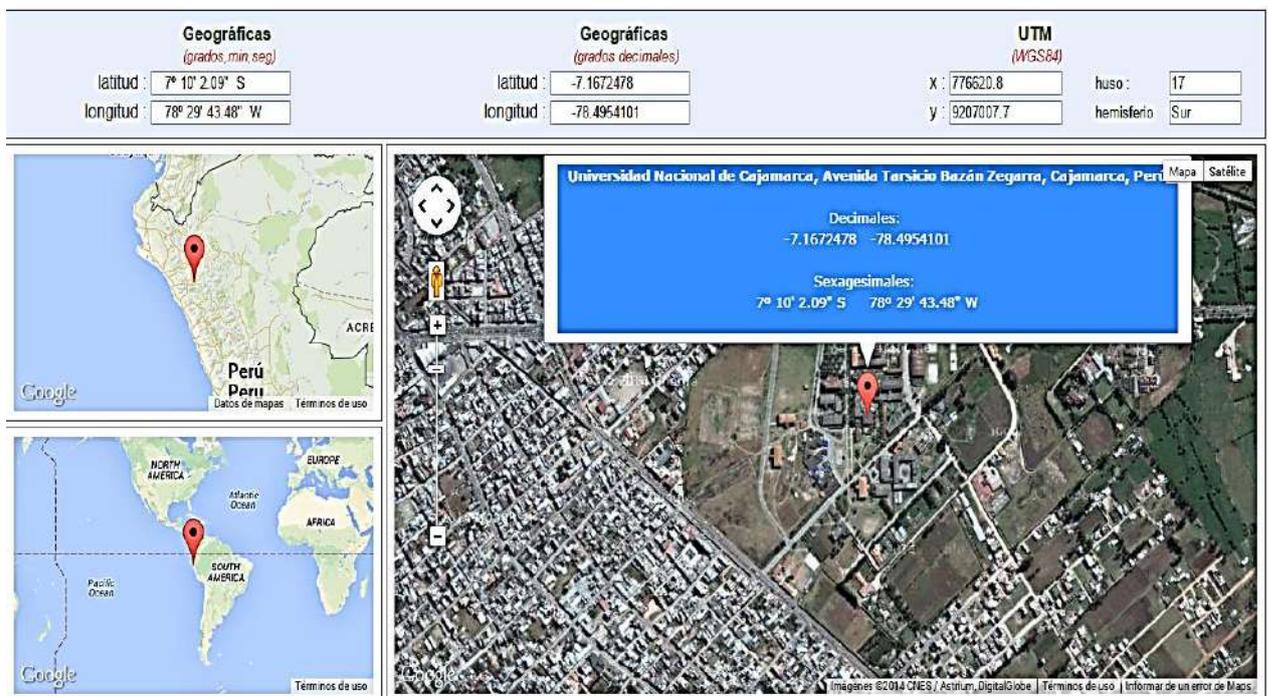


Figura 6. Fotografía satelital de la ubicación de la investigación
Fuente (<http://www.mundivideo.com/coordenadas.htm>, 2017)

3.2.2. Procedimiento

Para la contrastación de la hipótesis de investigación experimental, se elaboraron especímenes de concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Para ello se eligió una cantera de producción de agregados que comúnmente es utilizada para la elaboración de concreto en las construcciones en la ciudad de Cajamarca (Cantera Aguilar-Tartar Chico ubicado en el Km 1+100 Carretera Baños del Inca – Otuzco), los que en cantidades adecuadas fueron trasladado al laboratorio de ensayo de materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca para efectuar los estudios preliminares en el orden y metodología siguiente:

- a. *Estudio de las características físicas de los agregados.* Se lo desarrolló de acuerdo a los procedimientos descritos en las normas técnicas siendo: selección de muestras para agregados, contenido de humedad, granulometría, peso específico y absorción de agregados, peso unitario volumétrico de agregados, en los que se realizó 03 ensayos para cada uno de ellos.
- b. *Características de los materiales complementarios para elaboración del concreto.* Se determinó las características tanto del cemento, como del agua, El cemento que se utilizó para realizar la investigación fue cemento portland tipo I de Cementos Pacasmayo S.A. destinado para uso general en la construcción, así como para emplearse en obras que no requieran propiedades especiales y que comúnmente es utilizado. El cemento cumple con los requisitos de las normas (Magzoub, 1994), (NTP-334.090, 2013). Una de las principales propiedades del Cemento Portland tipo I es que presenta mayor resistencia inicial a comparación de otros cementos, así como menor tiempo de fraguado. El agua empleada en la preparación y curado de los testigos de concreto, fue agua potable de la red pública domiciliaria, siendo esta el agua potable de la ciudad de Cajamarca, por lo que se cumplió con los límites máximos y mínimos permisibles descritos en el reglamento de calidad del agua para consumo humano (Minsa, 2011), DS N° 031-2010-SA; con ello

a su vez cumplieron con los requisitos de calidad para la elaboración y curado del concreto de acuerdo al requerimiento de la (NTP-339.088, 2016).

- c. ***Diseño de mezclas.*** Se realizó de acuerdo a procedimientos normados para el método de fineza o combinación de agregados: verificación de requerimientos del concreto considerados para el diseño de mezclas (trabajabilidad, consistencia, resistencia), determinación de la dosificación de materiales para un concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. La selección de los diferentes materiales que componen la mezcla de concreto y de la proporción de cada uno de ellos debe ser siempre el resultado de un acuerdo razonable entre la economía y el cumplimiento de los requisitos que debe satisfacer el concreto tanto en estado fresco como endurecido. (Rivva, 1992). Se elaboró muestras de mezclas de prueba.
- d. ***Elaboración de unidades muestrales.*** Se fabricaron las muestras de acuerdo a lo establecido por la (ASTM-C-39/C39M-03, 2005), para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto los especímenes de ensayo estándar (unidad de análisis), fueron cilindros con dimensiones de 6" de diámetro por 12" de altura con la relación longitud/diámetro = 2, habiéndose previsto la elaboración de un conjunto de 140 unidades, con la muestra intencional por conveniencia en un total de 135 especímenes, esto teniendo en consideración lo especificado por la norma técnica E-060 2009, que en su acápite 5.3.1.1 recomienda que para poseer un conjunto de datos representativos la muestra debe consistir en no menos de 15 ensayos consecutivos, para cada fase en estudio, con lo que se cumple con la validez, el sustento adecuado y rigurosidad científica de los resultados de la investigación. Ello conllevó a elaborar: 05 unidades para elaboración y ajuste del diseño de mezclas del concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, 15 unidades como testigos patrón del concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, 30 de unidades (15 muestras elaboradas con el concreto normal y 15 recubiertas con aditivo durable a la intemperie) expuestas por 30

días al CO₂, luego de haber alcanzado la resistencia requerida, para determinar la resistencia y profundidad de carbonatación. 30 de unidades (15 muestras elaboradas con el concreto normal y 15 recubiertas con aditivo durable a la intemperie) expuestas por 60 días a CO₂, para determinar la resistencia y profundidad de carbonatación. 30 de unidades (15 muestras elaboradas con el concreto normal y 15 recubiertas con aditivo durable a la intemperie) expuestas por 90 días al CO₂, para determinar la resistencia y profundidad de carbonatación. 30 de unidades (15 muestras elaboradas con el concreto normal y 15 recubiertas con aditivo durable a la intemperie) expuestas por 120 días a CO₂, para determinar la resistencia y profundidad de carbonatación. Todas luego de haber alcanzado la resistencia requerida, curado de muestras a los 28 días, el cuadro adjunto ilustra en resumen la población muestral.

Tabla 6. Número de muestras para cada etapa de estudio

NUMERO DE MUESTRAS DE ACUERDO A NTE - 060	MUESTRAS DE DISEÑO	MUESTRAS PATRÓN CURADAS 28 DÍAS	MUESTRAS EXPUESTAS 30 A CO ₂	MUESTRAS EXPUESTAS 60 A CO ₂	MUESTRAS EXPUESTAS 90 A CO ₂	MUESTRAS EXPUESTAS 120 A CO ₂	TOTAL
Concreto f'c=210 kg/cm ²	5 Unid.	15 Unid.	15 Unid.	15 Unid.	15 Unid.	15 Unid.	80 Unid.
Concreto f'c=210 kg/cm ² , recubierto con aditivo durable a la intemperie			15 Unid.	15 Unid.	15 Unid.	15 Unid.	60 Unid.
TOTAL DE MUESTRAS PARA ENSAYO							140 Unid

e. **Carbonatación acelerada del concreto:** Se sometió a proceso de carbonatación acelerada 4 grupos de muestras de acuerdo al tiempo propuesto para el estudio, es decir 30 unidades (15 muestras con el concreto sin aditivo y 15 recubiertas con aditivo durable a la intemperie que para el estudio fue Chema Seal[®]) por cada 30 a días de exposición a CO₂, Dichas muestras luego de haber alcanzado la resistencia requerida a los 28 días, se ingresan a un espacio confinado hermético (tanque), el que estuvo expuesto de manera continua a dióxido de carbono proveniente de la combustión de un derivado del petróleo emitido por un vehículo menor (moto lineal), cuyos valores fueron determinados en el

centro de inspección técnica vehicular El Cumbe SAC. a través de los equipos: analizador de gases HGA 4000 serie 1034 y los Beissbarth.

Los valores de las pruebas de emisiones de gases de la moto lineal que contempla el sistema propuesto en la investigación, tuvo que ajustarse a los requerimientos para este tipo de ensayos, es decir el proceso de carbonatación del concreto acelerada deberá encontrarse en el rango de 3% a 4% (aproximadamente 100 veces mayor que la carbonatación natural) pues en este rango no existe cambio drástico con respecto a la carbonatación natural, comprobado y recomendado en el estudio de la carbonatación del concreto en condiciones aceleradas y naturales Campos (2011).

f. **Ensayos.** La determinar la resistencia a compresión se obtuvo mediante la aplicación directa de cargas sobre las muestras en la maquina Universal Amsler, registrando las deformaciones por cada tonelada, con lo que se obtuvo los diagramas esfuerzo-deformación de los 15 especímenes patrón. Este procedimiento se efectuó para los 30 especímenes (15 elaboradas con el concreto normal y 15 recubiertas con aditivo resistente a la intemperie) y por cada 30 a días de exposición a CO₂. Para la determinación de la profundidad de carbonatación, se aplicó en cada caso una solución al 1% de fenolftaleína en hidro-alcohol (70% de alcohol y 30% de agua) para la efectuar el test de la fenolftaleína, el que colorea con un tono violáceo las zonas alcalinas, mientras que las zonas carbonatadas no toman color.

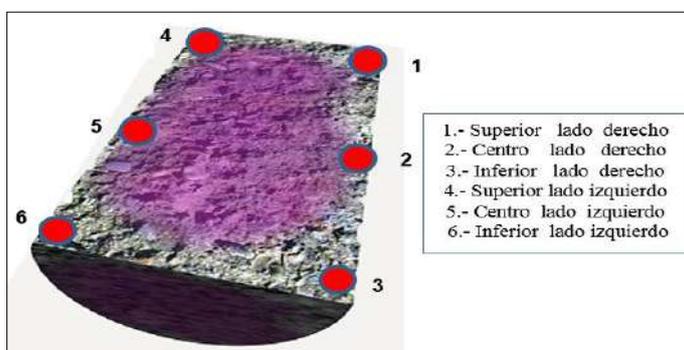


Figura 7. Ubicación de toma de datos de la profundidad de carbonatación

g. **Recopilación y procesamiento de información**, se usó el método cuantitativo, para medir las variables de estudio del tiempo de exposición al CO₂ de los especímenes de concreto de la siguiente forma: los valores obtenidos en el estudio, producto de los ensayos realizados de los diferentes tiempos de exposición del concreto a CO₂ fueron analizados, procesados mediante métodos estadísticos de determinación de promedios, análisis de varianza, desviación estándar y prueba de hipótesis, los que se apoyan en el empleo de la hoja de cálculo como Microsoft Excel 2013 y el programa Statgraphics, obteniéndose resultados confiables con gráficas representativas, que permitieron analizar, discutir y concluir, pudiendo de manera coherente proponer alternativas de mitigación de riesgos en estructuras sometidas a exposición continua a CO₂.

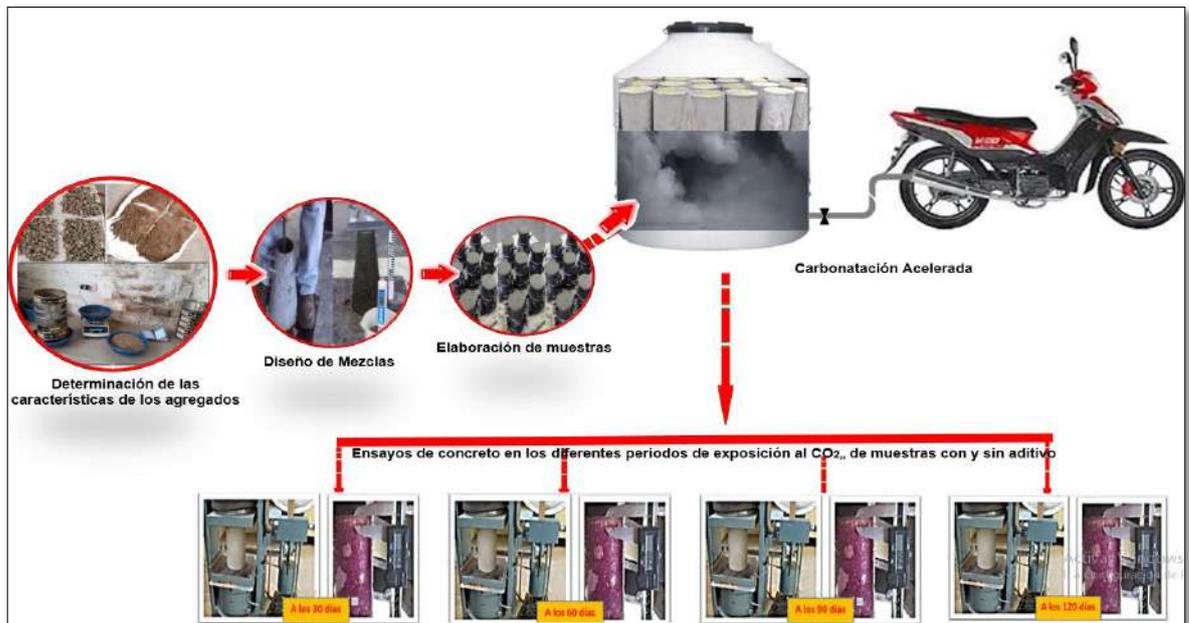


Figura 8. Esquema de procedimiento de la investigación

Capítulo IV

Resultados y discusión

La determinación de la resistencia a la compresión y la profundidad de carbonatación se desarrolló según lo descrito en el capítulo III, ítem procedimiento, con lo que se obtuvo las características físicas de los agregados, de los materiales complementarios, cantidades de los mismos para la elaboración de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de curado de la muestra patrón, resistencia a la compresión y profundidad de carbonatación del concreto por cada 30 días de exposición a CO_2 , con lo que se logró obtener las figuras de los diagramas esfuerzo-deformación, avance de la profundidad de carbonatación, variación en el peso de las muestras, entre otros que se presentan a continuación:

A. Características físicas y mecánicas de los agregados

La Tabla 7 presentan los resultados obtenidos de manera resumida

Tabla 7. Características físicas y mecánicas de los agregados

CARACTERÍSTICAS	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO
Contenido de humedad (W %)	3,370	0,816
Módulo de fineza	3,030	6,820
Peso específico del agua (Kg/cm^3)	998,000	998,000
Factor f.	335,010	102,550
Peso unitario suelto (g/cm^3) ó (Kg/m^3)	1,649 ó 1 649,00	1,418 ó 1 418,00
Peso unitario compactado (g/cm^3) ó (Kg/m^3)	1,780 ó 1 780,00	1,556 ó 1 556,00
Peso específico (g/cm^3) ó (Kg/m^3)	2,726 ó 2 726,00	2,696 ó 2 696,00
Absorción del agregado fino (%)	1,197	1,146
Porcentaje de material más fino (%)	2,670	0,410
Abrasión (%)	--	29,930
<i>OTROS:</i>		
Coef. de Uniformidad (Cu)	6,250	2,110
Coef. de Curvatura (Cc)	0,620	1,230

De la tabla 7, el contenido de humedad del agregado fino obtenido, se ubicó dentro del parámetro especificado para la elaboración de concretos (hasta el 8% aproximadamente), el mismo que está en función del clima que se presente en la toma de muestras. En cambio el contenido de humedad del agregado grueso refleja que este pierde humedad muy fácilmente o su capacidad de retención de humedad es bastante baja en comparación con el agregado fino, estos

efectos se consideraron para la el diseño de mezclas en el cálculo de la cantidad de agua en la mezcla.

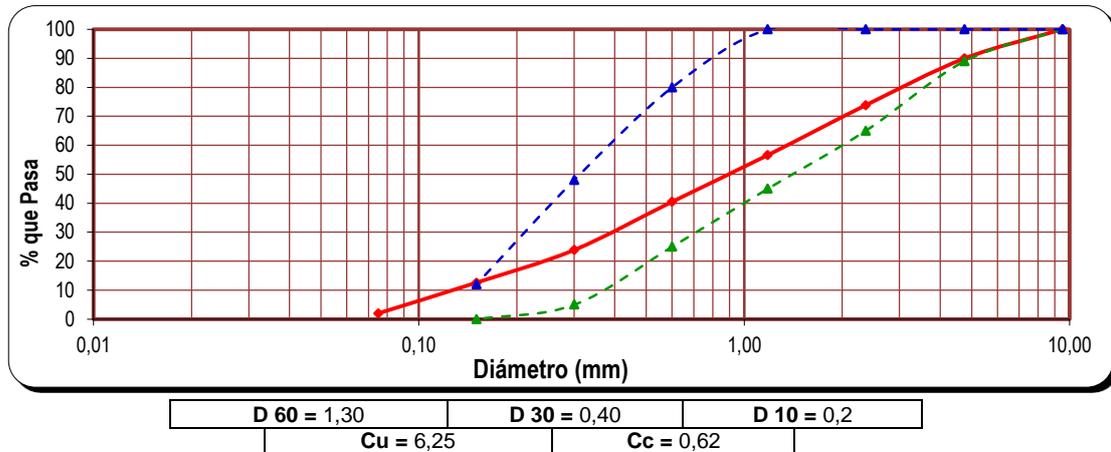


Figura 9. Curva de distribución granulométrica promedio de 3 ensayos del agregado fino

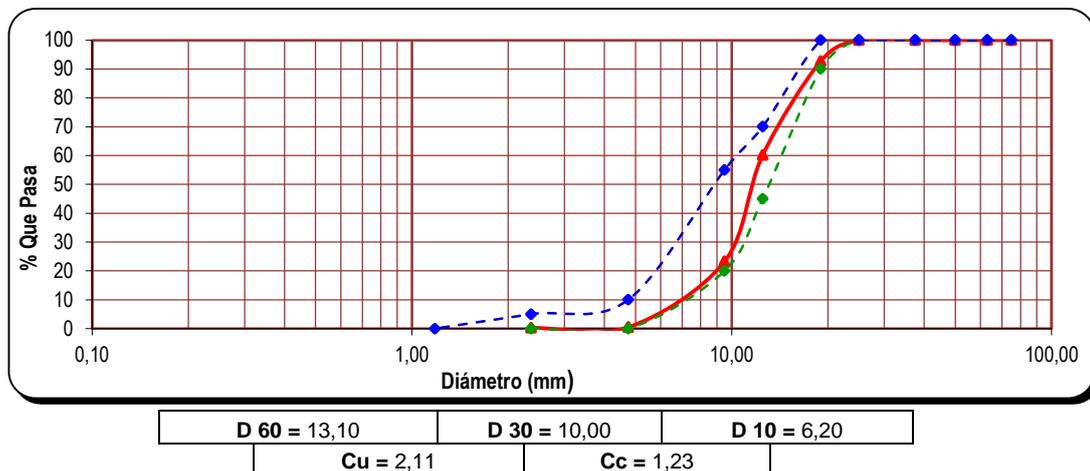


Figura 10. Curva de distribución granulométrica promedio de 3 ensayos del agregado grueso

De la figura 9. Se observa que la granulometría se encuentra en su totalidad dentro de los husos granulométricos dados por la norma técnica, por lo que se concluye que el agregado fino es bien gradado. El valor del coeficiente de uniformidad (Cu) es mayor a 6,0 y el coeficiente de curvatura (Cc) no se encuentra dentro del rango de 1 a 3; con lo que se concluye que el agregado fino es bien gradado pero sus partículas no son uniformes.

Según la figura 10. Analizado la granulometría del agregado grueso, se encuentra la totalidad dentro del huso N° 67 indicado por la norma técnica para la elaboración de concretos estructurales, lo que concluye que el agregado es bien gradado. El valor del coeficiente de

uniformidad (Cu) es menor a 6,0 y el coeficiente de curvatura (Cc) se encuentra dentro del rango de 1 a 3, lo que implica que el material cuenta con ínfimo de partículas inferiores a la malla # 4 (4,75 mm) afirmando que el agregado grueso es bien gradado con partículas uniformes. Así mismo se observó que el agregado presenta partículas de forma angular y laminada. Textura rugosa, partículas que facilitaron la adherencia agregado – pasta de cemento.

De la tabla 7, se observa que el valor del módulo de fineza del agregado fino obtenido está por encima de lo especificado por la Norma Técnica (entre 2,3 a 3,1). Por lo que definimos a este material como arena gruesa, deficiencia que será superada en el diseño de la mezcla del método del módulo de finura de la combinación de agregados; ya que ayuda a ajustar en forma inversamente proporcional (IP) la cantidad de arena óptima en función de su módulo de finura (mf), toda vez que cuanto mayor es su valor menos será el valor lubricante y la demanda de agua por área superficial. En cambio el módulo de fineza del agregado grueso que se utilizó tuvo un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ ", el mismo que es adecuado para concretos de alta resistencia.

De los valores de la tabla 7, para la absorción se infiere que las partículas del agregado fino presentan una porosidad del orden del 1,197% y del agregado grueso 1,146%. Los que se encuentran dentro de los parámetros establecidos para la elaboración de concretos estructurales.

El valor obtenido en la determinación de material más fino refleja que el agregado fino cumplió con la especificación recomendada de un máximo de 7%, para agregados provenientes del proceso de chancado, lo que implica que se tuvo un mínimo de sustancias deletéreas, el agregado grueso cumplió con la especificación técnica que indica que el material a usar para elaborar concreto debe tener un máximo 1% de material más fino, por lo que el agregado ha tenido un mínimo de sustancias deletéreas.

El valor que se obtuvo de la resistencia a la abrasión indica que cumplió con lo especificado en la norma técnica, la que recomienda que el valor máximo de desgaste del agregado es del orden del 50%. Infiriendo que el agregado grueso utilizado es de buena calidad.

Los valores obtenidos de las características físicas y mecánicas de los agregados, registran relación con los materiales utilizados en las investigaciones: Efectos del dióxido de carbono en morteros con ceniza volante, de conformidad a los criterios del ACI. Valdéz (1998), en el que se determinó las características de los agregados así como el contenido de aire atrapado en el concreto, absorción, entre otros; Carvajal, Silva, Valiente, & Venegas (2007) en Los efectos de la carbonatación acelerada en distintos tipos de cemento y hormigones, evaluó y caracterizó los materiales conformantes del concreto para la elaboración de los testigos en la investigación; Galán (2011). En la carbonatación del hormigón, sometió a estudio los materiales para las diferentes técnicas de caracterización de bloques de concreto. Lo que suele ser común en este tipo de análisis pues la presente investigación y las investigaciones realizadas se efectuaron de acuerdo a las normas técnicas como el ACI, Asociación que desarrolla estándares, normas y recomendaciones técnicas para el concreto.

B. Materiales complementarios utilizados

1. Cemento

El cemento que se utilizó para realizar la investigación fue cemento portland tipo I de Cementos Pacasmayo S.A. el indicador utilizado para el diseño de mezclas en el presente estudio es la densidad que es de **3,08 g/ml**, el mismo que se encontró en la ficha técnica del Cemento Portland Tipo I (Cementos-Pacasmayo-S.A., 2017) que se adjunta en Anexos .

2. Agua

Como se mencionó en el capítulo anterior el agua utilizada fue de la red pública de la ciudad de Cajamarca

C. Caracterización de la carbonatación acelerada del concreto

De la inspección técnica vehicular que se realizó el 5 de octubre del 2017, se tiene:

Tabla 8. Gases emitidos por el vehículo utilizado en la carbonatación acelerada

T° Aceite (°C) = 77/77	CO Ral (%) = 1,53
RPM = 825/2563	CO + CO ₂ Ral (%)= 3,57
Opacidad (m-1)	HC Ral. (ppm) = 280

Fuente: Centro de inspección vehicular El Cumbe SAC – 2017

T°	: Temperatura.
°C	: Grados Centígrados.
RPM	: Revoluciones por minuto
CO Ralenti (%)	: Volumen de monóxido de carbono emitido, en las revoluciones por minuto del motor cuando no está acelerado.
CO+CO ₂ Ralenti (%)	: Volumen de monóxido de carbono y dióxido de carbono emitido, en las revoluciones por minuto del motor cuando no está acelerado.
HC Ralenti (ppm)	: Hidrocarburos no quemados en las revoluciones por minuto del motor cuando no está acelerado.

Los valores del volumen de monóxido de carbono y dióxido de carbono emitido, en las revoluciones por minuto del motor cuando no está acelerado del vehículo utilizado para la inducción de CO₂ al concreto en estudio, se encuentra en el rango de 3% a 4%, recomendado por Campos (2011), en el estudio de la carbonatación del concreto en condiciones aceleradas y naturales.

D. Diseño de mezcla

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Proporciones de materiales en peso y volumen para concreto de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

Proporción en peso		Proporción en Volumen	
Cemento	= 1	Cemento	= 1
A. Fino	= 3,47	A. Fino	= 3,060
A. Grueso	= 2,85	A. Grueso	= 2,990
Agua	= 23,7 (lt /bolsa)	Agua	= 23,700 (lt /bolsa)

E. Resistencia a compresión de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

1. Resistencia a compresión del concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ de muestras patrón

Las muestras patrón sirvieron como base o modelo, para las comparaciones y valoraciones en las siguientes etapas del estudio como se ha descrito en la metodología.

A continuación, se muestra el resultado del promedio de los 15 ensayos realizados.

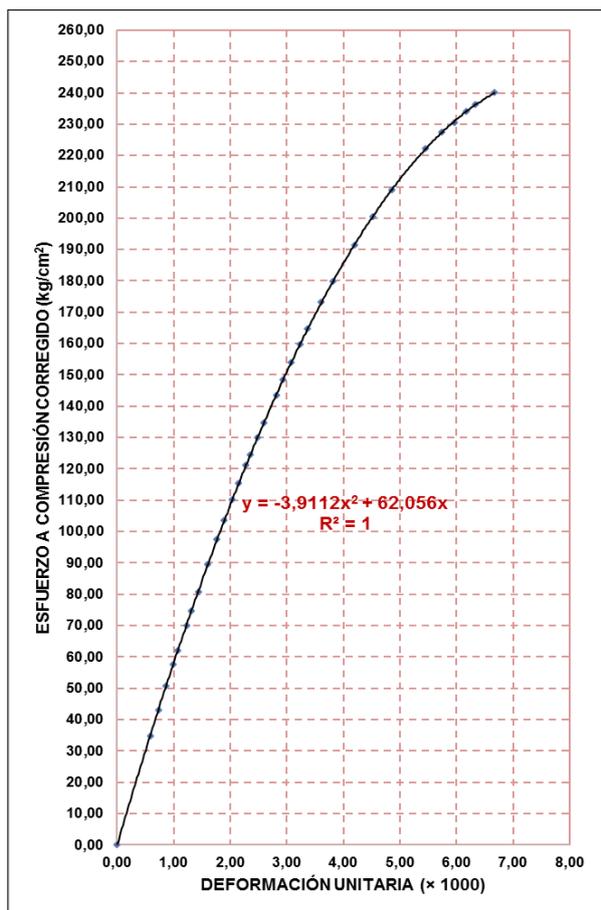


Figura 11. Gráfico esfuerzo – deformación promedio del lote de 15 muestras patrón (corregido)

Tabla 10. Valores característicos del concreto de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de la muestra patrón.

EC. DE ESF. CORREGIDA PROM:	$-3,907X^2 + 62,06x$
DEF. ROT. UNIT. ($\times 1000$) PROM.:	5,97
ESF. ROT PROM.(kg/cm ²):	230,44
MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	227665,91
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 - PROM. (kg/cm ²):	60175,39
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 - PROM. (kg/cm ²):	58742,97

La figura 11 y tabla 10, muestra el promedio de 15 ensayos a los 28 días de fraguado de las muestras patrón, en el que se obtuvo el gráfico esfuerzo-deformación y el esfuerzo máximo de rotura cuyo valor fue $f'c=230,44 \text{ Kg/cm}^2$, el mismo que superó la resistencia a compresión especificada de diseño que fue de 210 Kg/cm^2 y menor a la resistencia a compresión promedio requerida en el diseño 252 Kg/cm^2 , valor que se tomó como base en la investigación para las comparaciones con efecto que causa la exposición a CO_2 cada 30 días en el concreto; paralelamente se determinó el módulo de elasticidad, tanto por fórmula como gráficamente. Cabe destacar que el valor de la resistencia patrón con respecto a los estudios realizados como antecedentes no guardan relación numérica ya que han sido formulados bajo otros parámetros y criterios como: variación de la relación

agua/cemento, adición de cenizas volantes, variación del tipo de cemento, entre otros, pero que si guardan relación en cuanto a procedimiento, el mismo que esta normado.

1.1. Prueba de ajuste a una distribución normal de la muestra patrón.

Se Utilizó como herramienta el paquete estadístico Statgraphics, el que permitió calcular el valor probabilístico (P) y el estadístico de contraste de Shapiro-Wilk (W). Indicadores que definen la aceptación o no de la distribución normal de las muestras.

Tabla 11. Valores probabilísticos de la resistencia a compresión de muestras patrón

Muestras Patrón $f'c = 210$ kg/cm ²	Valor probabilístico "P"				Estadístico de contraste
	Chi-Cuadrado	Shapiro-Wilk	Sesgo	Curtosis	"W"
28 DÍAS	0,145353	0,460129	0,539418	-	0,946889

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

W = Coeficiente estadístico de contraste

De los resultados estadísticos obtenidos (tabla 11) afirmamos que las muestras cumplen con una distribución normal, ningún valor probabilístico de P resultó menor a 0,05 y los valores de W están cercanos a la unidad y son mayores a 0,5.

Los valores estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que invalidaría cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal.

Se infiere que debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05, las muestras son aceptadas para el esfuerzo a la rotura, la misma que proviene de una distribución normal con un 95% de confianza.

En las investigaciones realizadas anteriormente ha sido efectuadas teniendo el mismo criterio de evaluación es decir que todas las muestras cumplan con una distribución normal, ello da solidez y veracidad de los ensayos realizados.

1.2. Variable aleatoria “Z” de la resistencia la compresión de muestras patrón

Valores de “Z” de cada una de las muestras patrón, figuras de rango de aceptación e histogramas de frecuencias.

Tabla 12. Valores de “Z” para las resistencias a la compresión de 15 muestras patrón

Muestra	Z	Esf. Rot (kg/cm ²)
M-P-1	1,901	247,50
M-P-2	-0,608	224,99
M-P-3	-1,681	215,36
M-P-4	-0,645	224,66
M-P-5	-0,322	227,55
M-P-6	0,442	234,41
M-P-7	-0,796	223,30
M-P-8	-0,924	222,15
M-P-9	-0,721	223,97
M-P-10	0,223	232,45
M-P-11	1,479	243,72
M-P-12	1,370	242,74
M-P-13	0,272	232,89
M-P-14	0,378	233,83
M-P-15	-0,368	227,14

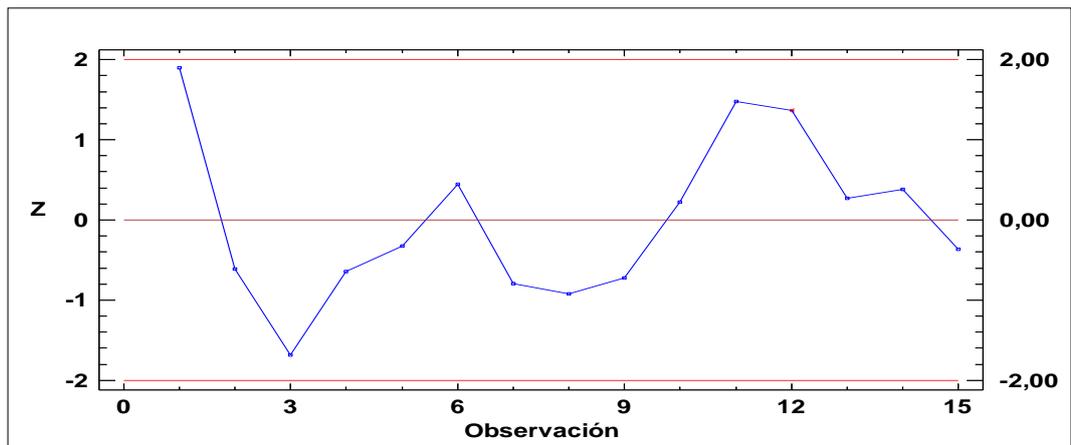


Figura 12. Diagrama de dispersión de los valores “Z” para cilindros de concreto de la muestra patrón
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)
Líneas rojas rangos superior e inferior

Tanto en la tabla 12 como en la Figura 12, se aprecia que el rango de aceptación que va desde -2 a 2 en el cual están comprendidos los puntos o ensayos definitivos de las resistencias a compresión de las 15 muestras patrón; por lo que todos los datos obtenidos en los ensayos para este caso son aceptados.

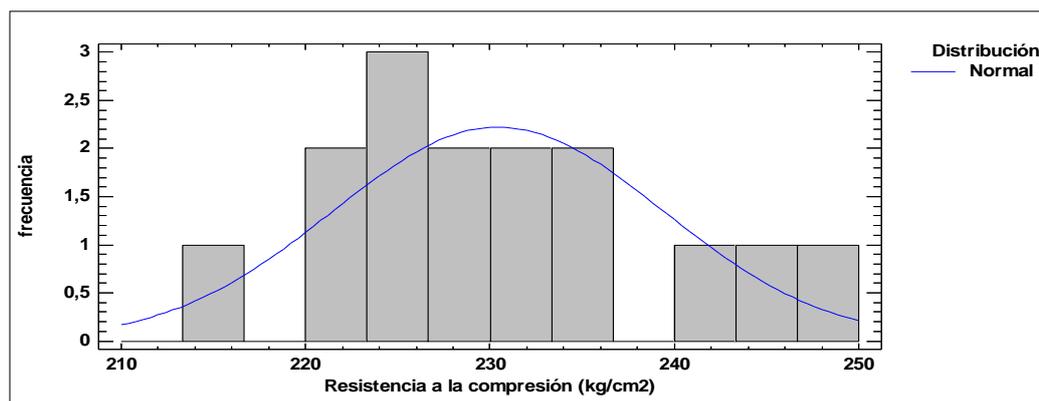


Figura 13. Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de las muestras patrón
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

La figura 13 muestra el histograma de frecuencias, el mismo que refleja que los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de las muestras patrón se adecuaron a una Campana de Gauss (Curva de distribución normal), reafirmando que los datos del estudio son válidos estadísticamente y cumplen con el rigor científico esperado, que como se mencionó anteriormente no hay relación con los resultados de otras investigaciones por que los objetivos no han sido los mismos pero que si estadísticamente han seguido el mismo criterio a fin de validar su estudio.

1.3. Estadística descriptiva:

Tabla 13. Parámetros estadísticos para las muestras patrón

Parámetros Estadísticos	EDAD
	28 DÍAS
Datos	15
Media	230,444
Desviación Estándar	8,97329
Coefficiente de Variación Porcentual	3,89391%
Mínimo	215,362
Máximo	247,501
Error de Estimación	4,96925
Intervalo de Confianza	225,475
(Media ± Error de Estimación)	235,414

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

De los resultados de la tabla 13, se observa diferentes parámetros estadísticos, como la media o promedio de los datos, tomando a este como punto de comparación el $f'c$ de diseño (210 kg/cm^2), fue superada en 1,1%, y el valor mínimo obtenido también es

superior, lo que implica que el diseño elaborado para este estudio ha sido el óptimo, tanto en cantidad como en calidad de los componentes del concreto, es importante anotar que el coeficiente de variación obtenido reflejó que el trabajo en laboratorio fue de muy bueno a excelente el grado de control en los diferentes ensayos, de igual magnitud que ha podido verificar en él estudio de la carbonatación del hormigón teniendo en consideración la combinación de CO₂ con fases hidratadas del cemento y frente al cambio de pH. Galán (2011).

2. Resistencia a compresión del concreto de f'c = 210 kg/cm² de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂ en los períodos de: 30; 60; 90 y 120 días

A continuación, se muestra el promedio de los 15 ensayos realizados en cada período de tiempo.

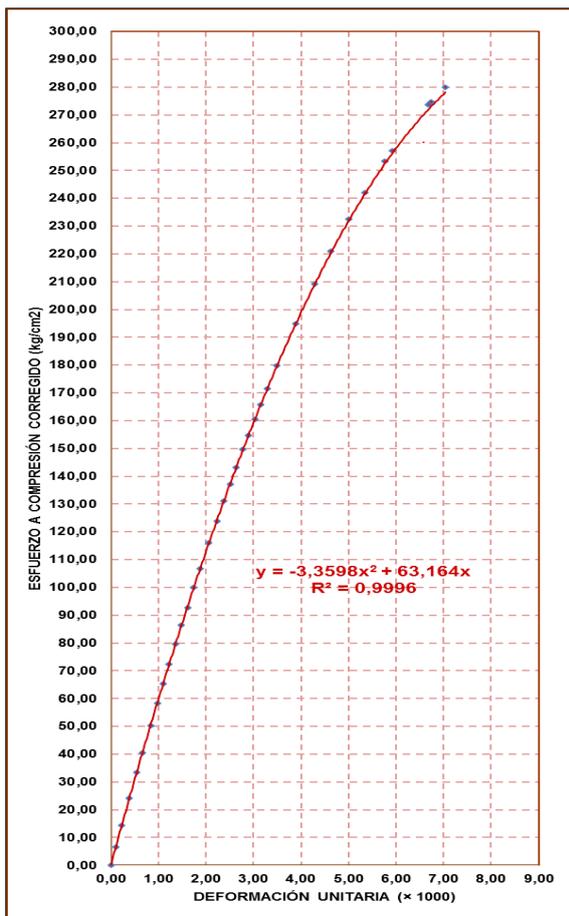


Figura 14. Gráfico esfuerzo –deformación promedio de 15 muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO₂ 30 días

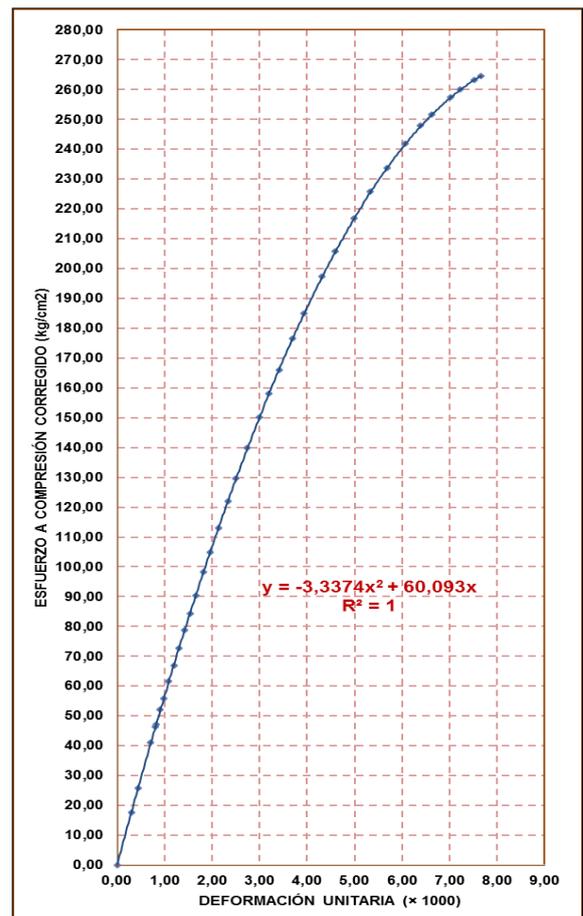


Figura 15. Gráfico esfuerzo –deformación promedio de 15 muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO₂ 60 días

Tabla 14. Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 30 días

EC. DE ESF. CORREGIDA PROM.:	$-3,36x^2 + 63,16x$
DEF. ROT. UNIT. ($\times 1000$) PROM.:	6,57
ESF. ROT PROM. (kg/cm^2):	259,98
MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm^2):	241936,338
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 - PROM. (kg/cm^2):	63730,131
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 - PROM. (kg/cm^2):	60127,734

Tabla 15. Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 60 días.

EC. DE ESF. CORREGIDA PROM.:	$-3,34x^2 + 60,09x$
DEF. ROT. UNIT. ($\times 1000$) PROM.:	6,806
ESF. ROT PROM. (kg/cm^2):	254,293
MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm^2):	239184,997
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 - PROM. (kg/cm^2):	53667,22
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 - PROM. (kg/cm^2):	53351,02

De los resultados que se muestran en la tabla 14. El promedio de la resistencia de 15 muestras recubiertas con aditivo que permanecieron 30 días en una atmosfera de $\text{CO} = 1,53\%$ y $\text{CO} + \text{CO}_2 = 3,57\%$, (inducidos en el tanque hermético), se incrementó la resistencia con respecto a la muestra base o patrón, mientras que a los 60 días (tabla 15) muestra un importante descenso, de igual forma sucedió con el módulo de elasticidad.

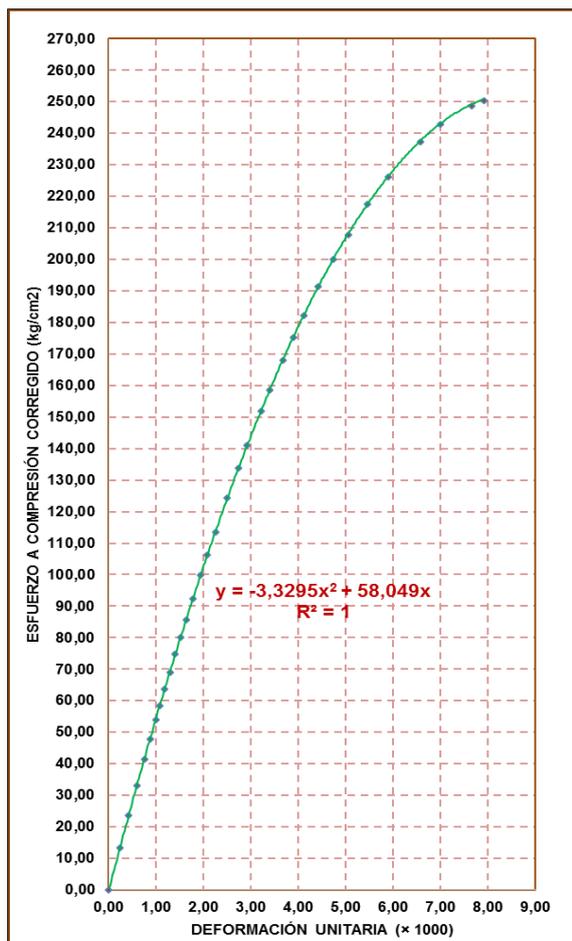


Figura 16. Gráfico esfuerzo – deformación promedio de 15 muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 90 días

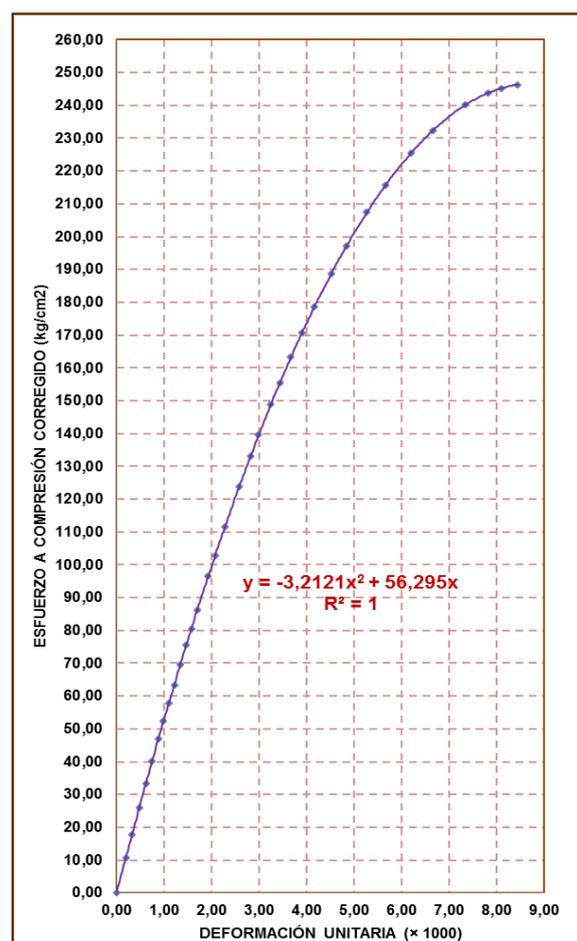


Figura 17. Gráfico esfuerzo – deformación promedio de 15 muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 120 días

Tabla 16. Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 90 días

EC. DE ESF. CORREGIDA PROM.:	$-3,33x^2 + 58,05x$
DEF. ROT. UNIT. ($\times 1000$) PROM.:	7,21
ESF. ROT PROM. (kg/cm^2):	243,304
MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm^2):	233963,333
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 - PROM. (kg/cm^2):	51004,604
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 - PROM. (kg/cm^2):	54286,951

Tabla 17. Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 120 días

EC. DE ESF. CORREGIDA PROM.:	$-3,212x^2 + 56,3x$
DEF. ROT. UNIT. ($\times 1000$) PROM.:	7,3489
ESF. ROT PROM. (kg/cm^2):	240,148
MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm^2):	232443,206
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 - PROM. (kg/cm^2):	45001,203
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 - PROM. (kg/cm^2):	50834,894

En la tabla 16 y figura 17, ilustran que el promedio de la resistencia de 15 muestras recubiertas con aditivo, que se sometieron 90 días en una atmosfera de $\text{CO} = 1,53\%$ y $\text{CO} + \text{CO}_2 = 3,57\%$, continua descendiendo, de igual forma sucedió con las muestras sometidas a 120 días de exposición en la misma atmosfera (tabla 17). Este decremento también ocurre con los indicadores del módulo de elasticidad. Gaspar & Muñoz (1977) en el estudio: Acción del CO_2 sobre un cemento portland, los autores describen un comportamiento similar de la resistencia mecánica a flexión del concreto carbonatado; en el estudio “Nuevo metamodelo para calcular la profundidad del frente de carbonatación en estructuras de concreto” Van et al. (2017), hace referencia sobre la resistencia a compresión del concreto a los 28 días, el que incrementó en sus en su etapa inicial de carbonatación; Iloro et al. (2013) en el estudio: Carbonatación acelerada de morteros: Influencia de las adiciones minerales y la edad de curado afirmaron que la resistencia a compresión de todos los morteros se incrementa con la edad de curado.

2.1. Prueba de ajuste a una distribución normal

Tabla 18. Valores probabilísticos de la resistencia a compresión de muestras recubiertas con aditivo, expuestas a CO_2 en los períodos de 30; 60; 90 y 120 días

Muestras expuestas a CO_2		Valor probabilístico “P”				Estadístico de contraste “W”
		Chi-Cuadrado	Shapiro-Wilk	Sesgo	Curtosis	
Recubiertas con aditivo	30 días	0,221311	0,929656	0,943305	-	0,978356
	60 días	0,617389	0,198150	0,689997	-	0,920914
	90 días	0,092806	0,055013	0,311430	-	1,012220
	120 días	0,617389	0,679783	0,678366	-	0,961189

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

W = Coeficiente estadístico de contraste

De la tabla 18, colegimos que las muestras cumplen con una distribución normal, ningún valor probabilístico de P resultó menor a 0,05 y los valores de W están cercanos a la unidad y son mayores a 0,5.

Lo mismo sucedió con los valores estadísticos de dispersión los que se encontraron en el rango de -2 a +2, por lo que inferimos que los valores para las muestras sometidas a CO₂ en los períodos de 30, 60, 90 y 120 días el sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes a una distribución normal.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05, las muestras son aceptadas para el esfuerzo de rotura proveniente de una distribución normal con 95% de confianza, lo que brindó la rigurosidad esperada.

Parámetros que han sido tomados en consideración en las investigaciones similares que tomadas como antecedentes para validar sus ensayos.

2.2. Variable aleatoria “Z” de la resistencia a compresión de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®

Valores de “Z” para cada una de las muestras, ya establecidos con sus respectivos gráficos de rango de aceptación e histogramas de frecuencias.

Tabla 19. Valores de “Z” de resistencias a la compresión, de muestras recubiertas con aditivo, expuestas a CO₂, por 30 días

Muestra	Z	Esf. Rot (kg/cm ²)
M-16-CR	1,55725	266,58
M-17-CR	-1,0882	255,36
M-18-CR	0,18045	260,74
M-19-CR	0,83861	263,53
M-20-CR	0,61357	262,58
M-21-CR	-0,3846	258,35
M-22-CR	1,73191	267,32
M-23-CR	-0,3021	258,70
M-24-CR	-1,1626	255,05
M-25-CR	-0,1299	259,43
M-26-CR	-0,2658	258,85
M-27-CR	-0,479	257,95
M-28-CR	-1,9727	251,61
M-29-CR	0,6628	262,79
M-30-CR	0,20038	260,83

Tabla 20. Valores de “Z” de resistencias a la compresión, de muestras recubiertas con aditivo, expuestas a CO₂, por 60 días

Muestra	Z	Esf. Rot (kg/cm ²)
M-46-CR	1,36943	261,36
M-47-CR	0,71888	258,00
M-48-CR	-1,0731	248,75
M-49-CR	1,25957	260,79
M-50-CR	-0,7359	250,49
M-51-CR	-0,467	251,88
M-52-CR	-0,4501	251,97
M-53-CR	1,52686	262,17
M-54-CR	-1,5922	246,07
M-55-CR	0,02059	254,39
M-56-CR	1,30073	261,00
M-57-CR	-0,2263	253,12
M-58-CR	-0,7596	250,37
M-59-CR	-0,044	254,06
M-60-CR	-0,8479	249,91

Tabla 21. Valores de “Z” de resistencias a la compresión muestran recubiertas con aditivo, expuestas a CO₂, por 90 días

Muestra	Z	Esf. Rot (kg/cm ²)
M-76-CR	-0,0534	243,06
M-77-CR	1,59314	250,74
M-78-CR	-0,9219	239,00
M-79-CR	1,74016	251,42
M-80-CR	-0,7607	239,76
M-81-CR	-0,6587	240,23
M-82-CR	-1,3309	237,10
M-83-CR	0,39563	245,15
M-84-CR	-0,778	239,68
M-85-CR	-0,2458	242,16
M-86-CR	-0,6888	240,09
M-87-CR	-0,0884	242,89
M-88-CR	1,7256	251,35
M-89-CR	0,54219	245,83
M-90-CR	-0,4702	241,11

Tabla 22. Valores de “Z” de resistencias a la compresión muestran recubiertas con aditivo expuestas a CO₂, por 120 días

Muestra	Z	Esf. Rot (kg/cm ²)
M-106-CR	1,21451	245,10
M-107-CR	1,43208	245,99
M-108-CR	0,72177	243,09
M-109-CR	0,44779	241,97
M-110-CR	0,37801	241,69
M-111-CR	-1,8279	232,70
M-112-CR	-1,5233	233,94
M-113-CR	-0,1105	239,70
M-114-CR	-0,888	236,53
M-115-CR	-0,7489	237,10
M-116-CR	-0,6922	237,33
M-117-CR	0,72461	243,10
M-118-CR	-0,4326	238,38
M-120-CR	1,17398	244,94
M-121-CR	0,13057	240,68

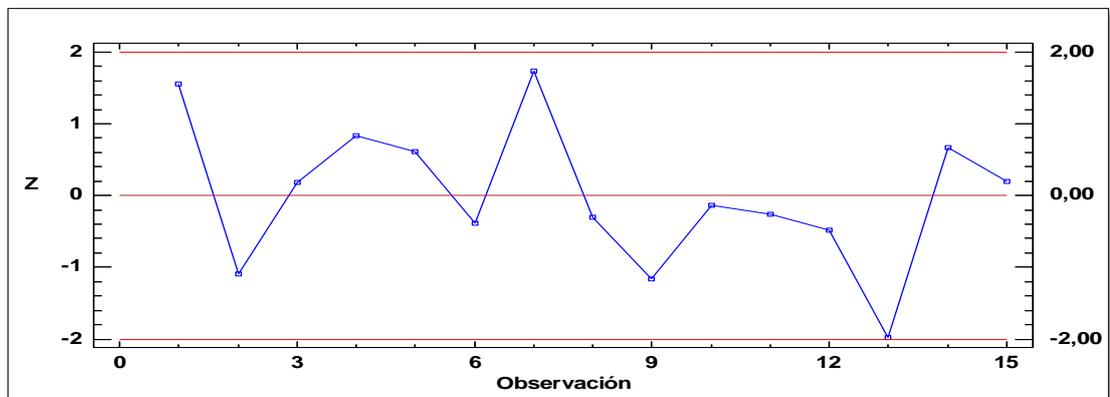


Figura 18. Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 30 días a CO₂ recubiertas con aditivo
 Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)
 Líneas rojas rangos superior e inferior

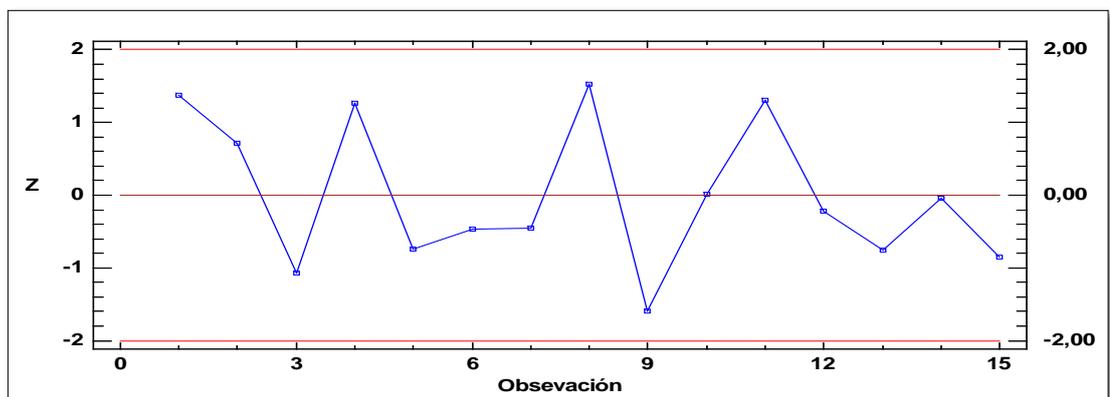


Figura 19. Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 60 días a CO₂ recubiertas con aditivo
 Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)
 Líneas rojas rangos superior e inferior

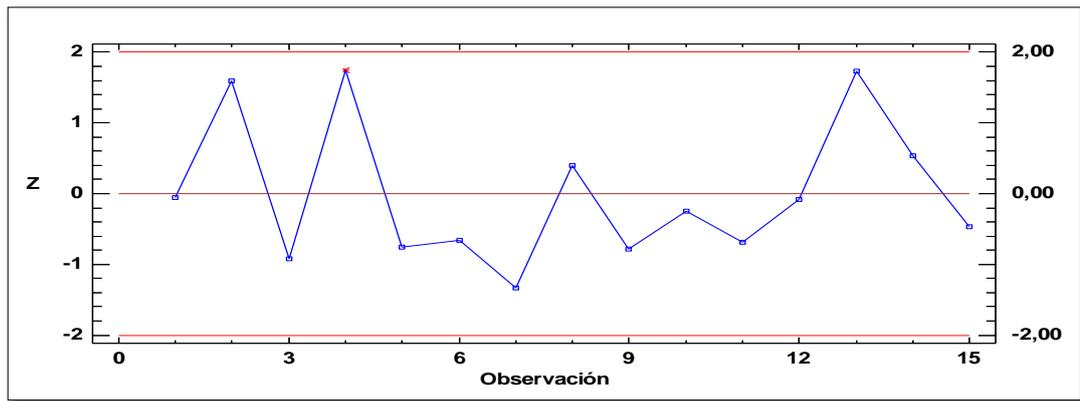


Figura 20. Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 90 días a CO₂ recubiertas con aditivo

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Líneas rojas rangos superior e inferior

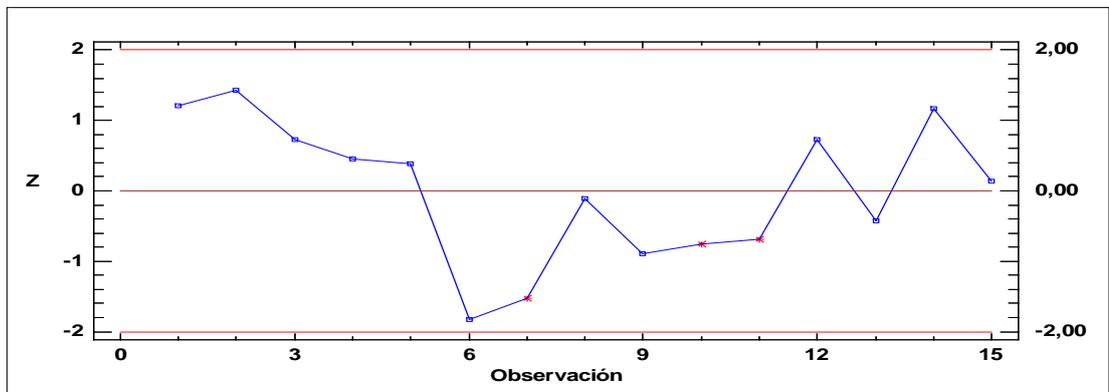


Figura 21. Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 120 días a CO₂ recubiertas con aditivo

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Líneas rojas rangos superior e inferior

Las tablas 19, 20, 21,22 de valores “Z” y figuras 18, 19, 20, 21 que ilustran los diagramas de dispersión, reflejan que los ensayos realizados se encuentran en el rango de 2 a -2; por lo que todos los datos obtenidos en los ensayos son aceptados estadísticamente.

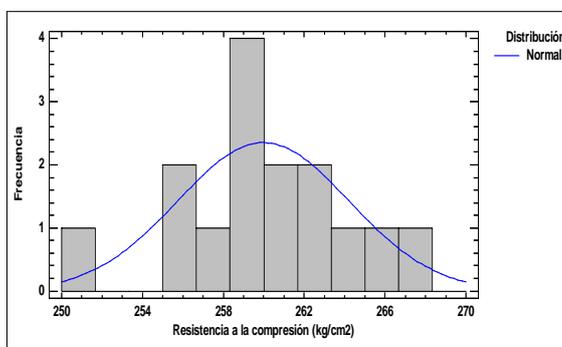


Figura 22. Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 30 días a CO₂ recubiertas con aditivo

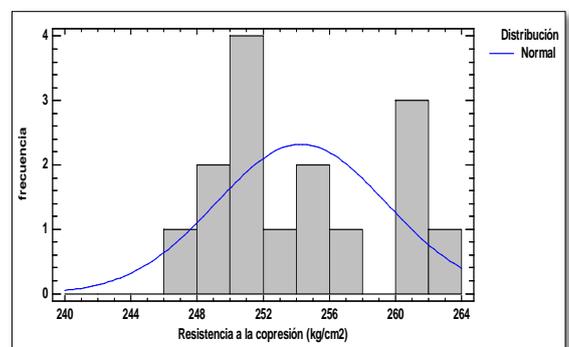


Figura 23. Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 60 días a CO₂ recubiertas con aditivo

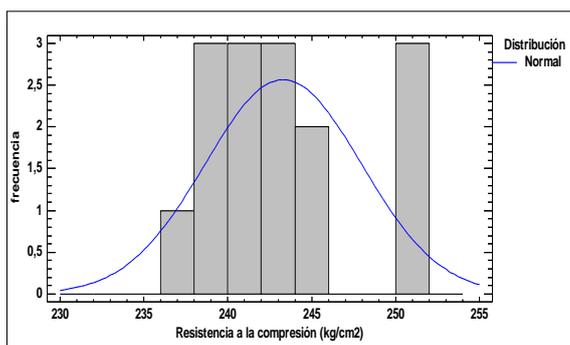


Figura 24. Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 90 días a CO₂ recubiertas con aditivo.

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

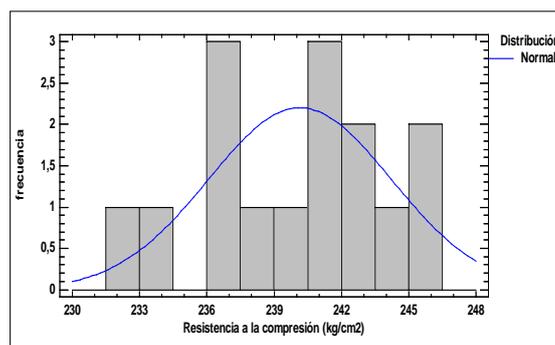


Figura 25. Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 120 días a CO₂ recubiertas con aditivo.

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Los histogramas (figuras 22, 23, 24, 25) de las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO₂, de los períodos de 30, 60, 90 y 120 reflejan que los datos se ajustaron a una Campana de Gauss (Curva de distribución normal), reafirmando que los datos del estudio son válidos estadísticamente y cumplen con el rigor científico esperado.

2.3. Estadística descriptiva

Tabla 23. Parámetros estadísticos de la resistencia a compresión de las muestras, recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂ en los diferentes períodos de estudio

Parámetros Estadísticos	Muestras de concreto expuestas a CO ₂ recubiertas con aditivo			
	30 DÍAS	60 DÍAS	90 DÍAS	120 DÍAS
Datos	15	15	15	15
Media	259,976	254,289	243,304	240,149
Desviación Estándar	4,23882	5,16036	4,66476	4,07746
Coefficiente de Variación Porcentual	1,63047%	2,02933%	1,91725%	1,69789%
Mínimo	251,614	264,072	237,096	232,696
Máximo	267,317	262,168	251,422	245,988
Error de Estimación	2,34739	2,85772	2,58326	2,25803
Intervalo de Confianza	257,629	251,431	240,721	237,891
(Media ± Error de Estimación)	262,323	257,126	245,888	242,407

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

En la tabla 23 se observan los parámetros estadísticos, entre ellos la media o promedio de los datos la que nos indica que tomando como punto de comparación el f'c de diseño (210 kg/cm²) o muestra patrón, muestras que luego se les aplicó una película de aditivo resistente a la intemperie y se las sometió a inducción de CO₂, incrementando la resistencia a los 30, luego fue decreciendo paulatinamente de acuerdo al tiempo de

exposición. Es importante recalcar que según los coeficientes de variación obtenidos que no superan el 2.5%, que se trata de un estudio realizado en laboratorio en el que se ha efectuado en un buen a excelente grado de control en los diferentes ensayos.

3. Resistencia a compresión del concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 en los períodos de: 30; 60; 90 y 120 días

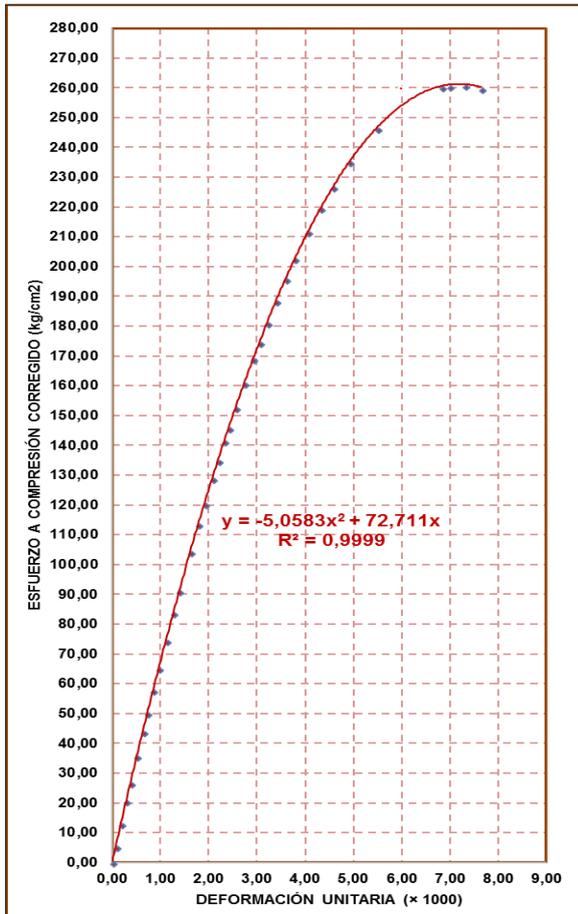


Figura 26. Gráfico esfuerzo – deformación promedio de 15 muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 30 días

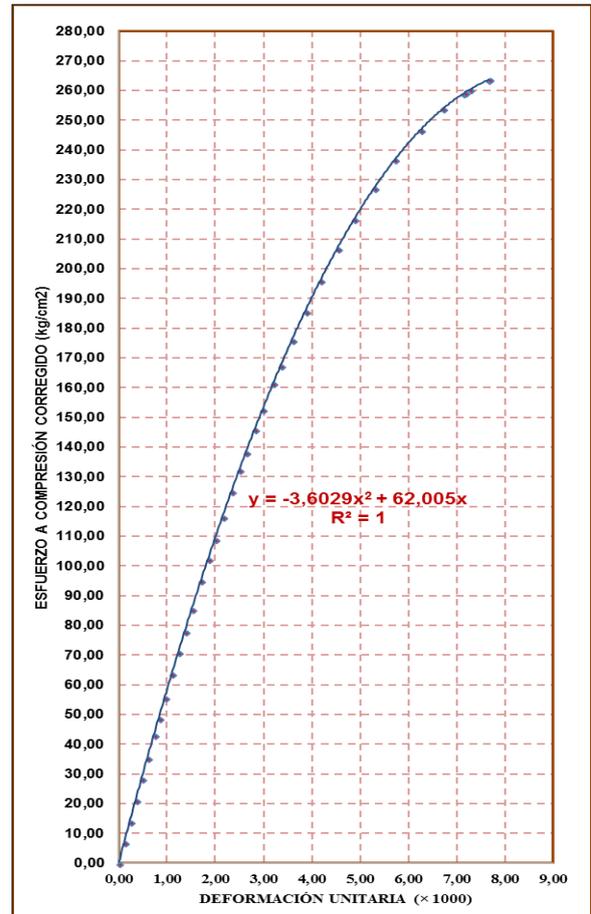


Figura 27. Gráfico esfuerzo – deformación promedio de 15 muestras sin recubrimiento expuestas a CO_2 60 días

Tabla 24: Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 30 días

EC. DE ESF. CORREGIDA:	$-5,06x^2 + 72,7x$
DEF. ROT. UNIT. ($\times 1000$) PROM.:	6,00
ESF. ROT PROM.kg/cm ²):	259,80
MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	241773,911
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 - PROM. (kg/cm ²):	67827,020
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 - PROM. (kg/cm ²):	64675,727

Tabla 25: Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 60 días

EC. DE ESF. CORREGIDA:	$-3,603x^2 + 62x$
DEF. ROT. UNIT. ($\times 1000$) PROM.:	6,91
ESF. ROT PROM.kg/cm ²):	258,89
MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	241335,821
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 - PROM. (kg/cm ²):	53529,346
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 - PROM. (kg/cm ²):	55458,082

De los resultados de la tabla 24, y la figura 26, en los que se observa el promedio de los esfuerzos a compresión de 15 muestras sin recubrimiento que permanecieron 30 días en una atmosfera de $CO = 1,53\%$ y $CO+CO_2 = 3,57\%$ incrementa con respecto a la muestra base o patrón, mientras que a los 60 días (tabla 25 y figura 27) muestra un descenso. Lo mismo sucedió con el módulo de elasticidad.

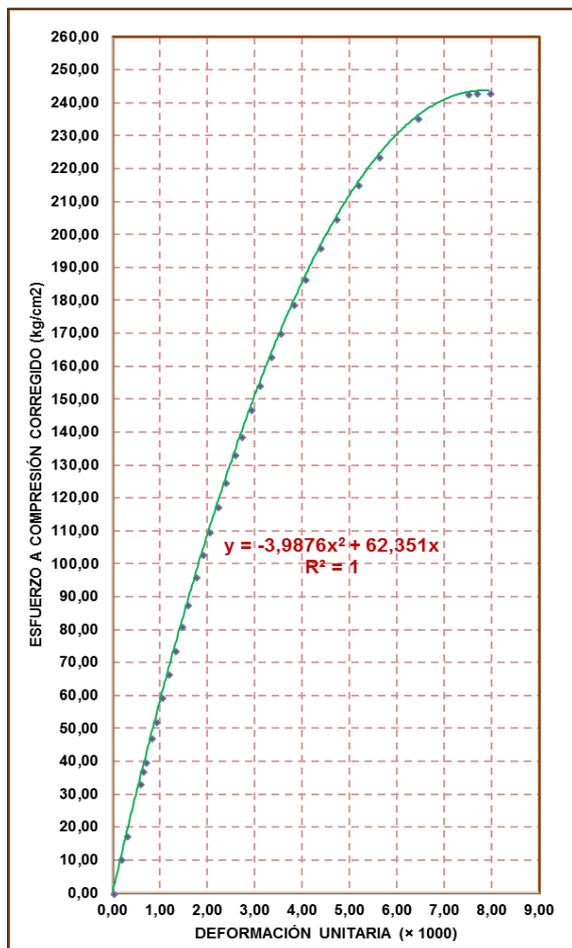


Figura 28. Gráfico esfuerzo – formación promedio de 15 muestras sin recubrimiento expuestas a CO_2 90 días

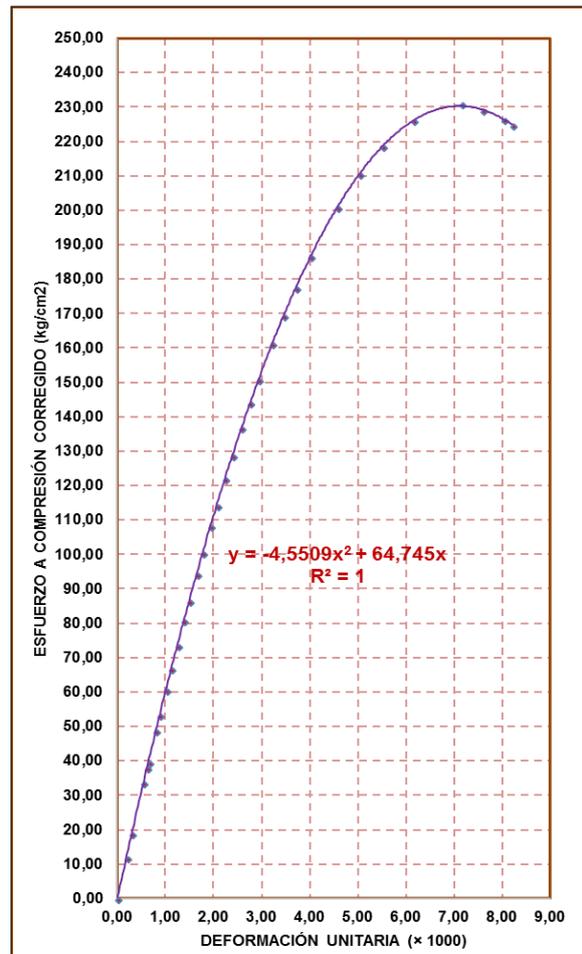


Figura 29. Gráfico esfuerzo – formación promedio de 15 muestras sin recubrimiento expuestas a CO_2 120 días

Tabla 26. Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 90 días

EC. DE ESF. CORREGIDA:	$-3,99x^2 + 62,35x$
DEF. ROT. UNIT. ($\times 1000$) PROM.:	6,95
ESF. ROT PROM. kg/cm^2 :	242,36
MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm^2):	233551,476
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 - PROM. (kg/cm^2):	49752,627
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 - PROM. (kg/cm^2):	57649,444

Tabla 27. Valores característicos del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, promedio de las muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 120 días

EC. DE ESF. CORREGIDA:	$-4,554x^2 + 64,75x$
DEF. ROT. UNIT. ($\times 1000$) PROM.:	7,15
ESF. ROT PROM. kg/cm^2 :	230,85
MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm^2):	227902,236
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 - PROM. (kg/cm^2):	45841,527
MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 - PROM. (kg/cm^2):	57326,414

En la tabla 26 y figura 28, el promedio de la resistencia de 15 muestras sin recubrimiento con aditivo, que permanecieron 90 días en una atmósfera de $CO = 1,53\%$ y $CO+CO_2 = 3,57\%$, (en el tanque hermético), continua en descenso, este decremento también se vio plasmado en las muestras sometidas a 120 días de exposición (tabla 27 y figura 30), lo que es concordante con lo publicado en la revista “Construcción y tecnología en concreto”: La carbonatación, donde hace alusión a productos como el Chema Seal® utilizado en el presente estudio, que su empleo crea barreras, lo que a menudo resulta una buena opción como método preventivo. Vidaud (2012).

3.1. Prueba de ajuste a una distribución normal

Tabla 28: Valores probabilísticos de resistencia a la compresión de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 en los períodos de 30; 60; 90 y 120 días

Muestras expuestas a CO_2		Valor probabilístico “P”				Estadístico de contraste “W”
		Chi-Cuadrado	Shapiro-Wilk	Sesgo	Curtosis	
Sin recubrimiento	30 días	0,459943	0,143950	0,553296	-	0,911624
	60 días	0,325706	0,317678	0,492351	-	0,935051
	90 días	0,778723	0,844470	0,763995	-	0,971599
	120 días	0,145353	0,403693	0,518736	-	0,942591

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)
W = Coeficiente estadístico de contraste

De la tabla 28, se deduce que las muestras de concreto sin recubrimiento expuestas a CO_2 , en los periodos de 30, 60, 90 y 120 días cumplieron con una distribución normal, ningún valor probabilístico de P resultó menor a 0,05 y los valores de W están cercanos a la unidad y son mayores a 0,5.

Los valores estadísticos se encuentran en el rango de -2 a +2 por lo que no existe desviaciones a la normalidad; en este caso, los valores para las muestras sometidas a CO_2 en los períodos de 30, 60, 90 y 120 días, el sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal.

Debido a que el valor -P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor o igual a 0,05 no se puede rechazar la idea de que el esfuerzo de rotura, proviene de una distribución normal con 95% de confianza, cumpliendo con la rigurosidad requerida.

3.2. Variable aleatoria “Z” de la resistencia a compresión de muestras sin recubrimiento.

Valores de “Z” para cada una de las muestras de concreto sin recubrimiento establecidos con sus respectivos gráficos de rango de aceptación e histogramas de frecuencias.

Tabla 29. Valores de “Z” para la resistencia a compresión de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂, por 30 días

Muestra	Z	Esf. Rot (kg/cm ²)
M-31-SR	1,55725	266,58
M-32-SR	-1,0882	255,36
M-33-SR	0,18045	260,74
M-34-SR	0,83861	263,53
M-35-SR	0,61357	262,58
M-36-SR	-0,3846	258,35
M-37-SR	1,73191	267,32
M-38-SR	-0,3021	258,70
M-39-SR	-1,1626	255,05
M-40-SR	-0,1299	259,43
M-41-SR	-0,2658	258,85
M-42-SR	-0,479	257,95
M-43-SR	-1,9727	251,61
M-44-SR	0,6628	262,79
M-45-SR	0,20038	260,83

Tabla 30. Valores de “Z” para la resistencia a compresión de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂, por 60 días

Muestra	Z	Esf. Rot (kg/cm ²)
M-61-SR	1,36943	261,36
M-62-SR	0,71888	258,00
M-63-SR	-1,0731	248,75
M-64-SR	1,25957	260,79
M-65-SR	-0,7359	250,49
M-66-SR	-0,467	251,88
M-67-SR	-0,4501	251,97
M-68-SR	1,52686	262,17
M-69-SR	-1,5922	246,07
M-70-SR	0,02059	254,39
M-71-SR	1,30073	261,00
M-72-SR	-0,2263	253,12
M-73-SR	-0,7596	250,37
M-74-SR	-0,044	254,06
M-75-SR	-0,8479	249,91

Tabla 31. Valores de “Z” para la resistencia a compresión de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂, por 90 días

Muestra	Z	Esf. Rot (kg/cm ²)
M-91-SR	-0,0534	243,06
M-92-SR	1,59314	250,74
M-93-SR	-0,9219	239,00
M-94-SR	1,74016	251,42
M-95-SR	-0,7607	239,76
M-96-SR	-0,6587	240,23
M-97-SR	-1,3309	237,10
M-98-SR	0,39563	245,15
M-99-SR	-0,778	239,68
M-100-SR	-0,2458	242,16
M-101-SR	-0,6888	240,09
M-102-SR	-0,0884	242,89
M-103-SR	1,7256	251,35
M-104-SR	0,54219	245,83
M-105-SR	-0,4702	241,11

Tabla 32. Valores de “Z” para la resistencias a compresión de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂, por 120 días

Muestra	Z	Esf. Rot (kg/cm ²)
M-121-SR	1,21451	245,10
M-122-SR	1,43208	245,99
M-123-SR	0,72177	243,09
M-124-SR	0,44779	241,97
M-125-SR	0,37801	241,69
M-126-SR	-1,8279	232,70
M-127-SR	-1,5233	233,94
M-128-SR	-0,1105	239,70
M-129-SR	-0,888	236,53
M-130-SR	-0,7489	237,10
M-131-SR	-0,6922	237,33
M-132-SR	0,72461	243,10
M-133-SR	-0,4326	238,38
M-134-SR	1,17398	244,94
M-135-SR	0,13057	240,68

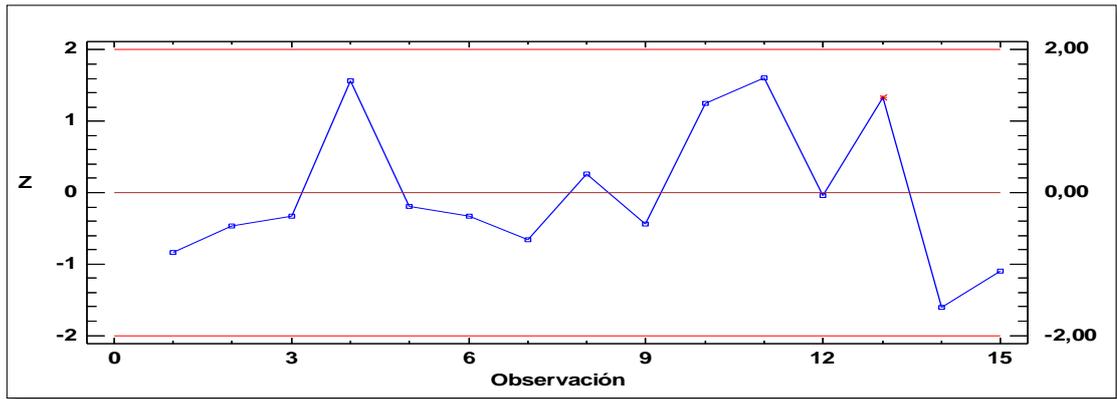


Figura 30. Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 30 días a CO₂ sin recubrimiento

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Líneas rojas rangos superior e inferior

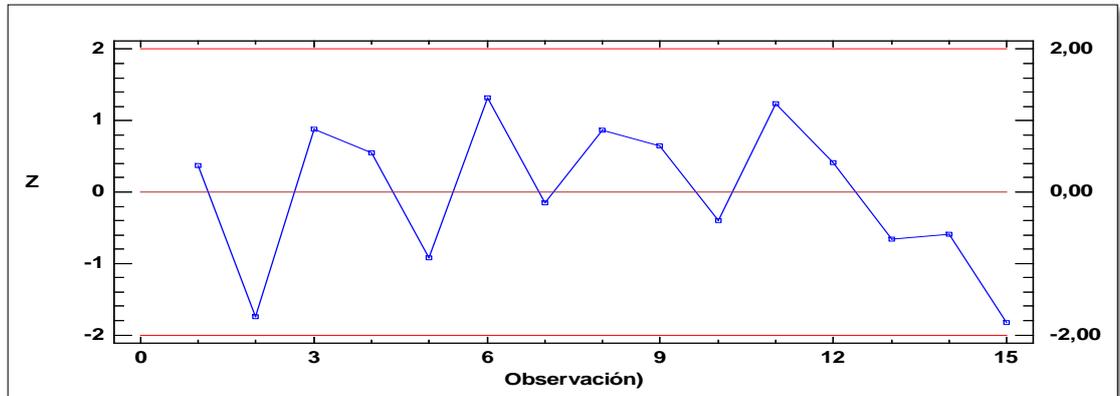


Figura 31. Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 60 días a CO₂ sin recubrimiento

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Líneas rojas rangos superior e inferior

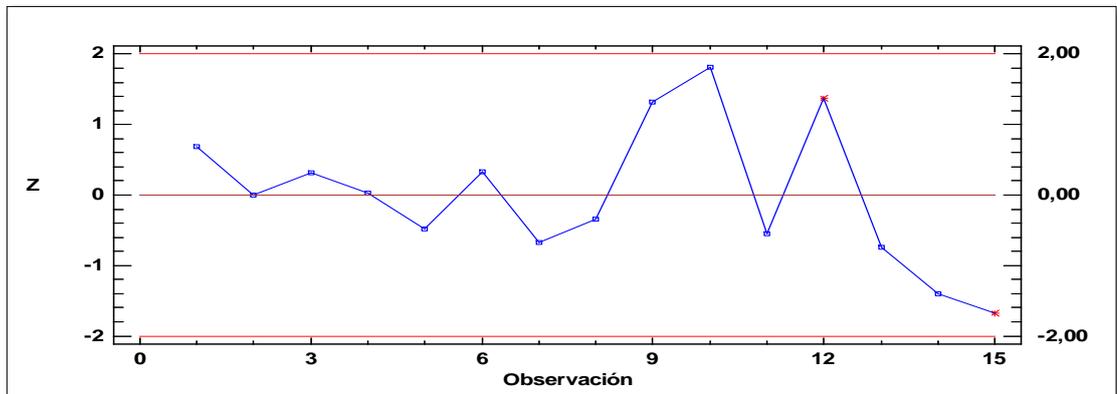


Figura 32. Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 90 días a CO₂ sin recubrimiento

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Líneas rojas rangos superior e inferior

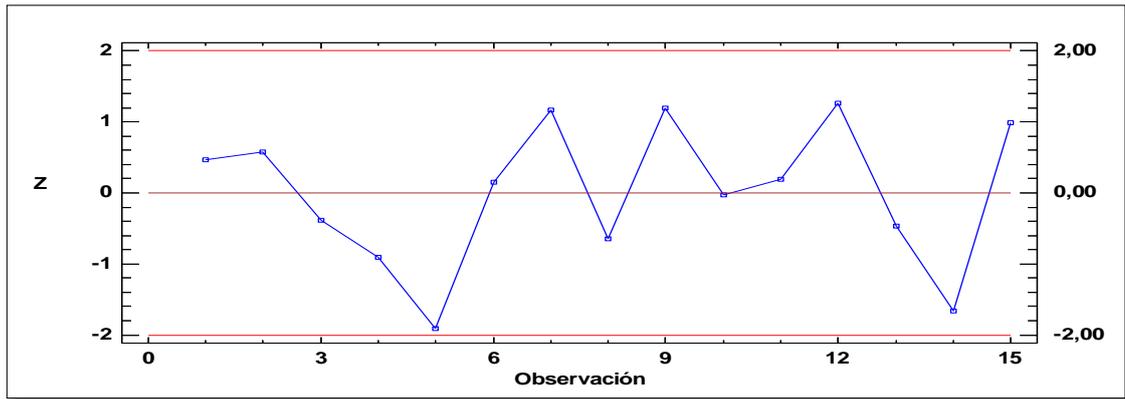


Figura 33. Diagrama de dispersión de los valores “Z” de muestras de concreto, expuestas 120 días a CO₂ sin recubrimiento

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Líneas rojas rangos superior e inferior

En las tablas 29, 30, 31, 32 y figuras 30, 31, 32, 33, se observó el rango de aceptación se encontró en -2 a 2; por lo que todos los datos presentados para estos casos son aceptados estadísticamente.

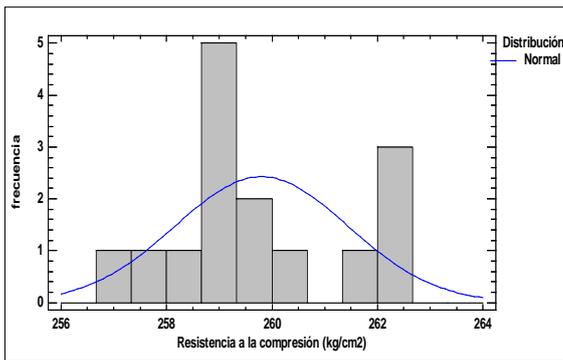


Figura 34. Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 30 días a CO₂ sin recubrimiento

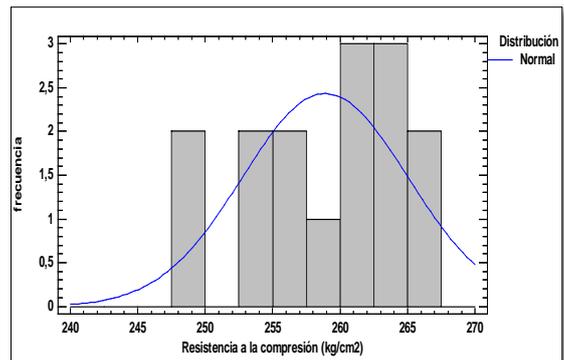


Figura 35. Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 60 días a CO₂ sin recubrimiento

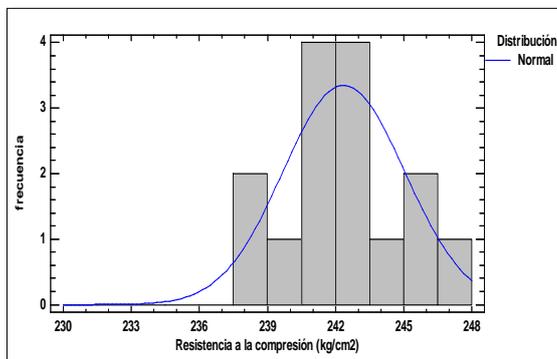


Figura 36. Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 90 días a CO₂ sin recubrimiento
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

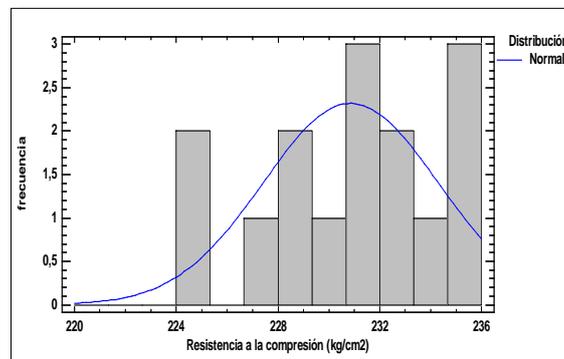


Figura 37. Histograma de frecuencias para la resistencia a la compresión de muestras expuestas 120 días a CO₂ sin recubrimiento
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

En los histogramas de las figuras 34, 35, 36, 37, para las muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, en los períodos de 30, 60, 90 y 120 reflejan, que los datos se ajustan a una Campana de Gauss (Curva de Distribución Normal). Estableciendo que los datos del estudio son totalmente válidos estadísticamente lo que da solidez al estudio realizado.

3.3. Estadística descriptiva

Tabla 33. Parámetros estadísticos de la resistencia a la compresión de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂ en los diferentes períodos de estudio

Parámetros Estadísticos	Muestras de concreto expuestas a CO ₂ recubiertas con aditivo			
	30 días	60 días	90 días	120 días
Datos	15	15	15	15
Media	259,801	258,892	242,364	230,854
Desviación Estándar	1,64587	6,14683	2,67879	3,43986
Coefficiente de Variación Porcentual	0,633512%	2,37428%	1,10528%	1,49006%
Mínimo	257,155	247,7	237,889	224,294
Máximo	262,437	267,013	247,239	235,205
Error de Estimación	0,911453	3,40401	1,48347	1,90493
Intervalo de Confianza (Media ± Error de Estimación)	257,155	255,488	240,880	228,949
	262,437	262,296	243,847	232,759

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

En la tabla 33 muestra diferentes parámetros estadísticos, como la media o promedio de los datos la que nos indica que tomando como punto de comparación el f'c de diseño (210 kg/cm²) o muestra patrón, luego de haber sido sometidas las muestras a inducción de CO₂; a los 30 días la resistencia a compresión se incrementó, luego fue decreciendo paulatinamente; además es importante anotar que según los coeficientes de variación obtenidos que no superan el 2.5%, que se trata de un estudio realizado en laboratorio en el que se ha efectuado en un buen a excelente grado de control en los diferentes ensayos.

4. Comparativo de la resistencia a compresión de las muestras de concreto.

4.1. Comparativo de la resistencia a la compresión: muestra patrón versus muestras recubiertas con Chema Seal®, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio

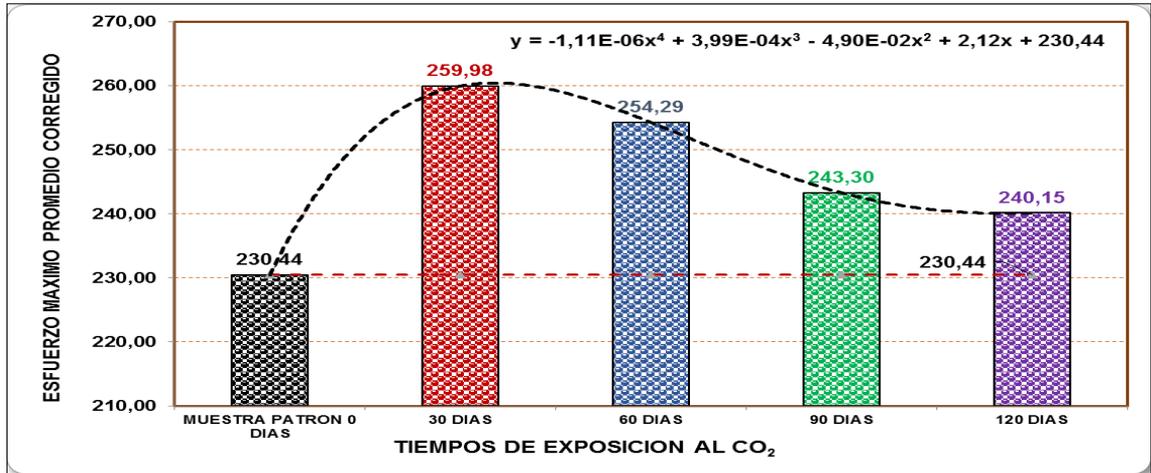


Figura 38. Comparativo de resistencia a compresión de la muestra patrón versus muestras recubiertas con Chema Seal®, expuestas a CO₂ en los diferentes períodos de estudio

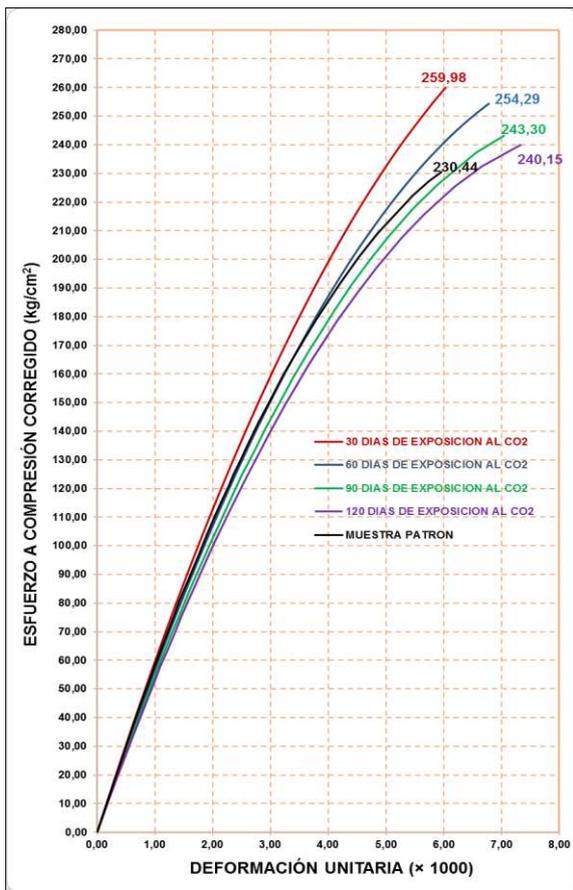


Figura 39. Curvas esfuerzo-deformación promedio máx. de las muestras recubiertas con aditivo, en los diferentes períodos de estudio
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

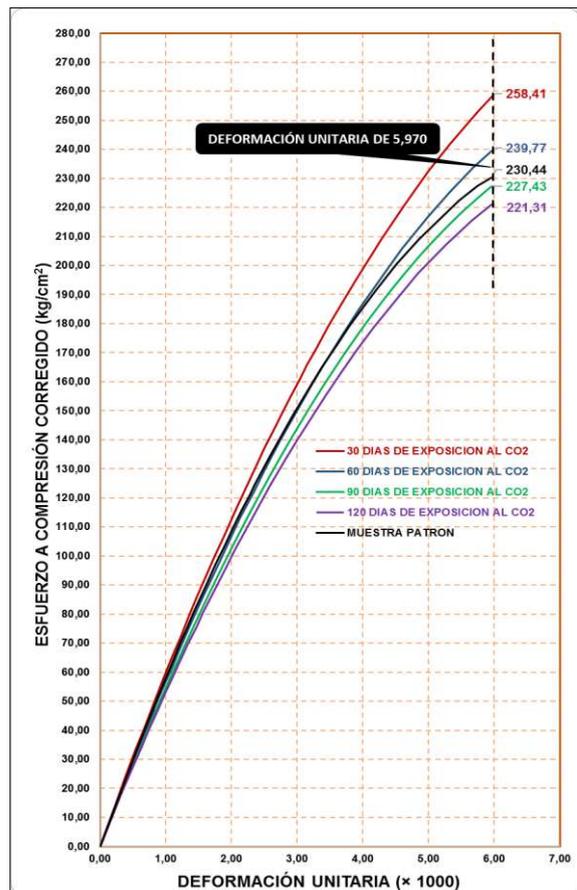


Figura 40. Curvas esfuerzo-deformación promedio en el punto de máx. Inflexión de las muestras, recubiertas con aditivo, para los diferentes períodos de estudio
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Las figuras 38, 39 y 40, mostraron con claridad la tendencia que tiene la resistencia a la compresión de las muestras recubiertas con aditivo, que permanecieron en un ambiente hermético expuestos a $CO = 1,53\%$ y $CO+CO_2 = 3,57\%$, en los diferentes períodos de estudio en función a la línea base que es la muestra patrón; el mismo que inicialmente tiene una tendencia creciente, producto de la película generada por el recubrimiento con aditivo resistente a la intemperie (Chema Seal®), sumado a ello la adhesión de los gases y de las reacciones químicas que en la hidratación del concreto que se presentan, especialmente en la superficie de las muestras. El primero, ocupando los poros y microporos que el concreto comúnmente presenta, haciéndolo más compacto, aumentando su resistencia. El segundo por el calor generado por las emisiones de CO_2 , la humedad relativa, contenido de humedad presente en los agregados, el concreto continua fraguando progresivamente prolongando el denominado “fraguado final” el mismo que incrementó la resistencia.

Posteriormente las acciones mecánicas, física y químicas antes descritas a las que está sometido el concreto por la inducción del $CO + CO_2$, por períodos más prolongados, generan que el pH llegue a niveles inferiores a 9,5 (pH concreto nuevo 12 a 13). El concreto en estas condiciones de precariedad alcalina se conoce como “Concreto carbonatado”, el mismo que hace que el concreto pierda progresivamente su resistencia, describiendo una función polinómica de cuarto orden $Y = -1,11E^{-06} X^4 + 3,99E^{-04} X^3 - 4,90E^{-02} X^2 + 2,12 X + 230,44$.

En la figura (40) con el corte en el punto de máxima inflexión o límite de falla de la muestra patrón, permitió comparar los estados de la resistencia a la compresión con respecto al tiempo de exposición llegando a incrementarse a límites superiores a la línea base y conforme aumenta el tiempo de exposición al $CO+CO_2$, llega a límites inferiores.

4.2. Comparativo de la resistencia a compresión de muestra patrón versus muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, en diferentes períodos de estudio

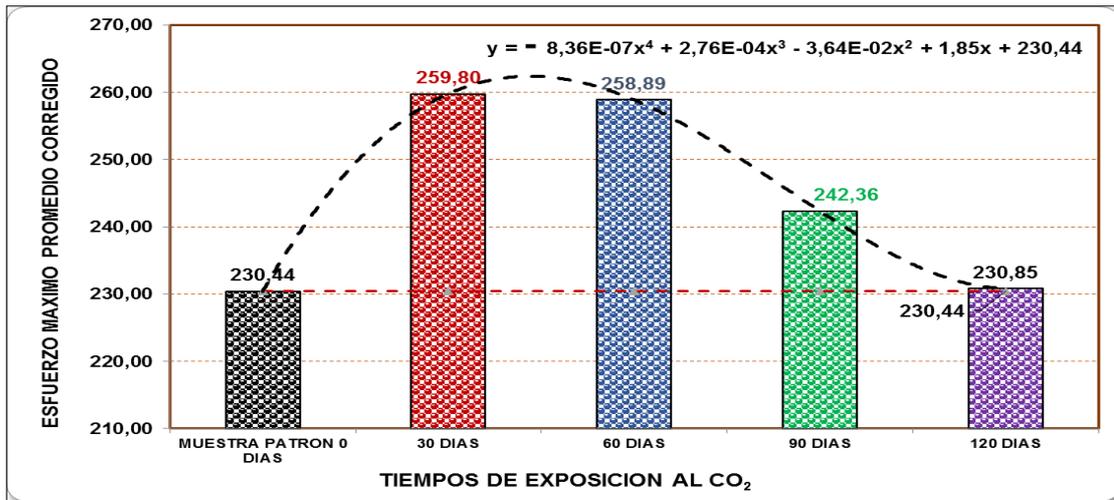


Figura 41. Comparativo de resistencia a compresión de la muestra patrón versus muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio

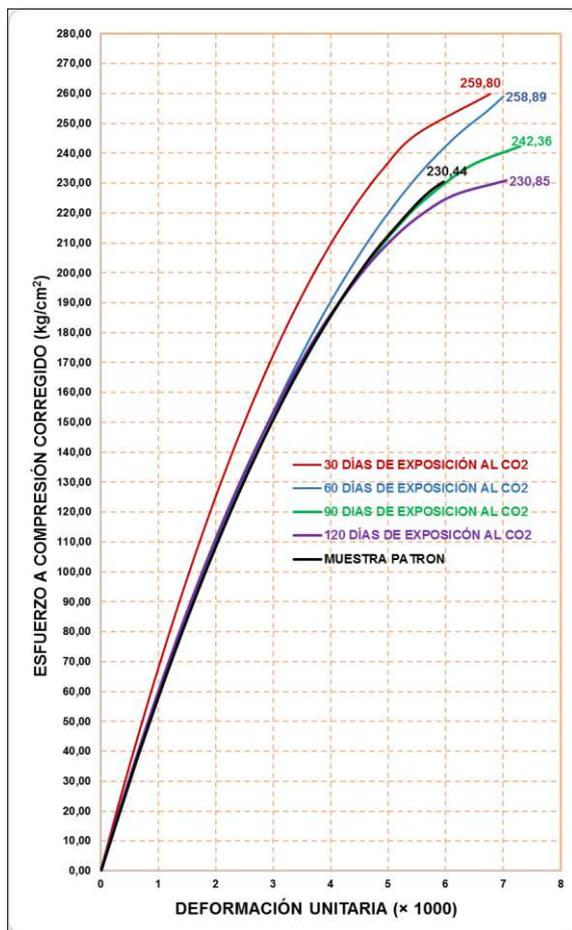


Figura 42. Curvas esfuerzo-deformación promedio máximo, de las muestras sin recubrimiento, en los diferentes períodos de estudio
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

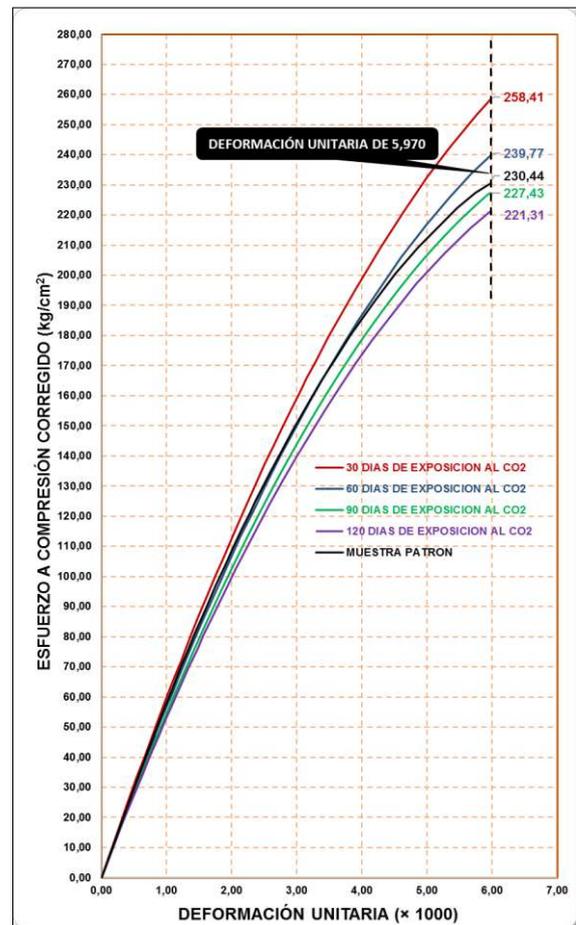


Figura 43. Curvas esfuerzo-deformación promedio en el punto de máxima Inflexión de las muestras, sin recubrimiento, en los diferentes períodos de estudio.
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

El mismo efecto que en las muestras con recubrimiento se produjo en las muestras sin recubrimiento como se puede observar en las figuras 41, 42 y 43, con la diferencia que el decremento de la resistencia es mayor debido a que el concreto en este caso no cuenta con una capa de recubrimiento que de alguna forma proteja de agentes externos, el efecto describió la ecuación: $Y = - 8,36E^{-07} X^4 + 2,76E^{-04} X^3 - 3,64E^{-02} X^2 + 1,85 X + 230,44$.

En los artículos científicos: Acción del CO₂ sobre un cemento portland (Gaspar & Muñoz, 1977), los autores describen el comportamiento de la resistencia mecánica a flexión del concreto carbonatado, el mismo que en un inicio se incrementó, posteriormente a mayor tiempo carbonatación la resistencia fue decreciendo; en el estudio “Nuevo metamodelo para calcular la profundidad del frente de carbonatación en estructuras de concreto” Van et al. (2017), hacen referencia sobre la resistencia a compresión del concreto a los 28 días, el que incrementó en sus en su etapa inicial de carbonatación; en el estudio: Carbonatación acelerada de morteros: Influencia de las adiciones minerales y la edad de curado (Iloro, Sota, & Ortega, 2013), afirman que la resistencia a compresión de todos los morteros se incrementa con la edad de curado; en la publicación de la revista “Construcción y tecnología en concreto”: La carbonatación (Vidaud, 2012), hace alusión al producto Chema Seal® utilizado en el presente estudio, que su empleo crea barreras, lo que a menudo resulta una buena opción como método de protección preventivo.

Con el corte efectuado en el punto de máxima inflexión o límite de falla de la muestra patrón (figura 43), se logró comparar y apreciar mejor los estados de la resistencia a la compresión con respecto al tiempo de exposición llegando a incrementarse a límites superiores a la línea base y conforme aumenta el tiempo de exposición al CO+CO₂, llega a límites inferiores.

4.3. Comparativo entre muestras con aditivo versus muestras sin aditivo en los diferentes tiempos de exposición al CO₂

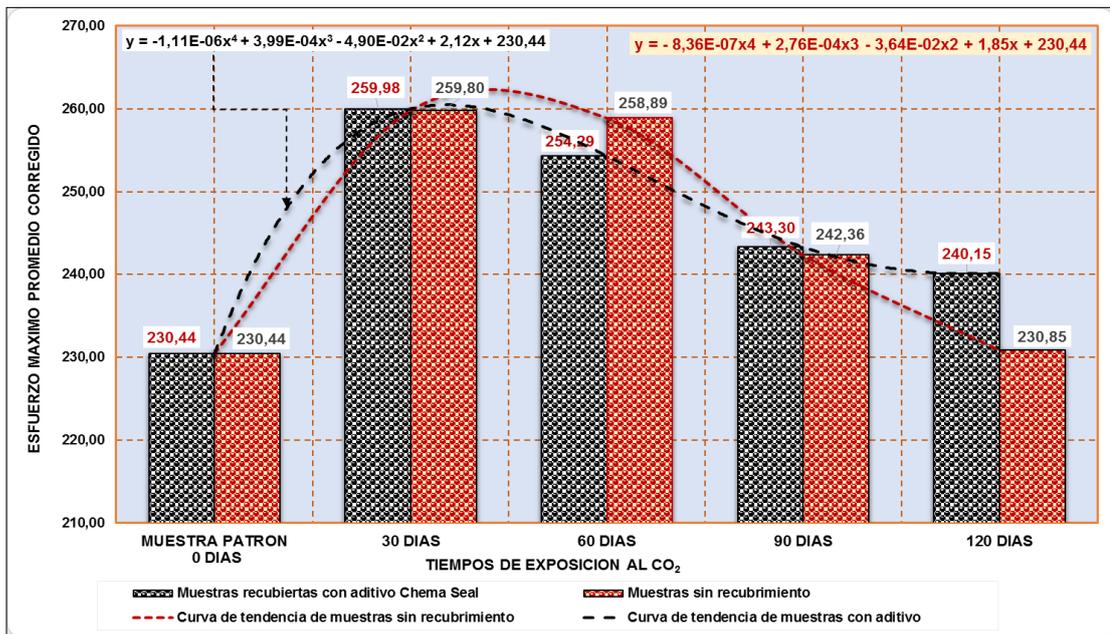


Figura 44. Comparativo de resistencia a compresión de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, entre muestras recubiertas y no recubiertas con aditivo, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio

En la figura 44 se muestra que ante el mismo tiempo de exposición a CO₂, en el mismo espacio hermético y en el mismo período de estudio, entre las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal® y las no recubiertas, el efecto de carbonatación tiene mayor implicancia en la resistencia a la compresión en las muestras que no cuentan con ningún tipo de recubrimiento, por estar con mayor disponibilidad de exposición ante acciones de agentes externos.

F. Profundidad de carbonatación de muestras

1. Profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, recubiertas con aditivo Chema Seal® expuestas a CO₂, en períodos de 30, 60, 90 y 120 días

Del test de fenolftaleína aplicado a las muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ recubiertas con aditivo Chema Seal® expuestas a CO₂ 30, 60, 90 y 120 días se obtuvo la profundidad de carbonatación medido con vernier.

Tabla 34. Profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, recubiertas con aditivo Chema Seal® expuestas a CO_2 , en los diferentes períodos de estudio

Días de exposición a CO_2	Profundidad de carbonatación (mm)
30	0,00
60	0,00
90	0,00
120	0,96

La tabla 34. Muestra que para un rango de 90 días de exposición continua a CO_2 del concreto en un ambiente hermético, no se presenta el efecto de carbonatación por lo que la profundidad de la misma es cero, ello debido a que la película de recubrimiento con aditivo Chema Seal® colocado a las muestras de concreto ha sido esta una barrera cumpliendo su función, pero hasta determinado tiempo, pues posteriormente esta barrera es vulnerable y permite dar inicio al efecto de carbonatación acelerada.

1.1. Prueba de ajuste a una distribución normal

Tabla 35. Valores probabilísticos de la profundidad de carbonatación de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO_2 en los períodos de 30; 60; 90 y 120 días

Muestras expuestas a CO_2	Valor probabilístico "P"				Estadístico de contraste "W"
	Chi-Cuadrado	Shapiro-Wilk	Sesgo	Curtosis	
Recubiertas con aditivo	30 días	0,0	0,0	0,0	0,0
	60 días	0,0	0,0	0,0	0,0
	90 días	0,0	0,0	0,0	0,0
	120 días	0,221311	0,166803	0,422056	-

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

W = Coeficiente estadístico de contraste

En las muestras de 30, 60 y 90 días no existió avance en la profundidad de carbonatación

De la tabla 35 se observa que las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO_2 en los períodos de 30, 60, 90 días, los valores probabilísticos de P son cero por no existir profundidad de carbonatación, pero a 120 días de exposición las muestras cumplen con una distribución normal, ningún valor probabilístico de P resultó menor a 0,05 y los valores de W se encontraron cercanos a la unidad y son mayores a 0,5.

El valor estadístico para la muestra a 120 días de exposición se encontró en el rango de -2 a +2, por lo que en este caso, los valores para las muestras de sometidas a CO₂ en los períodos de 120 días el sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal.

Debido a que el valor -P más pequeño de la prueba realizada es mayor o igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que esfuerzo de rotura para las muestras expuestas a 120 días proviene de una distribución normal con 95% de confianza, hecho que demuestra el cumplimiento con la rigurosidad necesaria para este tipo de estudios.

Estos efectos no han podido ser comparados numéricamente con las investigaciones realizadas que han sido tomadas como antecedentes, debido a que no se han efectuado estudios netamente comparativos de la carbonatación del concreto con aplicación de aditivos, sino más bien comparaciones entre carbonatación acelerada y natural.

1.2. Variable aleatoria “Z” de la profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo

Se realizó el análisis en las muestras expuestas a 120 días a CO₂, por ser las únicas que cuentan con profundidad de carbonatación.

Valores de “Z” para cada una de las muestras, ya establecidos con sus respectivos gráficos de rango de aceptación e histogramas de frecuencias.

Tabla 36. Valores de “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo, expuestas a CO₂, 120 días

Muestra	Z	Prof. de carb. Prom. (mm)
M-106-CR	-0,1001	0,950
M-107-CR	1,9637	1,133
M-108-CR	0,0876	0,967
M-109-CR	-0,4753	0,917
M-110-CR	-0,4753	0,917
M-111-CR	0,2752	0,983
M-112-CR	-0,6629	0,900
M-113-CR	-0,2877	0,933
M-114-CR	-1,7886	0,800
M-115-CR	1,9637	1,133
M-116-CR	0,0876	0,967
M-117-CR	-0,4753	0,917
M-118-CR	0,0876	0,967
M-119-CR	0,8380	1,033
M-120-CR	-1,0381	0,867

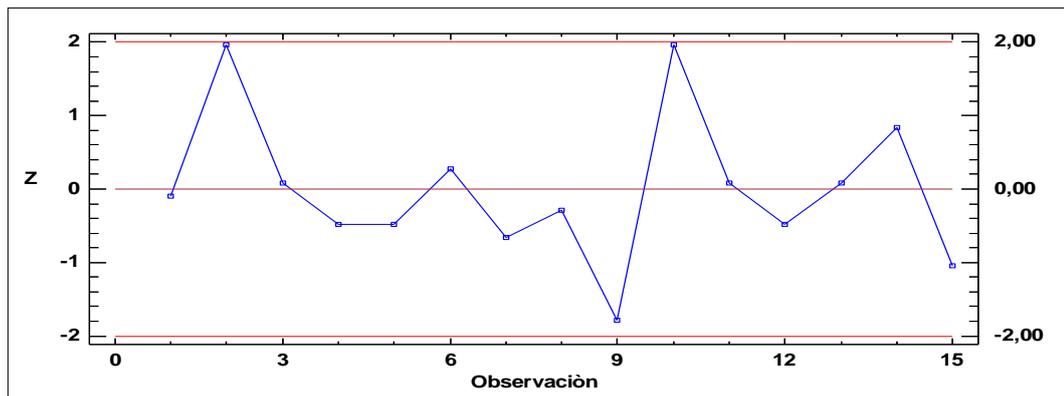


Figura 45. Diagrama de dispersión de los valores “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 120 días a CO₂ recubiertas con aditivo
 Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)
 Líneas rojas rangos superior e inferior

En la tabla 36 y en la figura 45, se observa el rango de aceptación que va desde -2 a 2 en que están comprendidos los puntos o ensayos definitivos; por lo que todos los datos presentados para estos casos son aceptados estadísticamente.

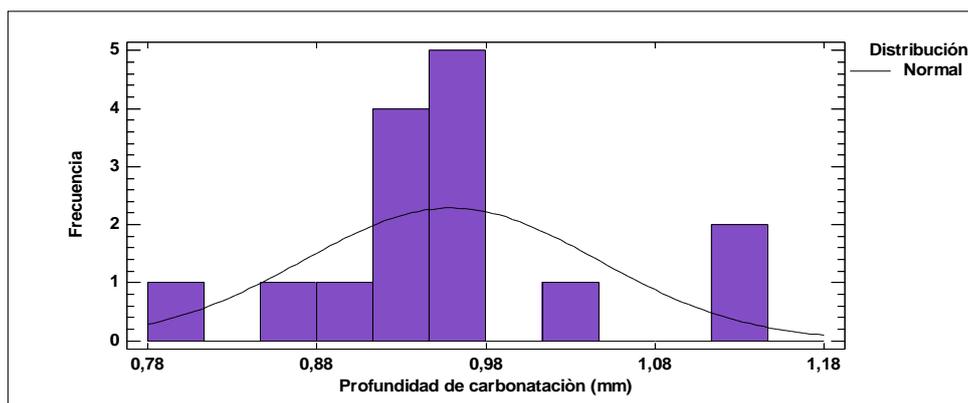


Figura 46. Histograma de frecuencias para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas por un período de 120 días a CO₂, recubiertas con aditivo Chema Seal
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

El histograma (figura 46) para las muestras expuestas a CO₂, 120 días refleja, que los datos se ajustan a una Campana de Gauss (Curva de distribución normal).

1.3. Estadística descriptiva

Tabla 37. Parámetros estadísticos de la profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio

Parámetros Estadísticos	Prof. de carbonatación de muestras expuestas a CO ₂ recubiertas con aditivo			
	30 días	60 días	90 días	120 días
Datos	15	15	15	15
Media	0.00	0.00	0.00	0,959
Desviación Estándar	0.00	0.00	0.00	0,087
Coefficiente de Variación Porcentual	0.00	0.00	0.00	9,091%
Mínimo	0.00	0.00	0.00	0,8
Máximo	0.00	0.00	0.00	1,13
Error de Estimación	0.00	0.00	0.00	0.0482
Intervalo de Confianza	0.00	0.00	0.00	0,9110
(Media ± Error de Estimación)	0.00	0.00	0.00	1,0076

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

La tabla 37, ilustra los parámetros estadísticos, entre ellos la media o promedio de los datos de la profundidad de carbonatación del concreto recubierto con aditivo, en sus diferentes periodos de tiempo de exposición al CO₂, el mismo que hasta por un periodo de 30 días fue cero y luego fue incrementándose paulatinamente de acuerdo al tiempo de exposición, es importante anotar que según los coeficientes de variación obtenidos es cero para el lapso de 90 días de exposición a CO₂, y de 9%, para el caso de 120 días, ello porque las lecturas se tomaron en 06 puntos diferentes de las muestras y la profundidad

de carbonatación no es uniforme en todo su por la textura y porosidad, pero que en laboratorio se ha contado con un buen grado de control en las diferentes mediciones.

2. Profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ sin recubrimiento, expuestas a CO_2 , en períodos de 30, 60, 90 y 120 días

Del test de fenolftaleína aplicado a las muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ sin recubrimiento expuestas a CO_2 30, 60, 90 y 120 días se obtuvo la profundidad de carbonatación medido con vernier, los resultados se muestran en la tabla 38.

Tabla 38. Profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, sin recubrimiento expuestas a CO_2 , en los diferentes períodos de estudio

Días de exposición a CO_2	Profundidad de carbonatación (mm)
30	2,09
60	2,75
90	3,46
120	3,80

En tabla 38, el efecto de carbonatación en el concreto sin recubrimiento expuesto a CO_2 , desde su inicio causó daño pues este fue progresivo en función del tiempo hasta su degradación.

2.1. Prueba de ajuste a una distribución normal

Tabla 39. Valores probabilísticos de la profundidad de carbonatación de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO_2 en los períodos de 30; 60; 90 y 120 días

Muestras expuestas a CO_2		Valor probabilístico "P"				Estadístico de contraste "W"
		Chi-Cuadrado	Shapiro-Wilk	Sesgo	Curtosis	
Sin recubrimiento	30 días	0,459943	0,386805	0,254973	-	0,941219
	60 días	0,0578621	0,196466	0,507089	-	0,920664
	90 días	0,145353	0,103361	0,612616	-	0,902103
	120 días	0,617389	0,191107	0,394301	-	0,919854

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

W = Coeficiente estadístico de contraste

2.2. Variable aleatoria "Z" de la profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento

Se realizó el análisis de profundidad de carbonatación de las muestras sin recubrimiento, expuestas a CO_2 , en los diferentes períodos de estudio

Tabla 40. Valores de “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, 30 días

Muestra	Z	Prof. de carb. Prom. (mm)
M-31-SR	-0,4559	1,883
M-32-SR	0,0221	2,100
M-33-SR	0,4265	2,283
M-34-SR	0,2059	2,183
M-35-SR	-0,2353	1,983
M-36-SR	-0,6765	1,783
M-37-SR	-0,5662	1,833
M-38-SR	-0,0147	2,083
M-39-SR	1,1618	2,617
M-40-SR	0,3529	2,250
M-41-SR	-0,1985	2,000
M-42-SR	-0,3824	1,917
M-43-SR	0,2426	2,200
M-44-SR	-0,1985	2,000
M-45-SR	0,1691	2,167

Tabla 41. Valores de “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, 60 días

Muestra	Z	Prof. de carb. Prom. (mm)
M-61-SR	-1,2729	2,183
M-62-SR	0,0349	2,767
M-63-SR	1,1559	3,267
M-64-SR	0,5954	3,017
M-65-SR	-0,0399	2,733
M-66-SR	-1,4224	2,117
M-67-SR	-1,6092	2,033
M-68-SR	0,2591	2,867
M-69-SR	1,3801	3,367
M-70-SR	0,5954	3,017
M-71-SR	-0,0025	2,750
M-72-SR	-0,0025	2,750
M-73-SR	0,6327	3,033
M-74-SR	-0,1146	2,700
M-75-SR	-0,1893	2,667

Tabla 42. Valores de “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, 90 días

Muestra	Z	Prof. de carb. Prom. (mm)
M-91-SR	-0,1171	3,300
M-92-SR	-0,9011	2,817
M-93-SR	0,9371	3,950
M-94-SR	-0,82	2,867
M-95-SR	1,0723	4,033
M-96-SR	-0,1712	3,267
M-97-SR	-0,0631	3,333
M-98-SR	1,5588	4,333
M-99-SR	1,2615	4,150
M-100-SR	0,0721	3,417
M-101-SR	1,0723	4,033
M-102-SR	-0,2523	3,217
M-103-SR	-0,0631	3,333
M-104-SR	-0,5875	3,010
M-105-SR	-0,9011	2,817

Tabla 43. Valores de “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, 120 días

Muestra	Z	Prof. de carb. Prom. (mm)
M-121-SR	-0,1656	3,783
M-122-SR	-0,8634	3,367
M-123-SR	-0,8913	3,350
M-124-SR	-1,2765	3,120
M-125-SR	1,0346	4,500
M-126-SR	-0,2773	3,717
M-127-SR	-0,1377	3,800
M-128-SR	1,2579	4,633
M-129-SR	-0,4391	3,620
M-130-SR	0,1972	4,000
M-131-SR	1,0904	4,533
M-132-SR	-0,2773	3,717
M-133-SR	0,0019	3,883
M-134-SR	-0,7797	3,417
M-135-SR	-0,6122	3,517

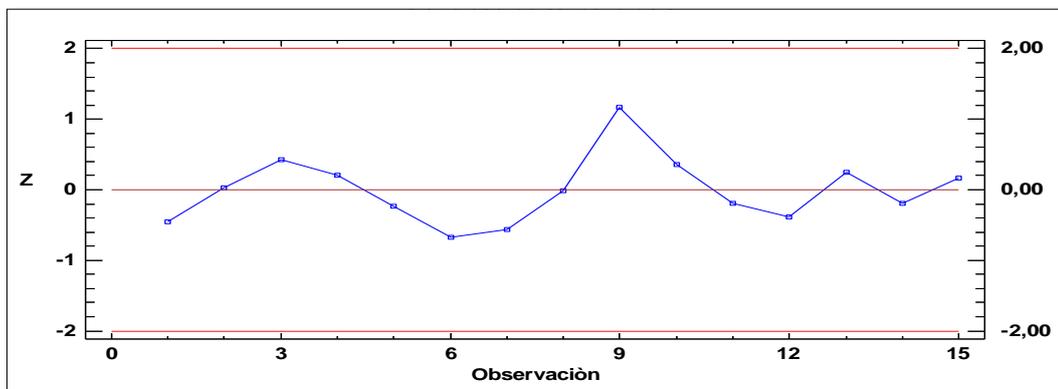


Figura 47. Diagrama de dispersión de los valores “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 30 días a CO₂ sin recubrimiento
 Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)
 Líneas rojas rangos superior e inferior

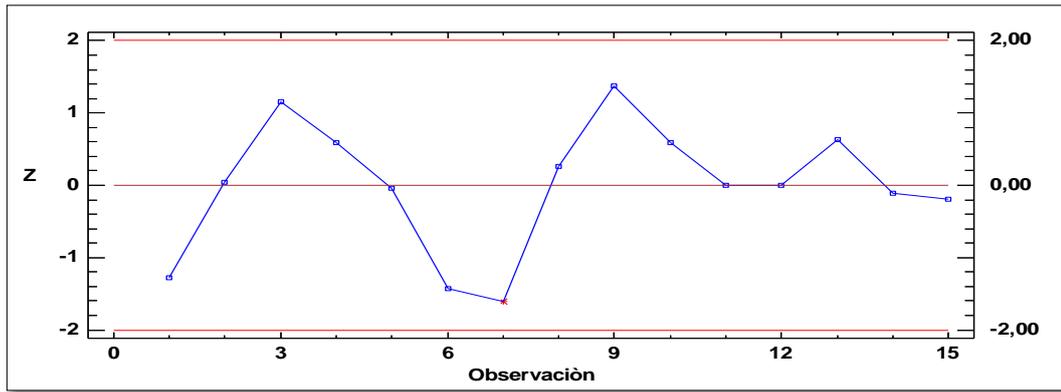


Figura 48. Diagrama de dispersión de los valores “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 60 días a CO₂ sin recubrimiento

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Líneas rojas rangos superior e inferior

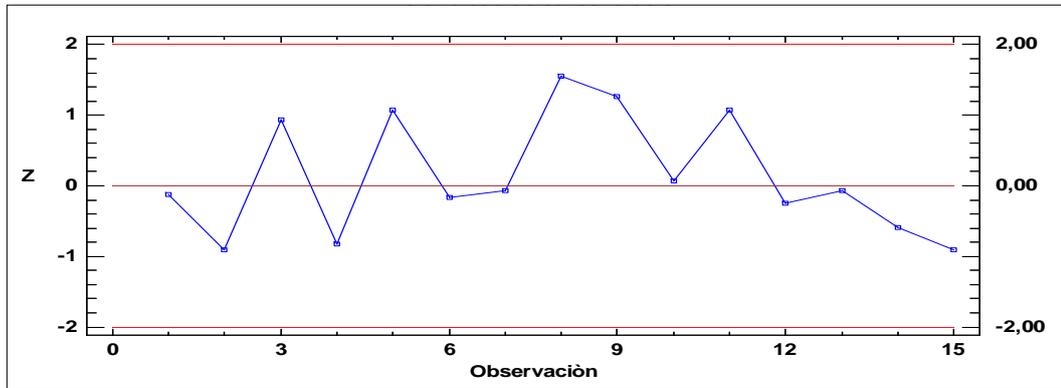


Figura 49. Diagrama de dispersión de los valores “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 90 días a CO₂ sin recubrimiento

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Líneas rojas rangos superior e inferior

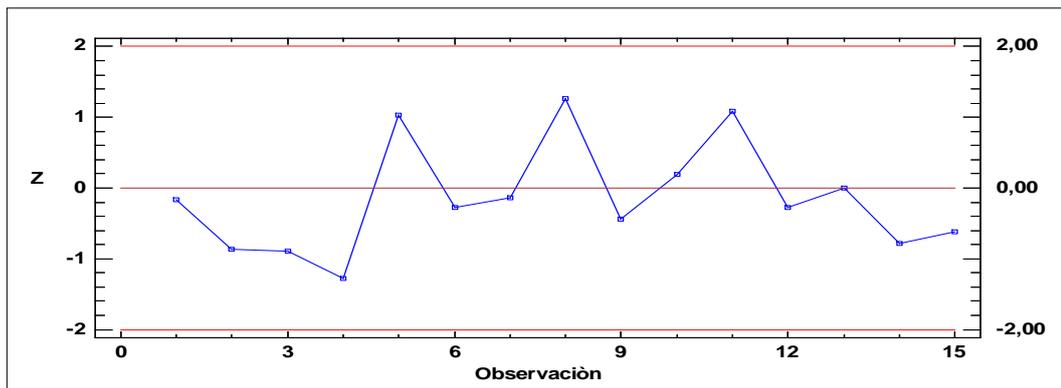


Figura 50. Diagrama de dispersión de los valores “Z” para la profundidad de carbonatación de muestras expuestas 120 días a CO₂ sin recubrimiento

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

Líneas rojas rangos superior e inferior

En las tablas 40, 41, 42, 43 y figuras 47, 48, 49, 50, se observa el rango de aceptación que va desde -2 a 2; por lo que todos los datos presentados para estos casos son aceptados estadísticamente.

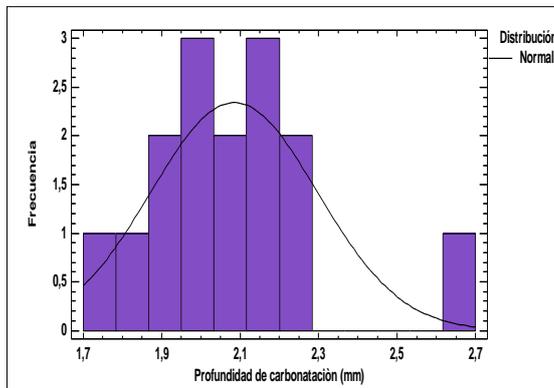


Figura 51. Histograma de frecuencias para la Profundidad de carbonatación de muestras expuestas 30 días a CO₂ sin recubrimiento

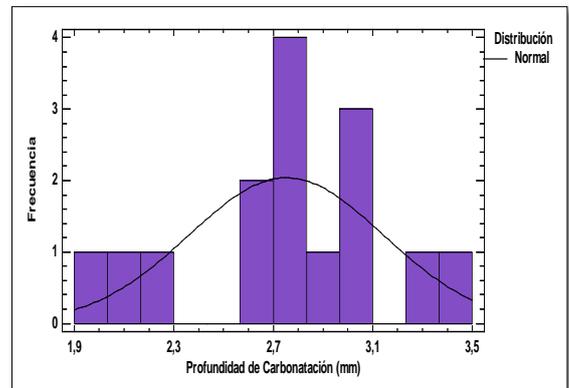


Figura 52. Histograma de frecuencias para la Profundidad de carbonatación de muestras expuestas 60 días a CO₂ sin recubrimiento

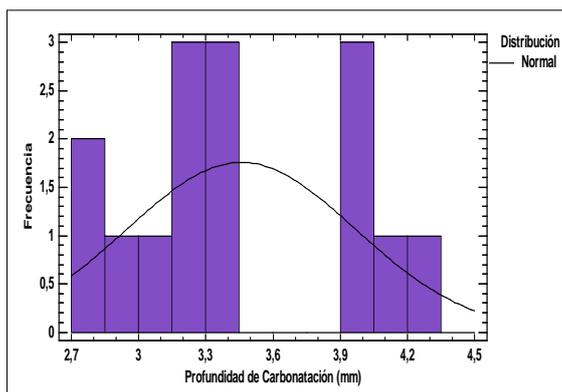


Figura 53. Histograma de frecuencias para la Profundidad de carbonatación de muestras expuestas 90 días a CO₂ sin recubrimiento
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

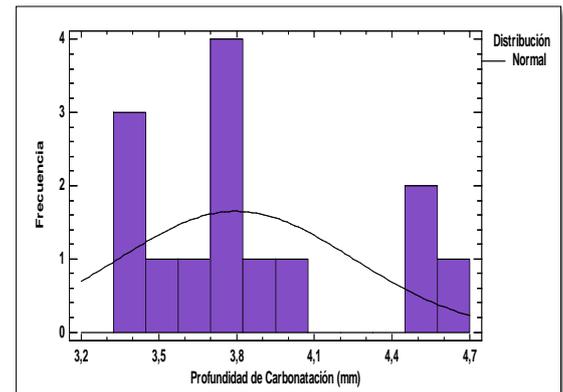


Figura 54. Histograma de frecuencias para la Profundidad de carbonatación de muestras expuestas 120 días a CO₂ sin recubrimiento
Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

En los histogramas (figuras 51, 52, 53, 54) para las muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, en los períodos de 30, 60, 90 y 120 reflejaron, que los datos se ajustan a una Campana de Gauss (Curva de distribución normal), con lo que se confirma que los datos son totalmente válidos.

2.3. Estadística descriptiva

Tabla 44. *Parámetros estadísticos de la profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio.*

Parámetros Estadísticos	Prof. de carbonatación muestras expuestas a CO ₂ recubiertas con aditivo			
	30 días	60 días	90 días	120 días
Datos	15	15	15	15
Media	2,08467	2,752	3,45867	3,79733
Desviación Estándar	0,2128	0,391265	0,510418	0,453265
Coefficiente de Variación Porcentual	10,2079%	14,2175%	14,7577%	11,9364%
Mínimo	1,78	2,03	2,82	3,12
Máximo	2,62	3,37	4,33	4,63
Error de Estimación	0,117845	0,216676	2,282661	0,251011
Intervalo de Confianza	1,96682	2,53532	3,17601	3,54632
(Media ± Error de Estimación)	2,20251	2,96868	3,74133	4,04834

Fuente: Paquete estadístico Statgraphics (2015)

La tabla 44, Evidencia los parámetros estadísticos, entre ellos la media o promedio de los datos de la profundidad de carbonatación del concreto sin recubrimiento, en sus diferentes periodos de tiempo de exposición al CO₂, el mismo que desde sus inicios tiene efectos, incrementándose paulatinamente con tiempo de exposición, los coeficientes de variación obtenidos están en el orden del 10 al 15%, esto se debió a que las lecturas de las mediciones se tomaron en 06 puntos diferentes de las muestras igual al caso anterior.

3. Comparativo de la profundidad de carbonatación de las muestras de concreto

3.1. Comparativo de la variación de la profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con Chema Seal®, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio

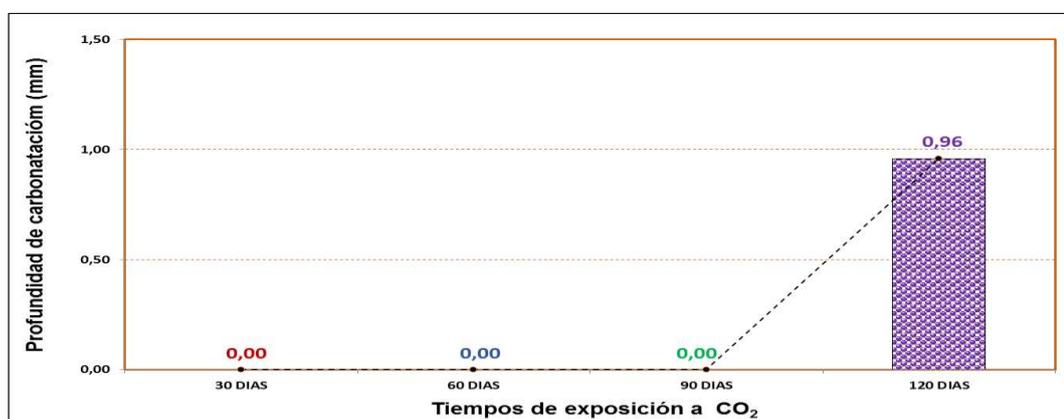


Figura 55. Variación de la profundidad de carbonatación promedio de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio

Las muestras recubiertas con aditivo expuestas a CO+CO₂, en períodos de 30, 60 y 90 días no han sufrido carbonatación, siendo la profundidad de carbonatación cero.

La figura 55, hace notar la tendencia que tiene la profundidad o avance del frente de carbonatación en las muestras recubiertas con aditivo, que permanecieron en un ambiente hermético expuestos continuamente a CO =1,53% y CO+CO₂ = 3,57%, en los diferentes período de estudio; el mismo que a los 30, 60 y 90 días no produce reacción adversa en el concreto manteniendo el pH neutro, ello debido a que el recubrimiento aplicado en la superficie con aditivo Chema Seal®, además de ser impermeabilizante superficial, su aplicación forma una capa delgada muy resistente y durable a la intemperie evitando que se produzca la carbonatación, dicha barrera como en todo producto químico tiene un tiempo máximo de efectividad. Superado los 90 días de exposición acelerada se inició la carbonatación progresiva del concreto en las muestras.

3.2. Variación de la profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio

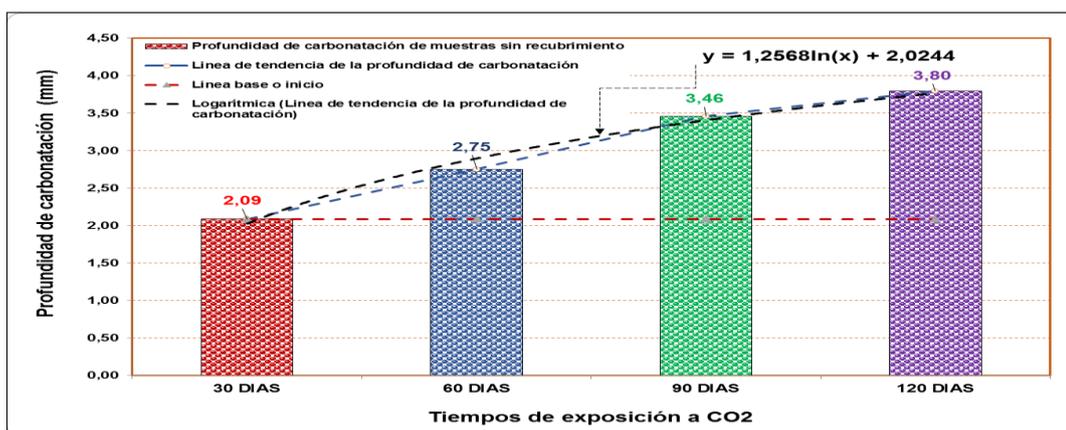


Figura 56. Variación de la profundidad de carbonatación promedio de muestras, sin recubrimiento, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio

La figura 56, refleja lo contrario al anterior lote de muestras, pues al no contar con ningún tipo de recubrimiento o protección, desde el inicio de la carbonatación acelerada el concreto se ve afectado modificando progresivamente el pH, bajándolo a niveles

inferiores a 9,5; lo que conlleva a la degradación del mismo, este efecto es descrita por la ecuación $Y = -1,2568 \ln(X) + 2,0244$.

Estos resultados son comparables a resultados plasmados en artículos científicos tales como: “Modelo y técnica para determinar el grado de carbonatación” (Fridh et al., 2014); en “Nuevo meta-modelo para calcular la profundidad del frente de carbonatación dentro de estructuras de concreto” (Van et al., 2017); “Modelo de predicción para la carbonatación del concreto basado en transferencias acopladas de iones de $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ y reacciones químicas” (Thiery et al., 2005); Estudio del grado de carbonatación en concretos utilizando un indicador de fenolftaleína y espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (Lee et al., 2012); “Efectos de la carbonatación acelerada en distintos tipos de cemento y hormigones” (Carvajal et al., 2007), entre otros, concluyendo que la manera para determinar la profundidad de carbonatación del concreto es través del test de la fenolftaleína y proponen el modelo de predicción bajo la ecuación $X = K \sqrt{T}$, que tienen bastante similitud con la ecuación del presente estudio de investigación descrita anteriormente.

3.3. Comparativo de la profundidad de carbonatación de muestra con aditivo versus muestras sin aditivo en diferentes tiempos de exposición al CO_2

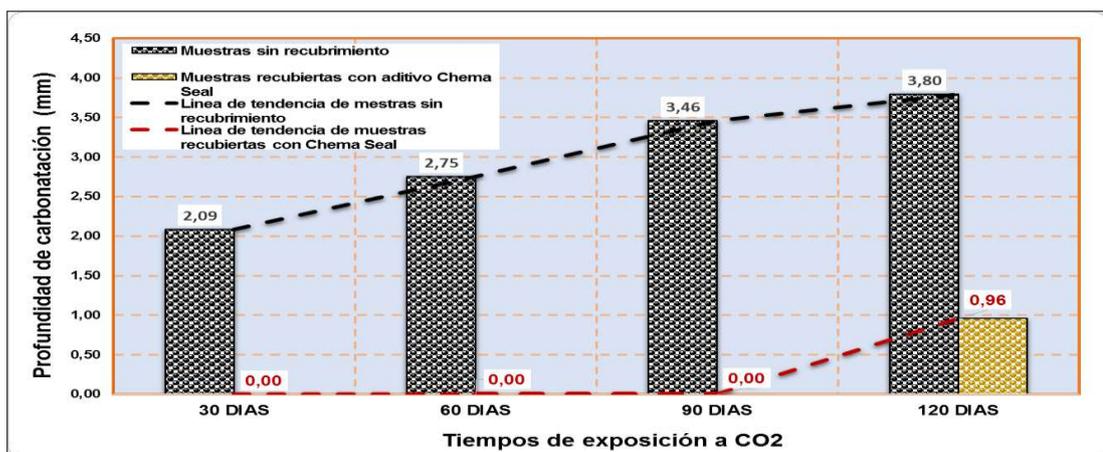


Figura 57. Comparativo de la profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, entre muestras con y sin recubrimiento con aditivo, expuestas a CO_2 , en los diferentes períodos de estudio

La figura 57, nos muestra que ante el mismo tiempo de exposición a CO₂, en el mismo espacio hermético y en el mismo período de estudio, entre las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal® y las no recubiertas, el efecto de avance en el frente de carbonatación o profundidad de carbonatación tiene mayor implicancia en las muestras que no cuentan con ningún tipo de recubrimiento, por estar con mayor disponibilidad de exposición ante acciones de agentes externos, a tal punto que en un período de 90 días de exposición continua no muestran ningún cambio las muestras recubiertas, afirmando que el aditivo sí cumplió de buena manera el objetivo de proteger al concreto ante agentes ambientales agresivos.

3.4. Comparativo de la resistencia a compresión vs profundidad de carbonatación de muestra con aditivo en diferentes tiempos de exposición al CO₂

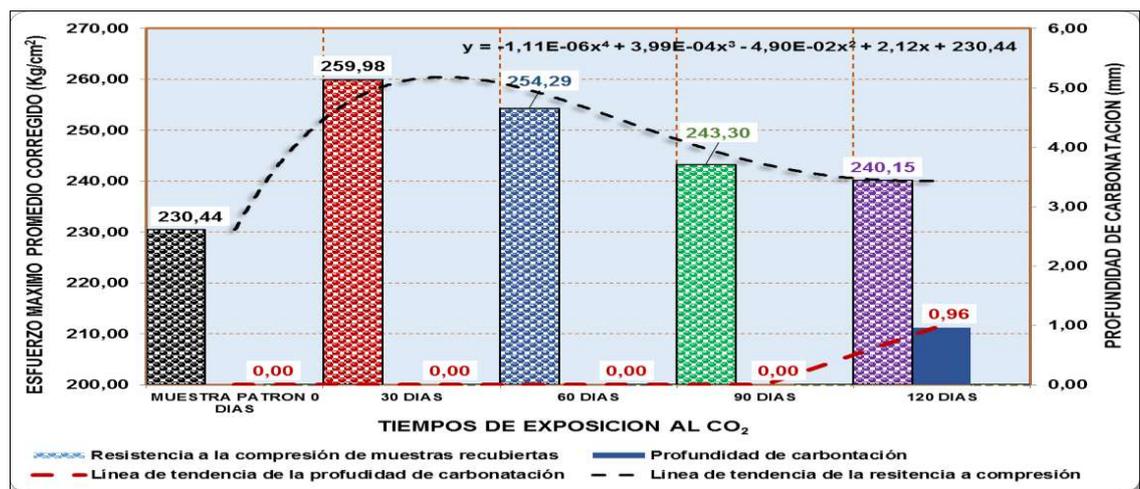


Figura 58. Comparativo de la resistencia a compresión Vs profundidad de carbonatación de muestras de concreto de f'c = 210 kg/cm², recubiertas con aditivo expuestas a CO₂, en diferentes períodos de estudio

La figura 58, ilustra la variación y la relación existente entre la resistencia a compresión del concreto y la profundidad de carbonatación en muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, en los diferentes períodos de tiempo de exposición a CO+CO₂, variando la resistencia de manera tal que describe una ecuación polinómica de cuarto orden $Y = -1,11 E^{-06} X^4 + 3,99E^{-04} X^3 - 4,90E^{-02} X^2 + 2,12 X + 230,44$ y la profundidad de carbonatación no tiene avance o no es perceptible hasta el período de

90 días, continuas emisiones por períodos mayores permiten que la barrera generada por el recubrimiento con aditivo se degrade y se dé inicio a la carbonatación del concreto.

3.5. Comparativo de la resistencia a compresión vs profundidad de carbonatación de muestra sin aditivo en diferentes tiempos de exposición al CO₂

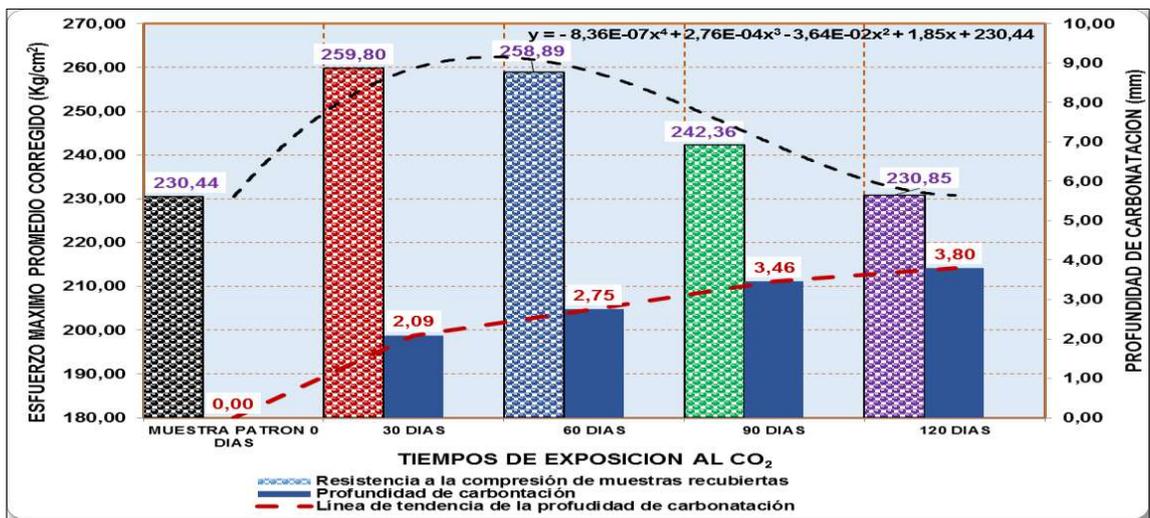


Figura 59. Comparativo de la resistencia a compresión Vs profundidad de carbonatación de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, sin recubrimiento, expuestas a CO₂, en los diferentes periodos de estudio

La figura 59, muestra la variación y la relación existente entre la resistencia a compresión del concreto y la profundidad de carbonatación en muestras sin recubrimiento, en los diferentes períodos de tiempo de exposición a CO+CO₂, variando la resistencia, incrementándose inicialmente para luego de manera gradual de acuerdo al período de exposición decrecer siguiendo una función polinómica de cuarto orden $Y = -8,36E-07 X^4 + 2,76E-04 X^3 - 3,64E-02 X^2 + 1,85 X + 230,44$ y la profundidad de carbonatación desde sus inicios se nota claramente que va incrementándose, hecho que es descrito en algunos artículos científicos referidos en el marco teórico de la presente investigación.

G. Peso de muestras

El peso de las muestras ha sido otro de los factores observables que han sufrido variaciones, durante el proceso de carbonatación acelerada de las muestras de concreto, es por ello que

también se ha tomado en consideración en el presente estudio, ello permitió comprender cómo los poros y micro poros existentes en el concreto a través del tiempo de exposición al $\text{CO}+\text{CO}_2$, se iban poco a poco adhiriendo y tapando de residuos provenientes de la acciones de gases como el dióxido de carbono proveniente de la combustión de fósiles, derivados del petróleo, los que fueron inducidos por el motor del vehículo menor (moto lineal) a través del tubo de escape, parte del sistema para la carbonatación acelerada, el mismo que incrementó el peso de las muestras de concreto, mas no las dimensiones ya que ni el diámetro ni la altura mostraron cambios.

1. Variación del peso de las muestras entre inicial (28 días de curado), peso recubierto con aditivo y peso luego de la exposición a CO_2 , a 30, 60, 90 y 120 días

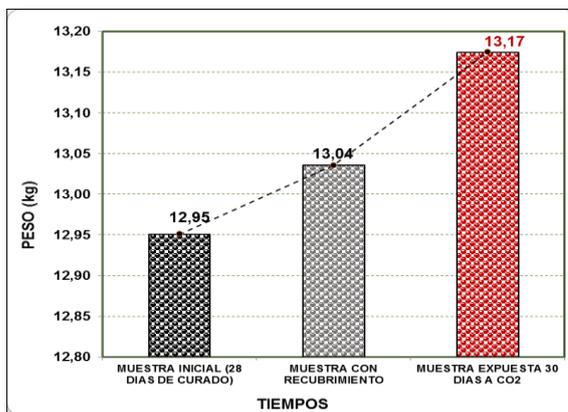


Figura 60. Variación del peso promedio de muestras expuestas 30 días a CO_2 , con recubrimiento de aditivo

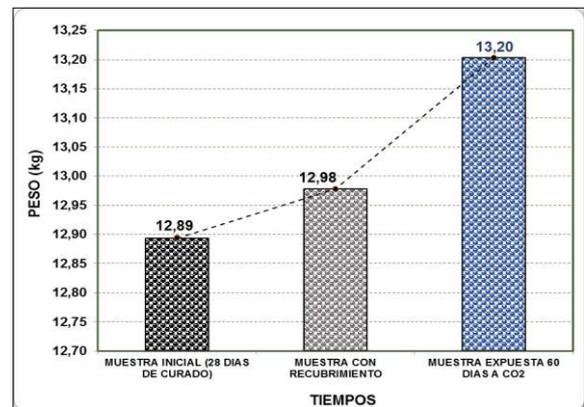


Figura 61. Variación del peso promedio de muestras expuestas 60 días a CO_2 , con recubrimiento de aditivo

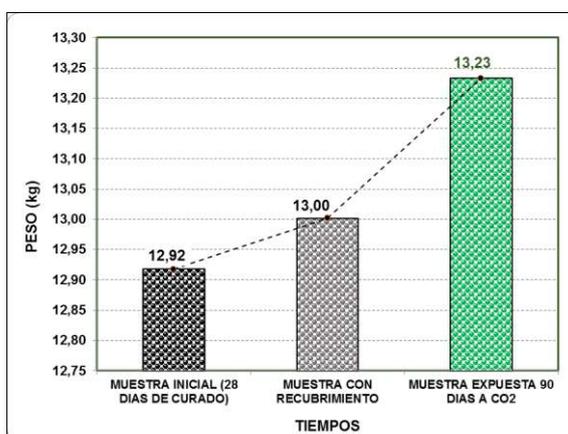


Figura 62. Variación del peso promedio de muestras expuestas 90 días a CO_2 , con recubrimiento de aditivo

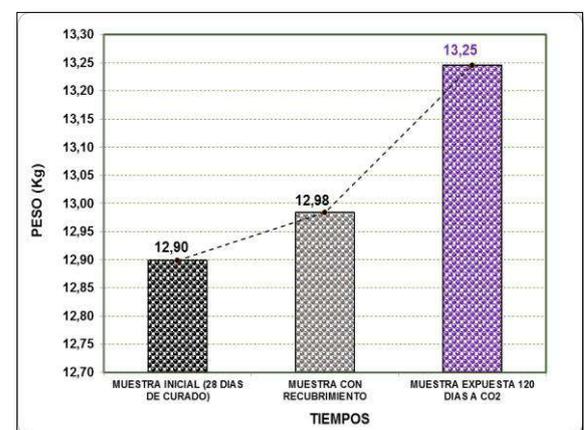


Figura 63. Variación del peso promedio de muestras expuestas 120 días a CO_2 , con recubrimiento de aditivo

Como se puede observar en las figuras 60, 61, 62, y 63, el peso de las muestras de concreto luego de pasar por el proceso de curado 28 días, al aplicarles el recubrimiento con Chema Seal® estas aumentan su peso por la película que esta aplicación genera y ganan mayor peso de acuerdo al tiempo de exposición al CO₂. A mayor tiempo de exposición mayor peso.

2. Variación del peso promedio de las muestras entre en las diferentes etapas y tiempos de exposición al CO₂, recubiertas con aditivo

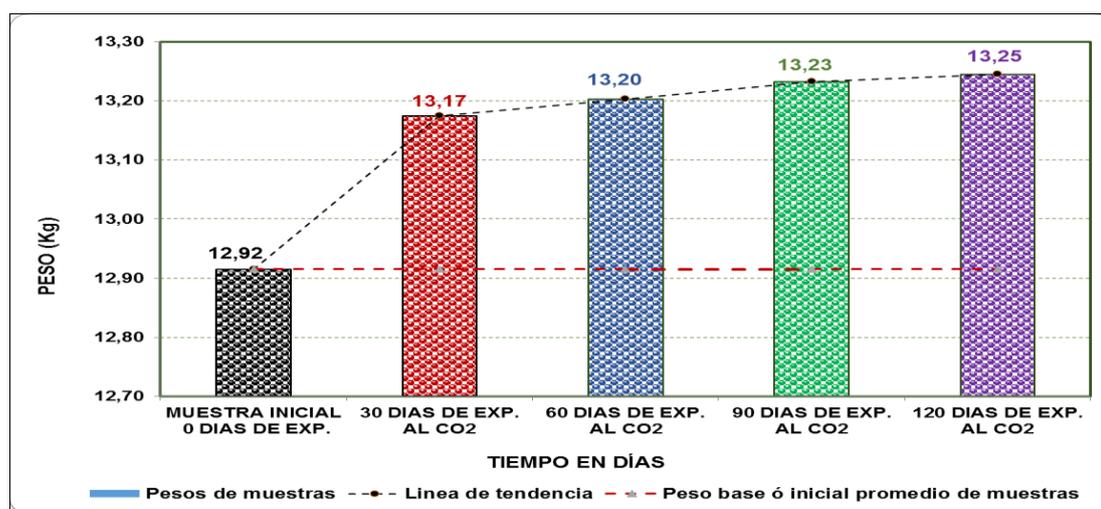


Figura 64: Variación de pesos promedio de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio

La figura 64, ilustra la tendencia en crecimiento o aumento de peso de las muestras recubiertas con aditivo, que permanecieron en un ambiente hermético expuestos continuamente a CO = 1,53% y CO+CO₂ = 3,57%, en los diferentes períodos de estudio; el mismo que a los 30, 60, 90 y 120 días sufre un ligero incremento.

La variación en el peso de muestras sometidas a carbonatación en las diferentes etapas, también fue registrado y publicado en la tesis doctoral: “Carbonatación del hormigón, Combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de PH” (Galán, 2011). En la que registra la evolución de los pesos de los cuatro tipos de probetas estudiadas, las que disminuyeron su peso en los primeros días después de ser desmoldadas (es decir época de fragua o curado del concreto), y aumentando su peso posteriormente con el efecto de carbonatación. No obstante, cabe mencionar que en los artículos científicos, “Efecto de

la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración” (Moreno et al., 2004) e “Influencia de la carbonatación en morteros de cemento pórtland y ceniza volante” (Valdéz et al., 2009), se describe un decremento en el peso de las muestras, pero ello se debe a que el estudio consistió en la modificación de la relación agua/cemento, al incrementar agua el concreto tiene mayor cantidad de poros y micro poros, disminuyendo el peso.

3. Variación del peso de las muestras sin recubrimiento; entre peso inicial (28 días de curado) y peso luego de la exposición al CO₂, a los 30, 60, 90 y 120 días

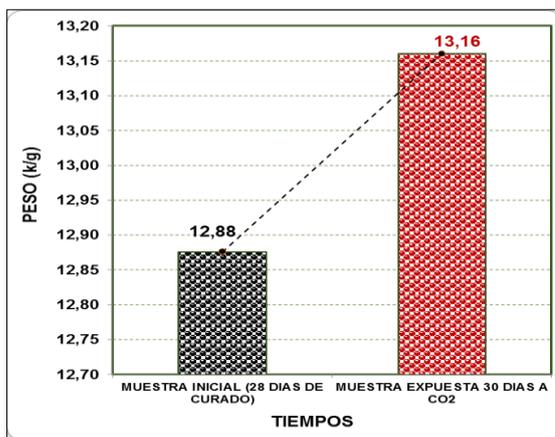


Figura 65. Variación del peso promedio de muestras expuestas 30 días a CO₂, sin recubrimiento

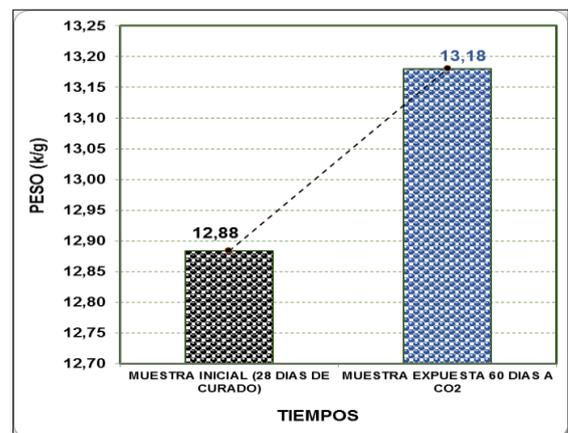


Figura 66. Variación del peso promedio de muestras expuestas 60 días a CO₂, sin recubrimiento

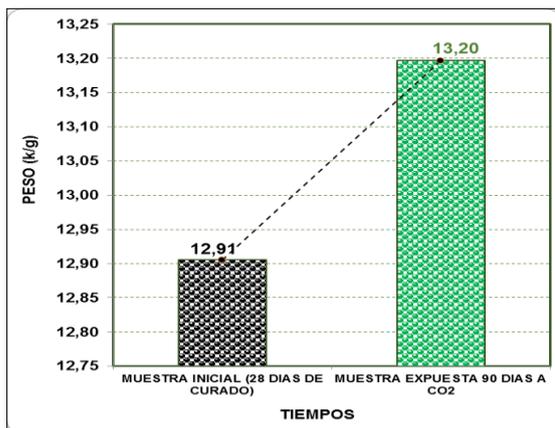


Figura 67. Variación del peso promedio de muestras expuestas 90 días a CO₂, con recubrimiento de aditivo

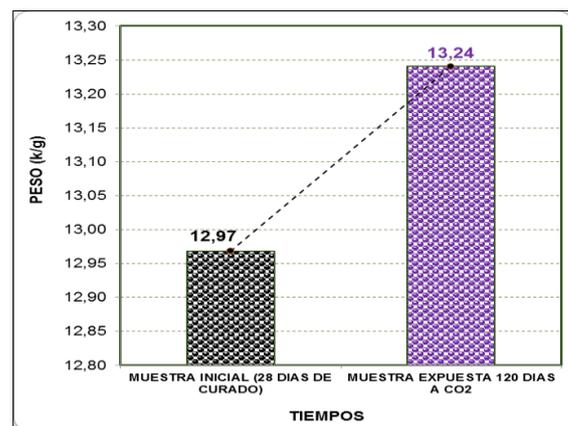


Figura 68. Variación del peso promedio de muestras expuestas 120 días a CO₂, con recubrimiento de aditivo

En las figuras 65, 66, 67, 68, se observa el incremento de peso de las muestras sin recubrimiento luego de ser expuestas al CO₂, con respecto al peso inicial.

4. Variación del peso promedio de las muestras sin recubrimiento en las diferentes etapas y tiempos de exposición al CO₂

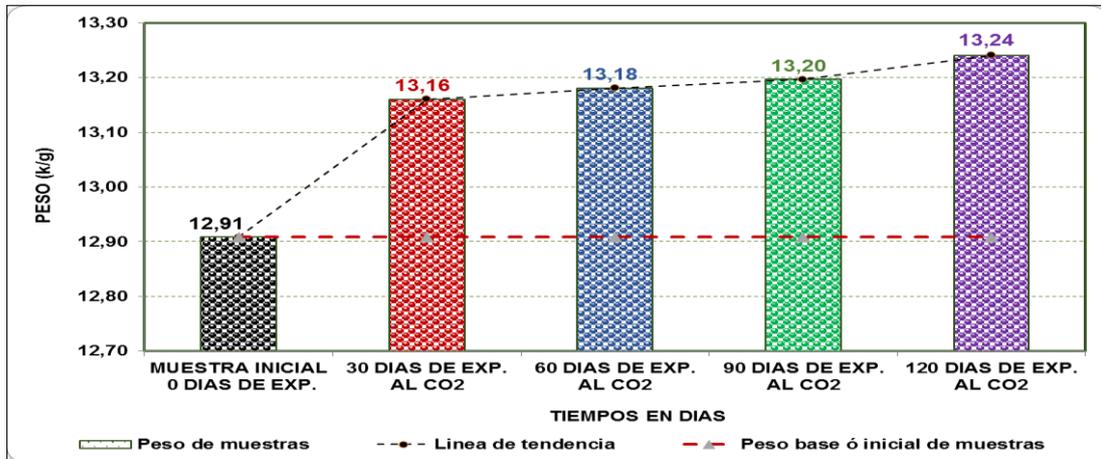


Figura 69. Variación de pesos promedio de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, sin recubrimiento, expuestas a CO₂, en los diferentes períodos de estudio

En la figura 69, se pudo observar que las muestras sin recubrimiento sufrieron un incremento en el peso, las que permanecieron en un ambiente hermético, expuestas continuamente a $\text{CO} = 1,53\%$ y $\text{CO} + \text{CO}_2 = 3,57\%$, en los diferentes períodos de estudio.

5. Comparativo del peso de muestra con aditivo versus muestras sin aditivo en diferentes tiempos de exposición al CO₂

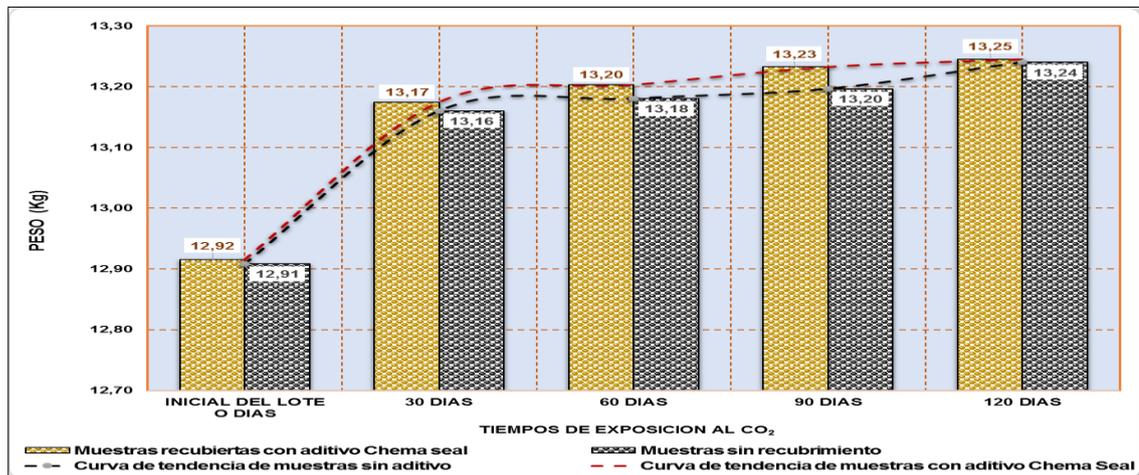


Figura 70. Comparativo del peso de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal® Vs peso de las muestras sin recubrimiento, en los diferentes períodos de estudio

La figura 70, frente al mismo tiempo de exposición a CO₂, en el mismo espacio hermético las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal® y las no recubiertas, sufren una variación en cuanto al peso, incrementándose este progresivamente.

Capítulo V

Conclusiones

El efecto del tiempo de exposición del concreto de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, en la profundidad de carbonatación estuvo directamente relacionada con el tiempo de exposición al CO_2 , el mismo que se observó claramente en las muestras de concreto sin ningún tipo de recubrimiento.

La profundidad de carbonatación en el concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ frente a la exposición de CO_2 , en muestras sin recubrimiento, depende directamente de: la concentración de CO_2 en el aire; la permeabilidad, presencia de micro y macro poros en el concreto y la humedad relativa.

La profundidad de carbonatación en el concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ frente a la exposición de CO_2 , en muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, mostró un comportamiento inicial resistente; sin embargo, el concreto se tornó sensible y vulnerable a la carbonatación conforme transcurrió el tiempo de exposición al CO_2 .

La resistencia a la compresión en el concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ frente a la exposición de CO_2 , tanto en muestras con aditivo y sin aditivo, produjo un efecto inicial de tendencia ascendente hasta un 13%, con respecto a la resistencia de la muestra patrón (o de diseño), posteriormente las acciones a las que está sometido el concreto por la inducción a CO_2 períodos más prolongados, generan disminución de pH volviéndolo ácido. El concreto en estas condiciones de labilidad alcalina generó que el concreto pierda progresivamente su resistencia,

Con lo que podemos afirmar que existe una fuerte relación entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a la compresión del concreto, existiendo un efecto negativo, pues al aumentar la profundidad de carbonatación disminuye la resistencia a la compresión del concreto en tiempos prolongados por cada 30 días de exposición, lo que valida la hipótesis planteada.

Por otro lado, aunque no ha sido uno de los objetivos determinar la variación del peso de las muestras por efecto del tiempo de exposición del concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ al CO_2 , de la

investigación realizada, afirmamos que existe aumento de peso en las muestras en cada una de las etapas de estudio, esto se debió a las ganancias que han tenido las muestras por el CO₂ inducido, en los poros y microporos que la textura del concreto presenta.

Propuesta

Una alternativa de mitigación de riesgo en estructuras sometidas a exposición continua a CO₂, es la aplicación de aditivos anticarbonatación o antintemperismo, Entendiendo que el proceso de carbonatación en las estructuras de concreto es completamente natural y que se producirá a largo o corto plazo, sea cual fuese el ambiente en la que se ubica, es de suma necesidad adoptar medidas de prevención que permitan mitigar o ampliar el período de vida útil de dichas estructuras, de lo investigado recomendamos que la forma práctica y económica de protección efectiva en el avance de la profundidad de carbonatación es mediante la aplicación de un recubrimiento con aditivos que ofrecen resistencia y durabilidad a la intemperie o anticarbonatación (diseñados para detener el ingreso del dióxido de carbono); bastará con formar una película muy delgada mediante la aplicación del producto dos pasadas (dos manos). Dicha aplicación deberá efectuarse periódicamente cada 8 años aproximadamente, en estructuras descritas como categoría C “edificaciones comunes” por la NTE-030 y cada 4 años en estructuras de categoría A “edificaciones esenciales”; categoría B “edificaciones importantes”, de manera especial en toda estructura expuesta frecuentemente a emisiones de CO₂.

Como parte de la propuesta ha elaborado una cartilla técnica para la correcta aplicación de recubrimientos, para las estructuras de concreto. Así también con los resultados de la investigación se presenta una hoja de cálculo de fácil aplicación, que permite estimar la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión del concreto de $f'_c=210 \text{ Kg/cm}^2$, expuesta bajo los efectos del CO₂, tanto de manera natural como acelerada para la ciudad de Cajamarca, los que se adjuntan en apéndices.

Capítulo VI

Referencias bibliográficas

- ACI-214-77. (1989). Strength Test Result Of Concrete. *American Concrete Institute. EUA*, 20.
- ACI-318S-08. (2014). Reglamento estructural para edificaciones. *American Concrete Institute. EUA*, 520.
- ASTM-C-117-03. (2012). Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No . 200) Sieve in Mineral. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 04, 4.
- ASTM-C-131-03. (2003). Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 04, 4.
- ASTM-C-136-01. (2015). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 04, 5.
- ASTM-C-188-95. (2003). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 95(Reapproved), 2.
- ASTM-C-192/C-192M-02. (2002). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 04, 8.
- ASTM-C-231-04. (2004). Método de Ensayo Normalizado para determinar el Contenido de Aire del Hormigón Fresco, por el Método de Presión. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 13.
- ASTM-C-29/C29M-09. (2009). Standard Test Method for Bulk Density (“ Unit Weight ”) and Voids in Aggregate. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 5.
- ASTM-C-39/C39M-03. (2005). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 4, 7.
- ASTM-C-469-02. (1994). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson ’ Ratio of Concrete. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 04, 6.
- ASTM-C-595/C595M-18. (2018). Especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 8.
- ASTM-C-642-97. (1997). Standard Test Method for Density , Absorption , and Voids in Hardened Concrete. *American Society for Testing and Materials. EUA*, 3.

- ASTM-D-2216-10. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. *American Society for Testing and Materials*. EUA.
- Babiche, I. (2004). Carbonatación del recubrimiento de concreto. *Instituto Peruano de Energía Nuclear / Lima, Perú*, 42–45.
- Blancarte, J. (2011). ¿Cuáles son los gases contaminantes más comunes que emiten los autos? *Auto Cosmos*, 4.
- Campos, A. (2011). *Estudio de la carbonatación del concreto en condiciones aceleradas y naturales: aplicación al ambiente de la zona metropolitana de Monterrey (Tesis de Maestría)*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Mexico.
- Carvajal, A. M., Silva, C., Valiente, J., & Venegas, A. (2007). Efectos de la carbonatación acelerada en distintos tipos de cemento y hormigones. *Revista de La Construcción*, 6(1), 10.
- Cementos-Inka. (2017). *Producción de cemento en el mundo*.
- Cementos-Pacasmayo-S.A.A. (2017). *Hoja técnica: Cemento Portland tipo I. Catálogo de productos*.
- Chavéz Ulloa, E., Pérez López, T., Reyes Trujeque, J., Corvo Pérez, F., & Osorno Carrillo, J. B. (2010). Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 13.
- Czarnecki, L., & Woyciechowski, P. (2015). Modelling of concrete carbonation; Is it a process unlimited in time and restricted in space? *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 63(1), 43–54.
- Dicovski, L. (2012). *Estadística básica para Ingenieros (Vol. 16)*. Nicaragua: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Fernández, M., & Concepción, E. (2014). Estrategia nacional para combustibles y vehículos más limpios en el Perú. *Ministerio Del Ambiente, Lima, Perú*, 1, 75.
- Fridh, K., & Lars-olof, N. (2014). A Model of Carbonation and a Technique To Determine The Degree of Carbonation. In *XIII Conference on Durability of Building Materials and Components* (p. 8). Universidad de Lund, Suecia.
- Galán, I. (2011). *Carbonatación del hormigón: Combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de PH (Tesis Doctoral)*. Universidad Complutense de Madrid, España.

- Gaspar, T., & Muñoz, M. (1977). Acción del CO₂ Sobre un cemento Portland: Influencia sobre las características químicas y fisicomecánicas. *Materiales de Construcción*, 27(165), 37–54.
- Gonzáles, M. (2012). La Industria del Cemento en el Perú. *Universidad Nacional Del Santa. Chimbote. Áncash. Perú*, 7.
- Harsen, T. (2002). *Diseño de estructuras de concreto armado* (Tercera). Fondo editorial de la PUCP.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación. Mc Graw Hill* (Quinta). México.
- [Http://www.mundivideo.com/coordenadas.htm](http://www.mundivideo.com/coordenadas.htm). (2017). Fotografía satelital de la ubicación de la investigación.
- Iloro, F., Sota, J., & Ortega, N. (2013). Carbonatación acelerada de morteros : Influencia de las adiciones minerales y la edad de curado. In *IX International Congress on Pathology and Repair of Structures* (p. 8).
- Jiménez, L. F., & Moreno, E. I. (2015). Carbonatación acelerada en concretos con agregados reciclados de alta absorción. In *Conpat-Coferencia patológica* (p. 8).
- Lee, H. J., Kim, D. G., Lee, J. H., & Cho, M. S. (2012). A Study for Carbonation Degree on Concrete using a Phenolphthalein Indicator and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. *World Academy of Science, Engineering and Technology-International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 6(2), 7.
- Magzoub, M. (1994). Studies in Community-based Education - Programme implementation and student assessment at the Faculty of Medicine, University of Gezira, Sudan, 1–150.
- Martínez, R. (2010, January). ¿Por qué se deteriora una estructura de hormigón? *Revista Interempresas Construcción*, 7.
- Minsa. (2011). Reglamento de la calidad del agua. *Publicacion de la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud. Lima Perú.*, 46.
- Montani, R. (2000). La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. *Revista Construcción y Tecnología del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Mexico*, 0–3.
- Moreano, D., & Palmisano, A. (2012). *Nivel de afectación de la contaminación atmosférica y sus efectos en la infraestructura del campus universitario debido a la emisión de partículas PM10 y CO (Tesis de pregrado)*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

- Moreno, E. I., Domínguez Lara, G. G., Cob Sarabia, E. J., & Duarte Gómez, F. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán. México*, 8(2), 15.
- NMX-C-111. (2004). Agregados para concreto hidráulico-especificaciones y métodos de prueba. *Normas Mexicanas. Mexico*, 17.
- NTE-060. (2009). Concreto Armado. *Norma Técnica de Edificación. Lima. Perú.*, 205.
- NTE-400.037-14. (2015). AGREGADOS . Especificaciones normalizadas para agregados en concreto. *Norma Técnica de Edificación. Lima. Perú.*
- NTP-334.090. (2013). CEMENTOS. Cementos Portland adicionados. Requisitos. *Norma Técnica de Edificación. Lima. Perú.*
- NTP-339.088. (2016). Hormigón (Concreto). Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto Portland. Requisitos. *Norma Técnica de Edificación. Lima. Perú.*, 18.
- NTP-400.017-99. (1999). AGREGADOS . Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado. *Norma Técnica de Edificación. Lima. Perú.*, 14.
- NTP-400.018. (2002). Agregados. Método de ensayo normalizado para materiales más finos que pasan por el tamíz normalizado 75 μm (N°200= por lavado en agregados. *Norma Técnica de Edificación. Lima. Perú.*, 13.
- Pasquel, E. (1993). *Tópicos de Tecnología del concreto en el Perú*. (Colegio de Ingenieros del Perú, Ed. Segunda. Lima, Peru.
- Poonkuzhali, A., & Kannan, S. P. M. (2016). Experimental Study on Carbonation of Concrete with Different Dimensional CO₂ Ingress. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(November), 7.
- Rivera, G. (2015). *Concreto Simple*. (Ingeniería y construcción., Ed.) (Primera). Universidad del Cauca. Colombia.
- Rivva, E. (1992). *Diseño de Mezclas*. (Hozlo S.C.R.L. Ed. Primera) Lima. Peru.
- Rivva, E. (2000). *Naturaleza y materiales del concreto*. (Capítulo Peruano ACI, Ed. Primera). Lima, Peru.
- Thiery, Dangla, Villain, & Platret. (2005). A prediction model for concrete carbonation based on coupled CO₂ -H⁺ 2O-ions transfers and chemical reactions. In *10 DBMC International Conférence On Durability of Building Materials and Components* (pp. 17–20). Lyon Francia.

Tung Phan, S. (2013). Experimental Investigation and Modelling of Carbonation Process in Cement Materials. *Open Civil Engineering Journal of the National Institute of Applied Sciences. Francia.*, 7(1), 10.

Valdéz, P. (1998). *Efectos del dióxido de carbono en los morteros de cemento hidráulico con ceniza volante (Tesis de Maestría)*. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Valdéz, P., Durán, A., Fajardo, G., & Juárez, C. (2009). Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Pórtland y ceniza volante. *Estudios e Investigaciones. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Mejico. Mejico.*, X(1), 39–49.

Van, T., Bonnet, S., Senga, T., & Ventura, A. (2017). A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures. *Construction and Building Materials. Francia.*, 129, 172–181.

Vidaud, E. (2012). La carbonatación. *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México.* 2(2)

Capítulo VII

Apéndices

A. Características físicas y mecánicas de los agregados

Tabla 45. Contenido de humedad del agregado fino

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
5,01	Peso del Recipiente	g	775,00	766,00	735,00	
5,01	Peso del Recipiente + muestra húmeda	g	3785,00	4255,00	4511,00	
5,02	Peso del Recipiente + muestra seca	g	3685,00	4144,00	4387,00	
Contenido de humedad			W %	3,44	3,29	3,40
						3,373

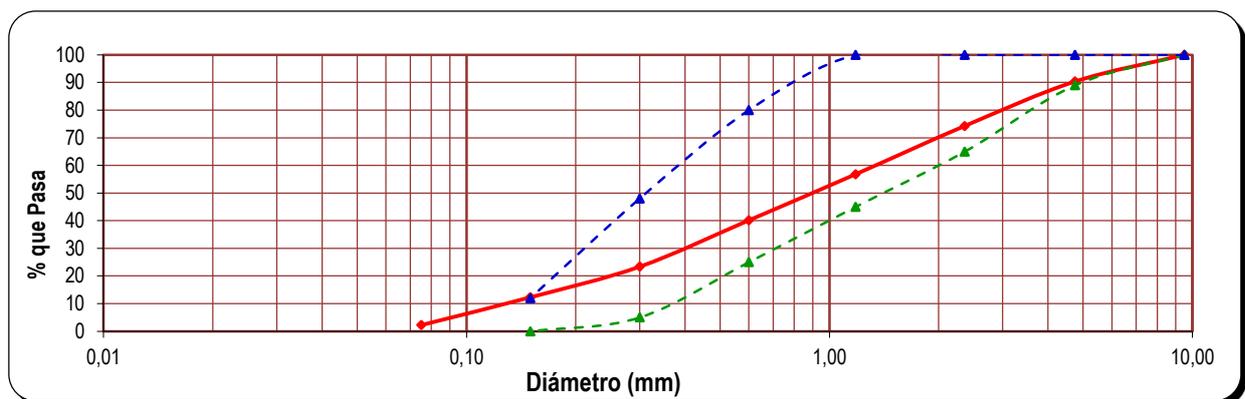
Tabla 46. Contenido de humedad del agregado grueso.

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
5,01	Peso del Recipiente	gr.	103	735,00	795,00	
5,01	Peso del Recipiente + muestra húmeda	gr.	1500	2857,00	2914,00	
5,02	Peso del Recipiente + muestra seca	gr.	1488	2841,00	2897,00	
Contenido de humedad			W %	0,866	0,760	0,809
						0,812

Tabla 47. Ensayo de determinación de la granulometría del agregado fino (primera muestra)

Muestra : E-1
Peso inicial : 1 400,00 gr

TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm.)	PESO RETENIDO PARCIAL (g.)	PORCENTAJE RETENIDO		PORCENTAJE QUE PASA	REQUISITOS GRANULOMÉTRICOS DEL AGREGADO FINO NTP 400:037
			PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)		
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100
N°4	4,75	135,00	9,64	9,64	90,36	89
N°8	2,36	225,00	16,07	25,71	74,29	65
N°16	1,18	245,00	17,50	43,21	56,79	45
N°30	0,60	233,00	16,64	59,86	40,14	25
N°50	0,30	235,00	16,79	76,64	23,36	5
N°100	0,15	155,00	11,07	87,71	12,29	0
N°200	0,075	141,00	10,07	97,79	2,21	0
CAZOLETA	--	31,00	2,21	100,00	0,00	Módulo de Finura
PESO TOTAL DE MUESTRA		1400,00	100,00			3,028



D 60 =	1,23	D 30 =	0,44	D 10 =	0,19
Cu =	6,47	Cc =	0,83		

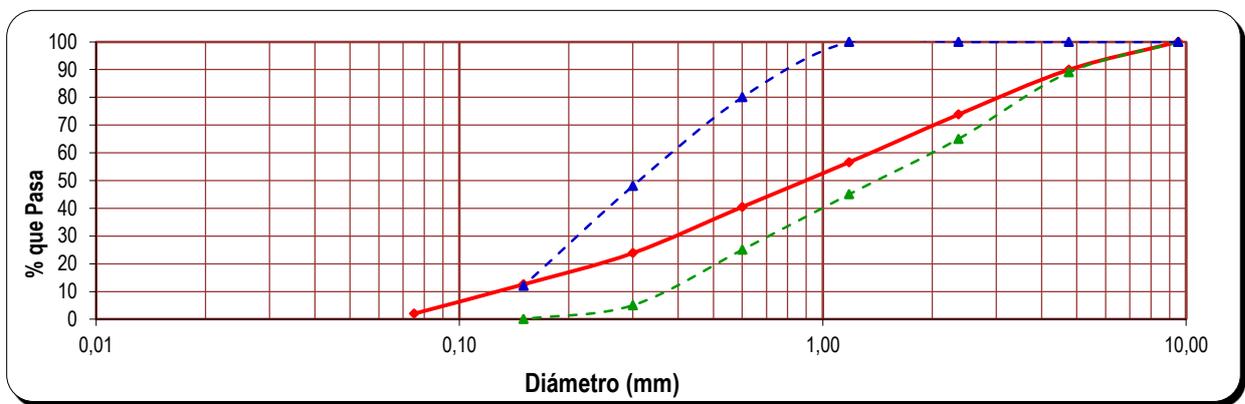
Observaciones: La curva granulométrica del agregado fino cumple con el huso granulométrico "M" de la norma N.T.P. 400.037 y tiene un módulo de finura de 3,028

Figura 71. Curva de distribución granulométrica del agregado fino (primera muestra)

Tabla 48. Ensayo de determinación de la granulometría del agregado fino (segunda muestra)

Muestra : E-2
 Peso inicial : 1 400,00 gr.

TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm.)	PESO RETENIDO PARCIAL (g.)	PORCENTAJE RETENIDO		PORCENTAJE QUE PASA	REQUISITOS GRANULOMÉTRICOS DEL AGREGADO FINO NTP 400:037	
			PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)			
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
N°4	4,75	141,00	10,07	10,07	89,93	89	100
N°8	2,36	226,00	16,14	26,21	73,79	65	100
N°16	1,18	241,00	17,21	43,43	56,57	45	100
N°30	0,60	225,00	16,07	59,50	40,50	25	80
N°50	0,30	233,00	16,64	76,14	23,86	5	48
N°100	0,15	158,00	11,29	87,43	12,57	0	12
N°200	0,075	148,00	10,57	98,00	2,00	0	0
CAZOLETA	--	28,00	2,00	100,00	0,00	Módulo de Finura	
PESO TOTAL DE MUESTRA		1400,00	100,00			3,028	



D 60 =	1,52	D 30 =	0,45	D 10 =	0,19
Cu =	8,00	Cc =	0,70		

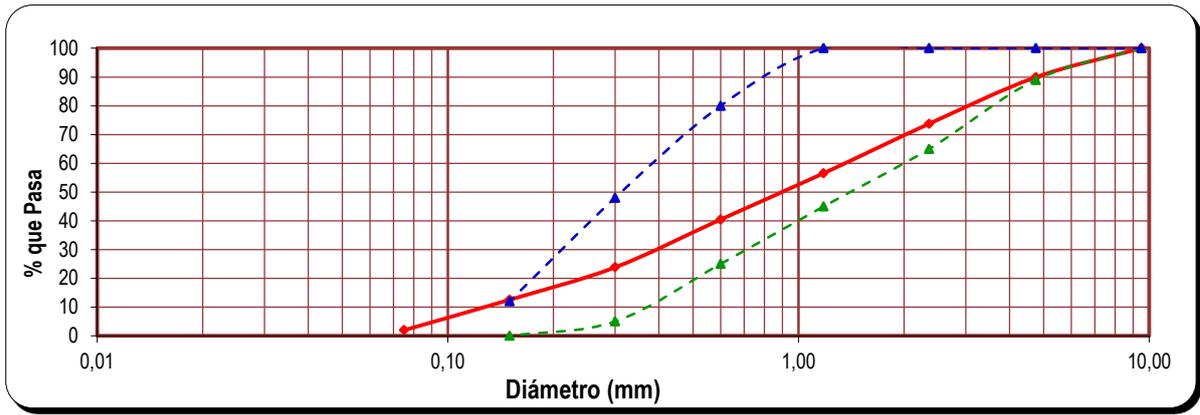
Observaciones: la curva granulométrica del agregado fino cumple con el huso granulométrico "M" de la norma N.T.P. 400.037 y tiene un módulo de finura de 3,028

Figura 72. Curva de distribución granulométrica del agregado fino (segunda muestra)

Tabla 49. Ensayo de determinación de la granulometría del agregado fino (tercera muestra)

Muestra : E-3
 Peso inicial : 1 400,00 gr.

TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm.)	PESO RETENIDO PARCIAL (g.)	PORCENTAJE RETENIDO		PORCENTAJE QUE PASA	REQUISITOS GRANULOMÉTRICOS DEL AGREGADO FINO NTP 400:037	
			PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)			
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
N°4	4,75	143,00	10,21	10,21	89,79	89	100
N°8	2,36	228,00	16,29	26,50	73,50	65	100
N°16	1,18	238,00	17,00	43,50	56,50	45	100
N°30	0,60	227,00	16,21	59,71	40,29	25	80
N°50	0,30	234,00	16,71	76,43	23,57	5	48
N°100	0,15	157,00	11,21	87,64	12,36	0	12
N°200	0,075	147,00	10,50	98,14	1,86	0	0
CAZOLETA	--	26,00	1,86	100,00	0,00	Módulo de Finura	
PESO TOTAL DE MUESTRA		1400,00	100,00			3,040	



D 60 =	1,25	D 30 =	0,43	D 10 =	0,2
Cu =	6,25	Cc =	0,74		

Observaciones: la curva granulométrica del agregado fino cumple con el huso granulométrico "M" de la norma N.T.P. 400.037 y tiene un módulo de finura de 3.040

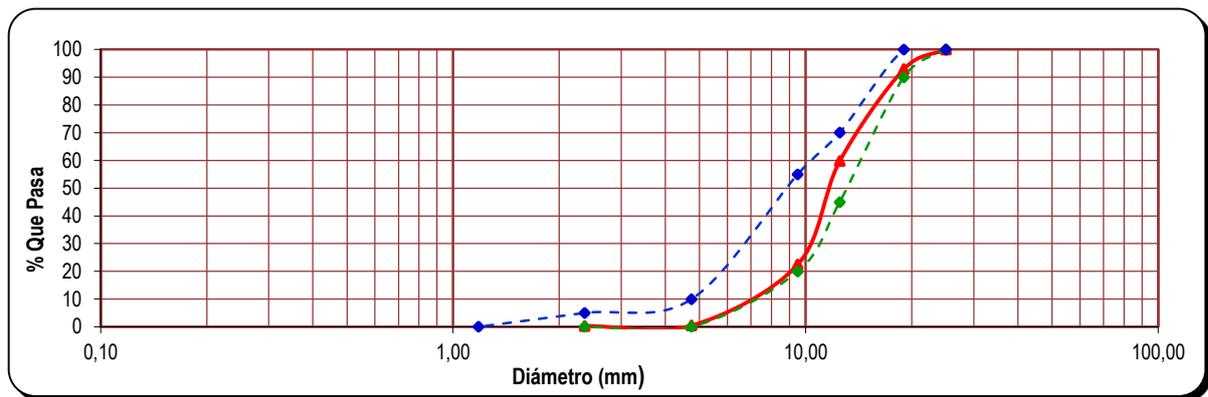
Mf Promedio	3,03
-------------	------

Figura 73. Curva de distribución granulométrica del agregado fino (tercera muestra)

Tabla 50. Ensayo de determinación de la granulometría del agregado grueso (primera muestra).

Muestra : E-1
 Peso inicial : 8 000,00 gr.

TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm.)	PESO RETENIDO EN (g.)	PORCENTAJE RETENIDO		PORCENTAJE QUE PASA	REQUISITOS GRANULOMÉTRICOS DEL AGREGADO GRUESO HUSO	
			PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)			
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,00	566,00	7,08	7,08	92,93	90	100
1/2"	12,50	2650,00	33,13	40,20	59,80	45	70
3/8"	9,50	2984,00	37,30	77,50	22,50	20	55
N°4	4,75	1762,00	22,03	99,53	0,47	0,00	10
N°8	2,36	12,00	0,15	99,68	0,32	0,00	5
N°16	1,18	0,00	0,00	99,68	0,32	0,00	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	99,68	0,32	0,00	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	99,68	0,32	0,00	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	99,68	0,32	0,00	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	99,68	0,32	0,00	0,00
CAZOLETA	--	26,00	0,33	100,00	0,00		Módulo de Finura
PESO TOTAL DE MUESTRA		8000,00				6,825	



D60 =	12,75	D30 =	10	D10 =	7,000
Cu =	1,82	Cc =	1,12		

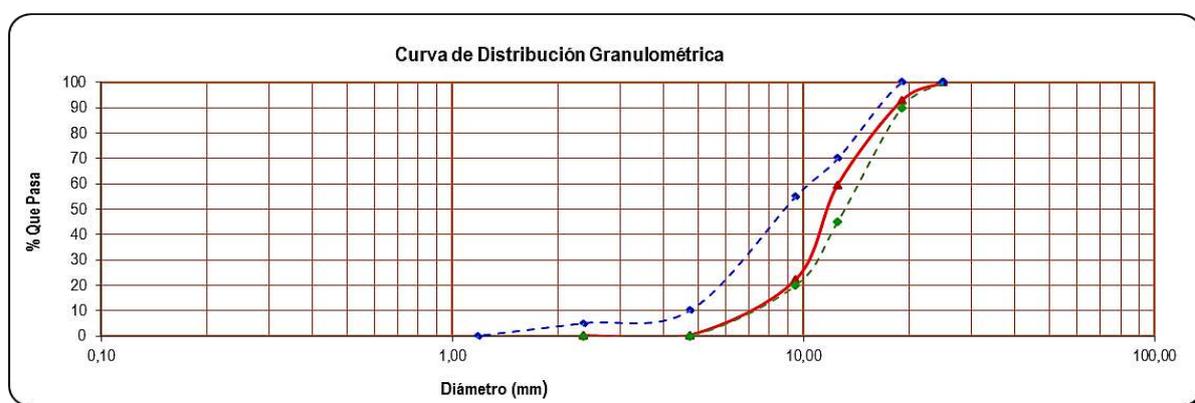
Observaciones: la curva granulométrica del agregado grueso cumple con el huso granulométrico N° 67 de la Norma A.S.T.M. C 33 M -11 y tiene un módulo de finura de 6,825.

Figura 74. Curva de distribución granulométrica del agregado grueso primera muestra

Tabla 51. Ensayo de determinación de la granulometría del agregado grueso (segunda muestra)

Muestra : E-2
 Peso inicial : 8 000,00 gr.

TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm.)	PESO RETENIDO EN (g.)	PORCENTAJE RETENIDO		PORCENTAJE QUE PASA	REQUISITOS GRANULOMÉTRICOS DEL AGREGADO GRUESO HUSO	
			PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)			
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,00	577,00	7,21	7,21	92,79	90	100
1/2"	12,50	2652,00	33,15	40,36	59,64	45	70
3/8"	9,50	2981,00	37,26	77,63	22,38	20	55
N°4	4,75	1750,00	21,88	99,50	0,50	0,00	10
N°8	2,36	16,00	0,20	99,70	0,30	0,00	5
N°16	1,18	0,00	0,00	99,70	0,30	0,00	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	99,70	0,30	0,00	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	99,70	0,30	0,00	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	99,70	0,30	0,00	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	99,70	0,30	0,00	0,00
CAZOLETA	--	24,00	0,30	100,00	0,00	Módulo de Finura	
PESO TOTAL DE MUESTRA		8000,00				6,828	



D60 =	12,80	D30 =	10,00	D10 =	7,00
Cu =	1,83	Cc =	1,12		

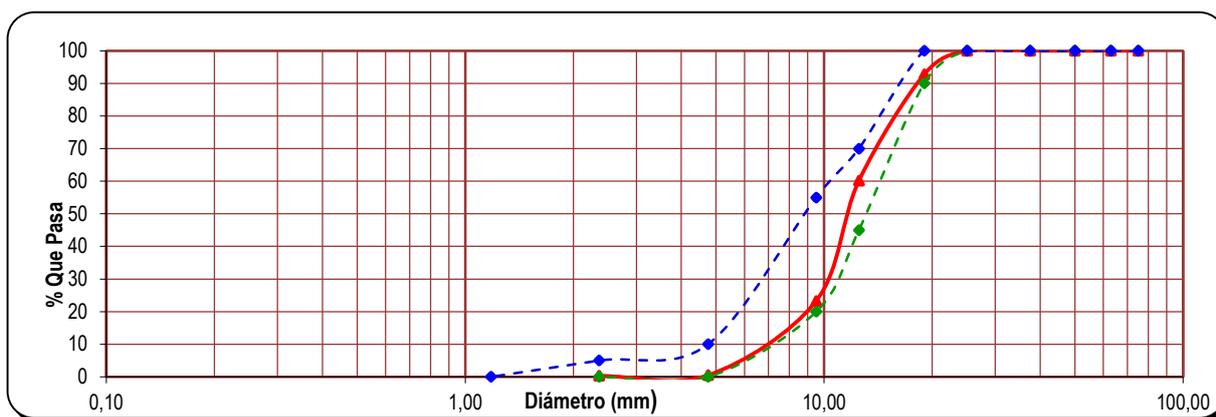
Observaciones: la curva granulométrica del agregado grueso cumple con el huso granulométrico N° 67 de la Norma A.S.T.M. C 33 M -11 y tiene un módulo de finura de 6,828.

Figura 75. Curva de distribución granulométrica del agregado grueso (segunda muestra)

Tabla 52. Ensayo de determinación de la granulometría del agregado grueso (tercera muestra)

Muestra : E-3
 Peso inicial : 8 000,00 gr.

TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm.)	PESO RETENIDO EN (g.)	PORCENTAJE RETENIDO		PORCENTAJE QUE PASA	REQUISITOS GRANULOMÉTRICOS DEL AGREGADO GRUESO HUSO	
			PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)			
3"	75,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
2 1/2"	63,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
2"	50,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,00	597,00	7,46	7,46	92,54	90	100
1/2"	12,50	2529,00	31,61	39,08	60,93	45	70
3/8"	9,50	2877,00	35,96	75,04	24,96	20	55
N°4	4,75	1955,00	24,44	99,48	0,53	0,00	10
N°8	2,36	22,00	0,28	99,75	0,25	0,00	5
N°16	1,18	0,00	0,00	99,75	0,25	0,00	0,00
N°30	0,60	0,00	0,00	99,75	0,25	0,00	0,00
N°50	0,30	0,00	0,00	99,75	0,25	0,00	0,00
N°100	0,15	0,00	0,00	99,75	0,25	0,00	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	99,75	0,25	0,00	0,00
CAZOLETA	--	20,00	0,25	100,00	0,00	Módulo de Finura	
PESO TOTAL DE MUESTRA		8000,00				6,807	



D60 =	13,10	D30 =	10,00	D10 =	6,20
Cu =	2,11	Cc =	1,23		

Observaciones: la curva granulométrica del agregado grueso cumple con el huso granulométrico N° 67 de la Norma A.S.T.M. C 33 M -11 y tiene un módulo de finura de 6,807.

Mf Promedio	6,820
--------------------	--------------

Figura 76. Curva de distribución granulométrica del agregado grueso (tercera muestra)

Tabla 53. Módulo de Fineza del agregado fino

Muestra	Módulo de fineza	Promedio
E-1-AF	3,028	
E-2-AF	3,028	3,03
E-3-AF	3,040	

Tabla 54. Módulo de Fineza del agregado grueso

Muestra	Módulo de fineza	Promedio
E-1-AG	6,82	
E-2-AG	6,83	6,82
E-3-AG	6,81	

Tabla 55. Determinación del peso específico del agua para el agregado fino

Peso de la fiola en (g)	145
Peso de la fiola en (g)	644
Volumen de la fiola (cm ³)	500
Peso específico (g/cm ³)	0,998
Peso específico (Kg/m ³)	998

Tabla 56. Determinación de factor f

Peso del Molde (g)	3881
Peso del Molde + Agua (g)	6860
Peso Agua (Kg)=	2,979
f (1/m ³) =	335,012

Tabla 57. Determinación del peso unitario suelto

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
1,01	Peso del recipiente	g	3881,00	3881,00	3881,00	
1,02	Peso de muestra suelta + recipiente	g	8802,00	8822,00	8790,00	
1,03	Peso de la muestra suelta	g	4921,00	4941,00	4909,00	
1,04	Factor (f)		335,012	335,012	335,012	
1,05	Peso unitario suelto	g/cm ³	1,649	1,655	1,645	1,649
	Peso unitario suelto	Kg/m³	1649	1655	1645	1649

Tabla 58. Determinación del peso unitario compactado

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
2,01	Peso del recipiente	g	3881,00	3881,00	3881,00	
2,02	Peso de muestra compactada + recipiente	g	9195,00	9188,00	9201,00	
2,03	Peso de la muestra suelta	g	5314,00	5307,00	5320,00	
2,04	Factor (f)		335,012	335,012	335,012	
2,05	Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,780	1,778	1,782	1,780
	Peso unitario compactado	Kg/m³	1780	1778	1782	1780

Tabla 59. Determinación del peso específico

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
3,01	Peso de fiola	g	157,00	157,00	157,00	
3,02	Peso de la fiola +agua hasta menizco	g	653,00	653,00	653,00	
3,03	peso de la fiola +agua + muestra	g	969,00	970,00	970,50	
3,04	Peso de la muestra superficialmente seca	g	500,00	500,00	500,00	
3,05	Peso de la muestra secada al horno	g	494,10	494,05	494,10	
3,06	volumen de agua añadida al frasco (g)	g	312,00	313,00	313,50	
Peso específico de masa		g/m³	2,628	2,642	2,649	2,640
Peso específico de masa saturado superficialmente seco		g/m³	2,660	2,674	2,681	2,671
Peso específico de aparente		g/m³	2,713	2,729	2,736	2,726

Tabla 60. Determinación del peso específico del agua para el agregado grueso

Peso de la fiola en (g)	145
Peso de la fiola en (g)	644
Volumen de la fiola (cm ³)	500
Peso específico (g/cm ³)	0,998
Peso específico (Kg/m ³)	998,0

Tabla 61. Determinación de factor f

Peso del molde (g)	4200
Peso del molde +agua (g)	13932
Peso agua (Kg)	9,732
f (1/m ³) =	102,548

Tabla 62. Determinación del peso unitario suelto

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
1,01	Peso del recipiente	g	4200,00	4200,00	4200,00	
1,03	Peso de muestra suelta + recipiente	g	18015,00	18022,00	18044,00	
1,04	Peso de la muestra suelta	g	13815,00	13822,00	13844,00	
1,05	Factor (f)		102,548	102,548	102,548	
1,06	Peso unitario suelto	g/cm ³	1,4167	1,4174	1,4197	1,418
Peso unitario suelto		Kg/m³	1417	1417	1420	1418

Tabla 63. Determinación del peso unitario compactado

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
2,01	Peso del recipiente	g	4200,00	4200,00	4200,00	
2,02	Peso de muestra compactada + recipiente	g	19355,00	19365,00	19388,00	
2,03	Peso de la muestra suelta	g	15155,00	15165,00	15188,00	
2,04	Factor (f)		102,548	102,548	102,548	
2,05	Peso unitario compactado	g/cm ³	1,5541	1,5551	1,5575	1,556
Peso unitario compactado		Kg/m³	1554	1555	1558	1556

Tabla 64. Determinación del peso específico

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
3,01	Peso de muestra SSS	g	3000,00	3000,00	3000,00	
3,02	Peso de muestra SSS + canastilla sumergida	g	4234,20	4232,70	4233,00	
3,03	Peso de canastilla sumergida	g	2367,40	2367,40	2367,40	
3,04	Peso de la muestra superficialmente Seca	g	3000,00	3000,00	3000,00	
3,05	Peso de la muestra secada al horno	g	2966,00	2965,00	2967,00	
3,06	Peso de la muestra sumergida en el agua	g	1866,80	1865,30	1865,60	
Peso específico de masa		g/cm³	2,617	2,613	2,615	2,615
Peso específico de masa saturado superficialmente seco		g/cm³	2,647	2,644	2,645	2,645
Peso específico de aparente		g/cm³	2,698	2,696	2,694	2,696

Tabla 65. Absorción del agregado fino

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
4,01	Peso de la muestra superficialmente seca	g	500,00	500,00	500,00	
4,02	Peso de la muestra secada al horno	g	494,10	494,05	494,10	
	Absorción (%)	%	1,194	1,204	1,194	1,197

Tabla 66. Absorción del agregado grueso

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
4,01	Peso de la muestra superficialmente seca	g	3000,00	3000,00	3000,00	
4,02	Peso de la muestra secada al horno	gr.	2966,00	2965,00	2967,00	
	Absorción (%)	%	1,146	1,180	1,112	1,146

Tabla 67. Determinación porcentaje de material más fino del agregado fino

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
1,01	Peso de muestra original	g	500,00	500,00	500,00	
1,02	Peso de la muestra lavada	g	487,90	486,00	486,00	
1,03	Peso del material que pasa el tamiz N° 200	g	12,10	14,00	14,00	
	% de material que pasa el tamiz N° 200	%	2,42%	2,80%	2,80%	2,67%

Tabla 68. Determinación porcentaje de material más fino del agregado grueso

Ítem	Descripción	Und.	M-1	M-2	M-3	Promedio
1,01	Peso de muestra original	gr.	3000,00	3000,00	3000,00	
1,02	Peso de la muestra lavada	gr.	2987,00	2989,00	2987,50	
1,03	Peso del material que pasa el tamiz N° 200	gr.	13,00	11,00	12,50	
	% de material que pasa el tamiz N° 200	%	0,43%	0,37%	0,42%	0,41%

Tabla 69. Abrasión del agregado grueso

Gradación	Equipo Mecánico	N° de Esferas	Velocidad (rev./mim)	N° de Revoluciones	Tamaño Máx. Nominal	Peso de la Muestra en (gr.)
B	Máquina de los Ángeles	11	30 - 33	500,00	3/4"	5000,00
N° DE ENSAYOS				1°	2°	3°
Peso Inicial de la muestra seca al horno (gr.)				5240	5000	5000
Peso retenido en la malla N° 12 Lavado y secado al horno en (g)				3340	3658	3666
% Desg. =((Pi - Pf) / Pi) x 100				36,26	26,84	26,68
% Desg. Promedio				29,93		

B. Diseño de mezcla

1. Propiedades del cemento

Para los concretos con un $f'c=210Kg/cm^2$ se trabajó con:

- Marca : Cementos Pacasmayo S.A.
- Tipo : Cemento Portland tipo I.
- Peso Específico : **3,08 gr/cm³** (Cementos-Pacasmayo-S.A.A., 2017).

2. Características físicas del agregado fino

El agregado fino cumplió con los requisitos establecidos en la Norma NTP 400.037. Por lo que las propiedades del agregado fino a considerar el diseño de mezclas son:

•Tamaño máximo nominal	:	$\frac{3}{4}$ "
•Peso específico de masa (gr/cm^3)	:	2,649
•Peso unitario suelto seco (Kg/cm^3)	:	1649
•Peso unitario suelto seco compactado (Kg/cm^3)	:	1780
•Contenido de humedad (%)	:	3,373
•Absorción (%)	:	1.197
•Módulo de finura	:	3,608
•Porcentaje que pasa la malla N° 200	:	2,67

3. Características físicas del agregado grueso

El agregado grueso cumplió con los requisitos establecidos en la Norma NTP 400.037. Por lo que las propiedades del agregado grueso a considerar el diseño de mezclas son:

•Tamaño máximo nominal	:	$\frac{3}{4}$ "
•Peso específico de masa (gr/cm^3)	:	2,615
•Peso unitario suelto seco (Kg/cm^3)	:	1418
•Peso unitario suelto seco compactado (Kg/cm^3)	:	1556
•Contenido de humedad (%)	:	0,812
•Absorción (%)	:	1,146
•Módulo de finura	:	6,717
•Abrasión	:	29,93
•Porcentaje que pasa la malla N° 200	:	0,41

4. Características estructurales

•Resistencia a la compresión	:	210 kg/cm^2
•Resistencia requerida $1.20 * f^c$:	252 kg/cm^2
•Revenimiento	:	3" – 4"
•Cantidad de agua de mezclado (lt/m^3)	:	185
•Aire total (%)	:	2,0
•Relación A/Mc	:	0,622
•Cemento	:	297,5 $\text{kg}/\text{m}^3 = 7,00$ bolsas

5. Método volúmenes absolutos:

•Cemento (m^3)	:	0,096591
•Agua de mezclado (m^3)	:	0.185
•Aire (%)	:	0,02
•Sumatoria	:	0.301591
•Módulo de combinación	:	5,040
•% agregado fino	:	53,94
•% agregado grueso	:	46,06
Volumen de agregados (m^3)	:	0,698409

• Agregado fino (kg/ m ³)	:	998,00
• Agregado grueso (kg/ m ³)	:	841,00

Aporte de Humedad de agregados

• Aporte A. Fino	:	21,72
• Aporte A. Grueso	:	-2,81
• Total	:	18,91

6. Cantidad de materiales por m³

Materiales de diseño

• Cemento (kg)	:	297,50
• Agua de diseño (lt)	:	185,00
• Agregado fino seco (kg)	:	998,00
• Agregado grueso seco (kg)	:	841,00
• Aire total (%)	:	2,00

Materiales corregidos por humedad

• Cemento (kg)	:	297,50
• Agua efectiva (lt)	:	166,09
• Agregado fino húmedo (kg)	:	1032,00
• Agregado grueso húmedo (kg)	:	848,00
• Aire total (%)	:	2,00

7. Proporcionamiento de materiales

Tabla 70. Dosificación de materiales en peso como y volumen para concreto de resistencia a la compresión de $f'c=210\text{kg/cm}^2$

Proporción en peso		Proporción en Volumen	
Cemento	= 1	Cemento	= 1
A. Fino	= 3,47	A. Fino	= 3,060
A. Grueso	= 2,85	A. Grueso	= 2,990
Agua	= 23,7 (lt /bolsa)	Agua	= 23,700 (lt /bolsa)

C. Resistencia a compresión de muestras de concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

1. Resistencia a compresión de muestras patrón

Tabla 71. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras patrón en estado endurecido, prueba a compresión y módulo de elasticidad

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS PATRON ASTM C39 / NTP 339.034															
ELABORADO POR:	Mcs. César Mosqueira Ramírez										TIEMPO DE CURADO	28 DÍAS			
TESIS DOCTORAL:	EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO ₂ , DEL CONCRETO DE $f'c = 210 \text{ Kg/Cm}^2$, EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN										CEMENTO:	PORTLAND TIPO I-PACASMAYO			
UBICACIÓN:	UNC-Cajamarca, E.A.P. de Ingeniería Civil.										ADITIVO:	NO			
FECHA DE FABRIC.:	05/09/2017										$f'cr$ REQUERIDA:	252 kg/cm^2			
FECHA DE ENSAYO:	04/10/2017										$f'c$ DE DISEÑO:	210 kg/cm^2			
EDAD DE LA PROBETA	29 DÍAS										$f'c$ ESPERADO:	100 %			
											# DE ESPECÍMENES:	15			
PROBETA	DATOS PROBETA ENDURECIDA						DATOS PRUEBA A COMPRESIÓN								
	DIÁM. (cm)	ALT. (cm)	ÁREA (cm ²)	VOL. (m ³)	PESO (kg) 28 DIAS	P.U. (kg/m ³)	CARGA ROT. (kg)	ESF. (kg/cm ²)	$f'c$ -OBT. (kg/cm ²)	$f'c$ -OBT. (%)	DEF. ROT. UNIT. (×1000):	MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 (kg/cm ²)	
M - P - 1	15,15	30,00	180,27	0,005408	13,02	2407,18	42000,00	247,50	232,99	110,95	6,77	235982,45	51923,28	60624,98	
M - P - 2	15,10	30,20	179,08	0,005408	13,01	2405,99	42500,00	224,99	237,33	113,01	6,12	224993,85	54619,20	69393,45	
M - P - 3	15,18	30,10	180,98	0,005448	13,02	2389,15	42000,00	215,36	232,07	110,51	6,41	220128,07	48813,14	65633,07	
M - P - 4	15,15	30,10	180,27	0,005426	12,91	2379,09	43000,00	224,66	238,54	113,59	4,50	224830,28	89685,50	78027,35	
M - P - 5	15,09	30,00	178,84	0,005365	12,90	2405,11	40500,00	227,55	226,46	107,84	4,82	226271,69	80572,88	57406,61	
M - P - 6	15,20	30,05	181,46	0,005453	12,91	2366,94	42500,00	234,41	234,21	111,53	5,82	229658,52	61306,57	48284,99	
M - P - 7	15,13	30,10	179,79	0,005412	13,03	2407,56	41000,00	223,30	228,04	108,59	6,15	224147,31	53856,29	49876,50	
M - P - 8	15,24	30,20	182,41	0,005509	12,95	2351,09	42000,00	222,15	230,24	109,64	6,55	223570,32	48819,49	45817,48	
M - P - 9	15,22	30,15	181,94	0,005485	12,99	2368,21	42500,00	223,97	233,60	111,24	5,70	224486,47	60454,96	61023,26	
M - P - 10	15,10	30,30	179,08	0,005426	12,84	2366,35	42000,00	232,45	234,53	111,68	6,12	228692,38	56455,39	51270,74	
M - P - 11	15,00	30,40	176,71	0,005372	12,95	2410,03	42500,00	243,72	240,50	114,52	4,97	234172,83	82140,53	59430,29	
M - P - 12	15,10	30,30	179,08	0,005426	12,92	2380,72	43000,00	242,74	240,12	114,34	6,18	233701,50	58064,23	46224,52	
M - P - 13	15,12	30,30	179,55	0,005440	12,90	2371,41	43000,00	232,89	239,48	114,04	6,51	228909,92	51581,33	61825,53	
M - P - 14	15,35	30,20	185,06	0,005589	12,96	2319,13	44500,00	233,83	240,47	114,51	6,69	229374,16	49871,24	60790,47	
M - P - 15	15,32	30,30	184,33	0,005585	12,97	2321,43	42500,00	227,14	230,56	109,79	6,17	226068,93	54466,85	65515,25	
PROMEDIO	15,16	30,18	180,59	0,005450	12,95	2376,63	42366,67	230,44	234,61	111,72	5,97	227665,91	60175,39	58742,97	

2. Resistencia a compresión del concreto de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, 30 días.

Tabla 72. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂ por un período de 30 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS EXPUESTAS A CO ₂ EN UN PERIODO DE 30 DIAS, RECUBIERTAS CON ADITIVO CHEMA SEAL																	
ASTM C39 / NTP 339.034																	
ELABORADO POR:	Mcs. César Mosqueira Ramírez										TIEMPO DE CURADO	28 DÍAS					
TESIS DOCTORAL:	EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO ₂ , DEL CONCRETO DE F'c = 210 Kg/Cm ² , EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN										CEMENTO:	PORTLAND TIPO I-PACASMAYO					
UBICACIÓN:	UNC-Cajamarca, E.A.P. de Ingeniería Civil.										ADITIVO:	RECUBIERTO CON CHEMA SEAL					
FECHA DE FABRIC.:	05/09/2017										f'cr REQUERIDA:	252 kg/cm ²					
FECHA DE ENSAYO:	05/11/2017										f'c DE DISEÑO:	210 kg/cm ²					
EXPOSICION A CO ₂	30 Días										f'c ESPERADO:	100 %					
											# DE ESPECÍMENES:	15					
PROBETA	DATOS PROBETA ENDURECIDA								DATOS PRUEBA A COMPRESIÓN								
	DIÁM. (cm)	ALT. (cm)	ÁREA (cm ²)	VOL. (m ³)	PESO (kg) 28 DIAS	P.U. (kg/m ³)	PESO (kg) RECUBIERTO CON ADITIVO	PESO (kg) A 30 DIAS DE EXP. AL CO ₂	CARGA ROT. (kg)	ESF. (kg/cm ²)	f'c-OBT. (kg/cm ²)	f'c-OBT. (%)	DEF. ROT. UNIT. (x1000):	MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 (kg/cm ²):	
M-16-SR	15,20	30,25	181,46	0,005489	13,26	2416,33	13,34	13,32	49000,00	266,58	270,03	128,59	6,94	244907,79	53939,49	48150,23	
M-17-SR	15,17	30,30	180,74	0,005477	12,84	2344,01	12,93	13,09	48000,00	255,36	265,57	126,46	6,34	239701,37	58885,15	58923,55	
M-18-SR	15,10	30,40	179,08	0,005444	13,15	2415,87	13,24	13,30	47500,00	260,74	265,25	126,31	7,50	242212,14	47421,63	45352,47	
M-19-SR	15,24	30,40	182,41	0,005545	13,14	2370,25	13,23	13,41	49500,00	263,53	271,36	129,22	7,10	243504,48	51699,38	47478,77	
M-20-SR	15,16	30,35	180,50	0,005478	12,85	2345,28	12,93	13,09	49000,00	262,58	271,46	129,27	6,35	243063,36	60418,56	73547,35	
M-21-SR	15,10	30,40	179,08	0,005444	12,99	2386,12	13,07	13,21	48000,00	258,35	268,04	127,64	5,53	241097,05	73262,22	70146,73	
M-22-SR	15,00	30,30	176,71	0,005354	12,67	2365,69	12,76	12,95	47500,00	267,32	268,80	128,00	7,15	245247,63	51937,06	45605,14	
M-23-SR	15,30	30,40	183,85	0,005589	12,89	2305,71	12,97	13,14	49500,00	258,70	269,24	128,21	5,53	241260,28	73361,46	73003,30	
M-24-SR	15,10	30,30	179,08	0,005426	12,96	2388,02	13,04	13,21	48000,00	255,05	268,04	127,64	6,83	239553,30	52786,56	65925,93	
M-25-SR	15,15	30,40	180,27	0,005480	13,03	2378,42	13,12	13,29	48000,00	259,43	266,27	126,80	7,29	241600,34	49065,99	46319,75	
M-26-SR	15,10	30,20	179,08	0,005408	12,79	2364,01	12,87	13,01	48000,00	258,85	268,04	127,64	5,49	241331,90	74251,98	61113,20	
M-27-SR	15,30	30,30	183,85	0,005571	13,05	2341,87	13,13	13,29	49000,00	257,95	266,52	126,91	6,29	240910,39	60093,64	57854,81	
M-28-SR	15,20	30,30	181,46	0,005498	12,90	2345,92	12,98	13,10	48500,00	251,61	267,28	127,28	7,00	239243,74	50911,44	60834,07	
M-29-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,95	2346,67	13,04	13,19	49000,00	262,79	270,03	128,59	6,51	243159,93	58226,54	62463,89	
M-30-SR	15,17	30,30	180,74	0,005477	12,81	2338,72	12,90	13,02	48500,00	260,83	268,34	127,78	6,77	242251,37	139690,87	85196,78	
PROMEDIOS	15,17	30,33	180,65	0,005480	12,95	2363,53	13,04	13,17	48466,67	259,98	268,28	127,75	6,57	241936,34	63730,13	60127,73	

3. Resistencia a compresión del concreto de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂ por un período de 30 días

Tabla 73. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂ por un período de 30 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS EXPUESTAS A CO ₂ EN UN PERIODO DE 30 DIAS, SIN RECUBRIMIENTO																	
ASTM C39 / NTP 339.034																	
ELABORADO POR:	Mcs. César Mosqueira Ramírez											TIEMPO DE CURADO	28 DÍAS				
TESIS DOCTORAL:	EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO ₂ , DEL CONCRETO DE F _c = 210 Kg/Cm ² , EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN											CEMENTO:	PORTLAND TIPO I-PACASMAYO				
UBICACIÓN:	UNC-Cajamarca, E.A.P. de Ingeniería Civil.											ADITIVO:	NO				
FECHA DE FABRIC.:	05/09/2017											f _{cr} REQUERIDA:	252 kg/cm ²				
FECHA DE ENSAYO:	05/11/2017											f _c DE DISEÑO:	210 kg/cm ²				
EXPOSICION A CO ₂	30 Días											f _c ESPERADO:	100 %				
													# DE ESPECÍMENES:	15			
PROBETA	DATOS PROBETA ENDURECIDA							DATOS PRUEBA A COMPRESIÓN									
	DIÁM. (cm)	ALT. (cm)	ÁREA (cm ²)	VOL. (m ³)	PESO (kg) 28 DIAS	P.U. (kg/m ³)	PESO (kg) A 30 DIAS DE EXP. AL CO ₂	CARGA ROT. (kg)	ESF. (kg/cm ²)	f _c -OBT. (kg/cm ²)	f _c -OBT. (%)	DEF. ROT. UNIT. (×1000):	MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 (kg/cm ²):		
M-46-SR	15,22	30,20	181,94	0,005494	12,80	2329,80	13,05	49000,00	258,41	269,33	128,25	5,76	241128,46	68758,71	51615,56		
M-47-SR	15,20	30,30	181,46	0,005498	12,86	2339,06	13,14	48500,00	259,04	267,28	127,28	6,50	241419,10	57542,54	54754,90		
M-48-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,86	2330,90	13,21	49000,00	259,25	270,03	128,59	6,22	241517,46	61475,22	59311,64		
M-49-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,89	2336,52	13,18	49000,00	262,37	270,03	128,59	6,51	242967,31	58134,33	52328,71		
M-50-SR	15,18	30,30	180,98	0,005484	12,88	2348,77	13,17	49000,00	259,48	270,75	128,93	6,11	241625,53	63201,21	65497,57		
M-51-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,87	2333,69	13,15	49000,00	259,26	270,03	128,59	6,32	241522,55	60072,07	65746,91		
M-52-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	13,02	2360,08	13,29	48500,00	258,72	267,28	127,28	5,28	241273,68	78866,69	77588,64		
M-53-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,76	2313,67	13,02	49000,00	260,22	270,03	128,59	5,89	241970,02	66926,28	72791,50		
M-54-SR	15,14	30,30	180,03	0,005455	12,91	2365,78	13,19	48500,00	259,09	269,40	128,29	6,36	241441,81	59390,82	63336,07		
M-55-SR	15,18	30,34	180,98	0,005491	12,90	2349,15	13,19	49000,00	261,85	270,75	128,93	6,39	242728,57	59702,80	56295,23		
M-56-SR	15,21	30,40	181,70	0,005524	12,96	2345,57	13,23	49000,00	262,44	269,68	128,42	4,08	242998,51	126235,42	77454,06		
M-57-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,84	2327,99	13,09	49000,00	259,73	270,03	128,59	6,91	241742,50	52921,03	55904,47		
M-58-SR	15,18	30,30	180,98	0,005484	13,12	2393,08	13,41	48500,00	262,00	267,98	127,61	5,18	242797,41	82351,43	79446,45		
M-59-SR	15,20	30,35	181,46	0,005507	12,94	2349,81	13,23	48500,00	257,15	267,28	127,28	5,80	240540,63	67689,88	76173,82		
M-60-SR	15,13	30,30	179,79	0,005448	12,53	2299,88	12,86	48500,00	258,00	269,76	128,46	6,77	240935,12	54136,87	61890,38		
PROMEDIOS	15,19	30,35	181,20	0,005499	12,88	2341,58	13,16	48800,00	259,80	269,31	128,24	6,00	241773,91	67827,02	64675,73		

4. Resistencia a compresión del concreto de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂ por un período de 60 días

Tabla 74. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂ por un período de 60 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS EXPUESTAS A CO ₂ EN UN PERIODO DE 60 DIAS, RECUBIERTAS CON ADITIVO CHEMA SEAL																	
ASTM C39 / NTP 339.034																	
ELABORADO POR:	Mcs. César Mosqueira Ramírez											TIEMPO DE CURADO	28 DÍAS				
TESIS DOCTORAL:	EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO ₂ , DEL CONCRETO DE F _c = 210 Kg/Cm ² , EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN											CEMENTO:	PORTLAND TIPO I-PACASMAYO				
UBICACIÓN:	UNC-Cajamarca, E.A.P. de Ingeniería Civil.											ADITIVO:	RECUBIERTO CON CHEMA SEAL				
FECHA DE FABRIC.:	05/09/2017											f _{cr} REQUERIDA:	252 kg/cm ²				
FECHA DE ENSAYO:	05/12/2017											f _c DE DISEÑO:	210 kg/cm ²				
EXPOSICION A CO ₂	60 Días											f _c ESPERADO:	100 %				
												# DE ESPECÍMENES:	15				
PROBETA	DATOS PROBETA ENDURECIDA							DATOS PRUEBA A COMPRESIÓN									
	DIÁM. (cm)	ALT. (cm)	ÁREA (cm ²)	VOL. (m ³)	PESO (kg) 28 DIAS	P.U. (kg/m ³)	PESO (kg) RECUBIERTO CON ADITIVO	PESO (kg) A 60 DIAS DE EXP. AL CO ₂	CARGA ROT. (kg)	ESF. (kg/cm ²)	f _c -OBT. (kg/cm ²)	f _c -OBT. (%)	DEF. ROT. UNIT. (x1000):	MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 (kg/cm ²):	
M-46-CR	15,20	30,20	181,46	0,005480	12,77	2329,54	12,86	13,16	49500,00	261,36	272,79	129,90	6,36	242497,34	59976,69	65731,00	
M-47-CR	15,30	30,40	183,85	0,005589	12,79	2288,90	12,87	13,17	49000,00	258,00	266,52	126,91	6,05	240934,88	63661,92	60702,34	
M-48-CR	15,20	30,30	181,46	0,005498	12,77	2322,53	12,85	13,12	48500,00	248,75	267,28	127,28	7,23	236577,78	47583,11	44909,13	
M-49-CR	15,20	30,25	181,46	0,005489	12,82	2335,35	12,91	13,19	46000,00	260,79	253,50	120,72	6,55	242234,20	57373,46	49747,95	
M-50-CR	15,20	30,10	181,46	0,005462	12,85	2352,30	12,93	13,20	48500,00	250,49	267,28	127,28	6,43	237403,73	56520,14	57806,56	
M-51-CR	15,20	30,20	181,46	0,005480	12,73	2323,52	12,82	13,06	49000,00	251,88	270,03	128,59	7,25	238060,24	47961,75	47266,35	
M-52-CR	15,20	30,20	181,46	0,005480	12,79	2334,36	12,88	13,19	48500,00	251,97	267,28	127,28	7,12	238101,60	49219,77	56407,06	
M-53-CR	15,30	30,30	183,85	0,005571	12,88	2312,07	12,97	13,20	49500,00	262,17	269,24	128,21	7,29	242873,95	49524,22	41227,17	
M-54-CR	15,15	30,40	180,27	0,005480	12,94	2360,90	13,03	13,25	47000,00	246,07	260,73	124,15	6,02	235300,47	61156,02	54478,60	
M-55-CR	15,20	30,40	181,46	0,005516	13,03	2362,80	13,11	13,28	48000,00	254,39	264,52	125,96	7,05	239246,42	50352,59	60004,91	
M-56-CR	15,22	30,33	181,94	0,005518	12,92	2341,03	13,00	13,21	48000,00	261,00	263,83	125,63	7,14	242332,82	52307,10	58351,13	
M-57-CR	15,15	30,40	180,27	0,005480	12,92	2357,98	13,01	13,24	47000,00	253,12	260,73	124,15	7,14	238646,57	49262,95	43649,75	
M-58-CR	15,10	30,30	179,08	0,005426	12,93	2383,30	13,02	13,25	46500,00	250,37	259,66	123,65	7,23	237345,65	47892,50	48649,96	
M-59-CR	15,20	30,40	181,46	0,005516	13,25	2402,50	13,34	13,29	48500,00	254,06	267,28	127,28	7,40	239089,67	47036,99	43038,47	
M-60-CR	15,15	30,30	180,27	0,005462	13,00	2380,54	13,09	13,26	47500,00	249,91	263,50	125,48	5,83	237129,65	65179,03	68294,96	
PROMEDIOS	15,20	30,30	181,41	0,005497	12,89	2345,84	12,98	13,20	48066,67	254,29	264,94	126,16	6,81	239185,00	53667,22	53351,02	

5. Resistencia a compresión del concreto de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂ por un período de 60 días

Tabla 75. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂ por un período de 60 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS EXPUESTAS A CO ₂ EN UN PERIODO DE 60 DIAS, SIN RECUBRIMIENTO																
ASTM C39 / NTP 339.034																
ELABORADO POR:	Mcs. César Mosqueira Ramírez											TIEMPO DE CURADO	28 DÍAS			
TESIS DOCTORAL:	EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO ₂ , DEL CONCRETO DE F'c = 210 Kg/Cm ² , EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN											CEMENTO:	PORTLAND TIPO I-PACASMAYO			
UBICACIÓN:	UNC-Cajamarca, E.A.P. de Ingeniería Civil.											ADITIVO:	NO			
FECHA DE FABRIC.:	05/09/2017											f'cr REQUERIDA:	252 kg/cm ²			
FECHA DE ENSAYO:	05/12/2017											f'c DE DISEÑO:	210 kg/cm ²			
EXPOSICION A CO ₂	60 Días											f'c ESPERADO:	100 %			
												# DE ESPECÍMENES:	15			
PROBETA	DATOS PROBETA ENDURECIDA							DATOS PRUEBA A COMPRESIÓN								
	DIÁM. (cm)	ALT. (cm)	ÁREA (cm ²)	VOL. (m ³)	PESO (kg) 28 DIAS	P.U. (kg/m ³)	PESO (kg) A 60 DIAS DE EXP. AL CO ₂	CARGA ROT. (kg)	ESF. (kg/cm ²)	f'c-OBT. (kg/cm ²)	f'c-OBT. (%)	DEF. ROT. UNIT. (x1000):	MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 (kg/cm ²):	
M-61-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,76	2312,40	13,02	49000,00	261,17	270,03	128,59	6,27	242413,64	61098,27	62597,71	
M-62-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,97	2351,74	13,28	48000,00	248,17	264,52	125,96	6,58	236303,18	54198,96	54422,71	
M-63-SR	15,19	30,40	181,22	0,005509	12,89	2338,87	13,18	48000,00	264,27	264,87	126,13	7,63	243844,54	46925,98	41531,85	
M-64-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,88	2334,88	13,18	48500,00	262,26	267,28	127,28	7,01	242914,41	52382,11	59097,82	
M-65-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,78	2316,76	13,09	48500,00	253,20	267,28	127,28	6,64	238684,39	54513,54	55827,53	
M-66-SR	15,16	30,30	180,50	0,005469	12,98	2373,25	13,30	48500,00	267,01	268,69	127,95	7,00	245108,19	53437,96	56356,05	
M-67-SR	15,10	30,20	179,08	0,005408	12,95	2393,97	13,24	48500,00	257,93	270,83	128,97	6,95	240903,01	52068,77	71415,52	
M-68-SR	15,15	30,30	180,27	0,005462	12,89	2359,95	13,24	48000,00	264,25	266,27	126,80	6,73	243838,19	55836,01	54724,64	
M-69-SR	15,18	30,30	180,98	0,005484	12,76	2327,43	13,06	49000,00	262,87	270,75	128,93	7,00	243200,94	52609,57	50321,60	
M-70-SR	15,22	30,40	181,94	0,005531	12,76	2306,51	13,03	48500,00	256,46	266,58	126,94	6,94	240216,14	51906,95	54393,29	
M-71-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	13,05	2364,98	13,30	49000,00	266,52	270,03	128,59	6,91	244881,45	54304,27	49100,14	
M-72-SR	15,20	30,30	181,46	0,005498	12,87	2340,59	13,17	48500,00	261,40	267,28	127,28	7,19	242517,18	50319,97	60058,09	
M-73-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,83	2325,82	13,11	48000,00	254,88	264,52	125,96	6,91	239473,00	51932,04	50145,44	
M-74-SR	15,12	30,20	179,55	0,005423	12,95	2388,38	13,26	47500,00	255,28	264,55	125,97	6,92	239661,72	51880,36	52353,40	
M-75-SR	15,21	30,40	181,70	0,005524	12,95	2344,13	13,26	48000,00	247,70	264,18	125,80	7,01	236077,34	59525,42	59525,42	
PROMEDIOS	15,18	30,35	181,03	0,005494	12,88	2345,31	13,18	48366,67	258,89	267,18	127,23	6,91	241335,82	53529,35	55458,08	

6. Resistencia a compresión del concreto de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂ por un período de 90 días

Tabla 76. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂ por un período de 90 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS EXPUESTAS A CO ₂ EN UN PERIODO DE 90 DIAS, RECUBIERTAS CON ADITIVO CHEMA SEAL																	
ASTM C39 / NTP 339.034																	
ELABORADO POR:	Mcs. César Mosqueira Ramírez											TIEMPO DE CURADO	28 DÍAS				
TESIS DOCTORAL:	EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO ₂ , DEL CONCRETO DE F _c = 210 Kg/Cm ² , EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN											CEMENTO:	PORTLAND TIPO I-PACASMAYO				
UBICACIÓN:	UNC-Cajamarca, E.A.P. de Ingeniería Civil.											ADITIVO:	RECUBIERTO CON CHEMA SEAL				
FECHA DE FABRIC.:	08/09/2017											f _{cr} REQUERIDA:	252 kg/cm ²				
FECHA DE ENSAYO:	07/01/2018											f _c DE DISEÑO:	210 kg/cm ²				
EXPOSICION A CO ₂	90 Días											f _c ESPERADO:	100 %				
												# DE ESPECÍMENES:	15				
PROBETA	DATOS PROBETA ENDURECIDA								DATOS PRUEBA A COMPRESIÓN								
	DIÁM. (cm)	ALT. (cm)	ÁREA (cm ²)	VOL. (m ³)	PESO (kg) 28 DIAS	P.U. (kg/m ³)	PESO (kg) RECUBIERTO CON ADITIVO	PESO (kg) A 90 DIAS DE EXP. AL CO ₂	CARGA ROT. (kg)	ESF. (kg/cm ²)	f _c -OBT. (kg/cm ²)	f _c -OBT. (%)	DEF. ROT. UNIT. (x1000):	MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 (kg/cm ²):	
M-76-CR	15,18	30,30	180,98	0,005484	12,89	2351,41	12,98	13,19	46000,00	243,06	254,17	121,03	6,80	233853,55	50650,49	63874,47	
M-77-CR	15,25	30,30	182,65	0,005534	12,94	2338,46	13,03	13,24	47000,00	250,74	257,32	122,53	6,34	237519,73	57818,14	72186,28	
M-78-CR	15,20	30,30	181,46	0,005498	12,86	2338,41	12,94	13,18	44000,00	239,00	242,48	115,47	5,88	231896,47	61607,44	55767,79	
M-79-CR	15,10	30,40	179,08	0,005444	12,96	2380,06	13,04	13,25	46000,00	251,42	256,87	122,32	6,58	237844,32	54908,23	46310,45	
M-80-CR	15,18	30,30	180,98	0,005484	12,92	2355,51	13,00	13,21	46000,00	239,76	254,17	121,03	6,93	232260,77	48625,18	49264,01	
M-81-CR	15,25	30,40	182,65	0,005553	12,91	2324,64	12,99	13,20	47000,00	240,23	257,32	122,53	7,07	232491,12	47360,84	53852,76	
M-82-CR	15,22	30,20	181,94	0,005494	12,84	2337,44	12,93	13,17	46000,00	237,10	252,84	120,40	6,99	230968,96	47545,20	56834,67	
M-83-CR	15,10	30,40	179,08	0,005444	12,95	2378,95	13,04	13,29	46000,00	245,15	256,87	122,32	7,17	234858,98	47408,13	47975,69	
M-84-CR	15,19	30,30	181,22	0,005491	12,90	2349,92	12,99	13,19	45000,00	239,68	248,32	118,25	6,47	232221,83	53634,91	49232,12	
M-85-CR	15,10	30,30	179,08	0,005426	12,95	2386,62	13,04	13,29	46000,00	242,16	256,87	122,32	6,80	233421,31	50463,42	55159,63	
M-86-CR	15,10	30,30	179,08	0,005426	12,88	2372,98	12,96	13,19	45000,00	240,09	251,29	119,66	7,15	232423,16	47116,35	45131,10	
M-87-CR	15,17	30,20	180,74	0,005458	12,92	2367,71	13,01	13,24	45000,00	242,89	248,97	118,56	7,15	233775,00	47142,32	40619,32	
M-88-CR	15,14	30,28	180,03	0,005451	12,92	2370,27	13,00	13,24	46000,00	251,35	255,51	121,67	6,97	237812,19	50591,58	52031,38	
M-89-CR	15,15	30,40	180,27	0,005480	12,99	2370,21	13,07	13,39	45000,00	245,83	249,63	118,87	7,17	235186,25	47540,35	61452,38	
M-90-CR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,93	2343,77	13,01	13,23	46000,00	241,11	253,50	120,72	6,58	232916,38	52656,49	64612,22	
PROMEDIOS	15,17	30,32	180,71	0,005479	12,92	2357,76	13,00	13,23	45733,33	243,30	253,07	120,51	6,80	233963,33	51004,60	54286,95	

7. Resistencia a compresión del concreto de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂ por un período de 90 días

Tabla 77. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂ por un período de 90 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS EXPUESTAS A CO ₂ EN UN PERIODO DE 90 DIAS, SIN RECUBRIMIENTO																	
ASTM C39 / NTP 339.034																	
ELABORADO POR:	Mcs. César Mosqueira Ramírez											TIEMPO DE CURADO	28 DÍAS				
TESIS DOCTORAL:	EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO ₂ , DEL CONCRETO DE $f'c = 210 \text{ Kg/Cm}^2$, EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN											CEMENTO:	PORTLAND TIPO I-PACASMAYO				
UBICACIÓN:	UNC-Cajamarca, E.A.P. de Ingeniería Civil.											ADITIVO:	NO				
FECHA DE FABRIC.:	08/09/2017											$f'cr$ REQUERIDA:	252 kg/cm ²				
FECHA DE ENSAYO:	07/01/2018											$f'c$ DE DISEÑO:	210 kg/cm ²				
EXPOSICION A CO ₂	90 Días											$f'c$ ESPERADO:	100 %				
													# DE ESPECÍMENES:	15			
PROBETA	DATOS PROBETA ENDURECIDA							DATOS PRUEBA A COMPRESIÓN									
	DIÁM. (cm)	ALT. (cm)	ÁREA (cm ²)	VOL. (m ³)	PESO (kg) 28 DIAS	P.U. (kg/m ³)	PESO (kg) A 90 DIAS DE EXP. AL CO ₂	CARGA ROT. (kg)	ESF. (kg/cm ²)	$f'c$ -OBT. (kg/cm ²)	$f'c$ -OBT. (%)	DEF. ROT. UNIT. (×1000):	MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 (kg/cm ²):		
M-91-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,89	2336,52	13,17	45000,00	244,19	247,99	118,09	7,11	234399,44	47771,31	51021,24		
M-92-SR	15,20	30,30	181,46	0,005498	12,82	2332,04	13,14	46000,00	242,38	253,50	120,72	6,30	233529,06	56428,41	64284,88		
M-93-SR	15,22	30,40	181,94	0,005531	12,86	2325,14	13,15	44500,00	243,21	244,59	116,47	7,37	233925,89	45303,06	47358,38		
M-94-SR	15,11	30,20	179,32	0,005415	12,80	2363,47	12,99	44500,00	242,44	248,17	118,17	6,82	233555,12	50285,39	56649,92		
M-95-SR	15,14	30,30	180,03	0,005455	13,05	2391,63	13,36	45000,00	241,06	249,96	119,03	6,83	232893,82	49892,47	54820,01		
M-96-SR	15,15	30,30	180,27	0,005462	12,90	2361,56	13,18	44500,00	243,25	246,86	117,55	7,00	233946,64	48681,94	58909,95		
M-97-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,87	2333,43	13,16	46000,00	240,55	253,50	120,72	6,91	232646,44	49013,43	67629,30		
M-98-SR	15,18	30,40	180,98	0,005502	12,80	2327,23	13,12	44000,00	241,44	243,12	115,77	6,97	233076,21	48543,96	59629,17		
M-99-SR	15,12	30,20	179,55	0,005423	12,89	2377,68	13,18	45000,00	245,88	250,62	119,34	7,22	235209,72	47117,12	62311,48		
M-100-SR	15,15	30,30	180,27	0,005462	12,85	2352,59	13,15	45000,00	247,24	249,63	118,87	7,13	235857,71	48206,91	59452,15		
M-101-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,91	2341,05	13,19	46000,00	240,89	253,50	120,72	6,97	232811,27	48433,66	59173,11		
M-102-SR	15,21	30,40	181,70	0,005524	12,92	2339,06	13,19	46000,00	246,04	253,17	120,56	6,55	235283,52	54121,03	60796,15		
M-103-SR	15,15	30,30	180,27	0,005462	13,15	2406,78	13,56	44000,00	240,37	244,08	116,23	7,19	233070,71	46476,22	50413,43		
M-104-SR	15,20	30,35	181,46	0,005507	12,99	2359,07	13,23	45000,00	238,62	247,99	118,09	7,13	231711,80	46539,42	52817,38		
M-105-SR	15,18	30,40	180,98	0,005502	12,88	2340,13	13,17	46000,00	237,89	254,17	121,03	6,71	231354,78	59475,10	59475,10		
PROMEDIOS	15,17	30,34	180,84	0,005486	12,91	2352,49	13,20	45100,00	242,36	249,39	118,76	6,95	233551,48	49752,63	57649,44		

8. Resistencia a compresión del concreto de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, 120 días

Tabla 78. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂ por un período de 120 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS EXPUESTAS A CO ₂ EN UN PERIODO DE 120 DIAS, RECUBIERTAS CON ADITIVO CHEMA SEAL																	
ASTM C39 / NTP 339.034																	
ELABORADO POR:	Mcs. César Mosqueira Ramírez											TIEMPO DE CURADO	28 DÍAS				
TESIS DOCTORAL:	EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO ₂ , DEL CONCRETO DE F'c = 210 Kg/Cm ² , EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN											CEMENTO:	PORTLAND TIPO I-PACASMAYO				
UBICACIÓN:	UNC-Cajamarca, E.A.P. de Ingeniería Civil.											ADITIVO:	RECUBIERTO CON CHEMA SEAL				
FECHA DE FABRIC.:	08/09/2017											f'cr REQUERIDA:	252 kg/cm ²				
FECHA DE ENSAYO:	06/02/2018											f'c DE DISEÑO:	210 kg/cm ²				
EXPOSICION A CO ₂	120 Días											f'c ESPERADO:	100 %				
													# DE ESPECÍMENES:	15			
PROBETA	DATOS PROBETA ENDURECIDA								DATOS PRUEBA A COMPRESIÓN								
	DIÁM. (cm)	ALT. (cm)	ÁREA (cm ²)	VOL. (m ³)	PESO (kg) 28 DIAS	P.U. (kg/m ³)	PESO (kg) RECUBIERTO CON ADITIVO	PESO (kg) A 120 DIAS DE EXP. AL CO ₂	CARGA ROT. (kg)	ESF. (kg/cm ²)	f'c-OBT. (kg/cm ²)	f'c-OBT. (%)	DEF. ROT. UNIT. (x1000):	MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 (kg/cm ²):	
M-106-CR	15,10	30,40	179,08	0,005444	12,68	2328,62	12,76	13,33	45000,00	245,10	251,29	119,66	8,31	234835,51	38868,38	53371,49	
M-107-CR	15,10	30,30	179,08	0,005426	12,99	2394,55	13,08	13,19	45000,00	245,99	251,29	119,66	7,56	235260,11	44260,33	56690,56	
M-108-CR	15,15	30,35	180,27	0,005471	12,85	2348,16	12,93	13,16	45000,00	243,09	249,63	118,87	7,51	233871,04	44099,45	49493,89	
M-109-CR	15,24	30,30	182,41	0,005527	12,82	2318,73	12,90	13,27	46000,00	241,97	252,17	120,08	7,54	233333,04	43673,06	51289,89	
M-110-CR	15,14	30,30	180,03	0,005455	12,95	2374,76	13,04	13,33	45000,00	241,69	249,96	119,03	7,51	233195,80	43825,32	44946,21	
M-111-CR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,90	2338,33	12,98	13,19	46000,00	232,70	253,50	120,72	7,88	228815,47	39605,86	48776,48	
M-112-CR	15,20	30,30	181,46	0,005498	12,87	2340,59	12,96	13,16	46000,00	233,94	253,50	120,72	7,31	229425,35	44082,92	48665,67	
M-113-CR	15,18	30,40	180,98	0,005502	12,84	2334,13	12,93	13,13	46000,00	239,70	254,17	121,03	7,70	232232,87	42071,75	42902,55	
M-114-CR	15,16	30,30	180,50	0,005469	12,82	2344,55	12,91	13,30	45000,00	236,53	249,30	118,71	6,26	230692,12	55492,11	58228,04	
M-115-CR	15,14	30,30	180,03	0,005455	12,94	2372,19	13,03	13,18	46000,00	237,10	255,51	121,67	7,33	230968,39	44510,42	46906,98	
M-116-CR	15,16	30,35	180,50	0,005478	12,86	2348,23	12,95	13,30	45000,00	237,33	249,30	118,71	6,66	231081,10	45215,70	46530,90	
M-117-CR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,97	2351,56	13,06	13,27	46000,00	243,10	253,50	120,72	6,66	233876,60	52130,58	55840,87	
M-118-CR	15,17	30,30	180,74	0,005477	12,96	2365,74	13,05	13,33	45000,00	238,38	248,97	118,56	8,05	231595,80	39378,84	46280,99	
M-119-CR	15,20	30,40	181,46	0,005516	13,03	2361,35	13,11	13,30	46000,00	244,94	253,50	120,72	7,24	234756,33	46771,64	52321,53	
M-120-CR	15,19	30,35	181,22	0,005500	13,00	2363,26	13,08	13,25	45000,00	240,68	248,32	118,25	6,72	232708,57	51031,69	60277,37	
PROMEDIOS	15,17	30,34	180,71	0,005483	12,90	2352,32	12,98	13,25	45466,67	240,15	251,59	119,81	7,35	232443,21	45001,20	50834,89	

9. Resistencia a compresión del concreto de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂ por un período de 120 días

Tabla 79. Resumen de las características del concreto de las 15 muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂ por un período de 120 días, en estado endurecido, prueba a compresión, módulo de elasticidad

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS EXPUESTAS A CO ₂ EN UN PERIODO DE 120 DIAS, SIN RECUBRIMIENTO																
ASTM C39 / NTP 339.034																
ELABORADO POR:	Mcs. César Mosqueira Ramírez											TIEMPO DE CURADO	28 DÍAS			
TESIS DOCTORAL:	EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL CO ₂ , DEL CONCRETO DE F _c = 210 Kg/Cm ² , EN LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN Y EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN											CEMENTO:	PORTLAND TIPO I-PACASMAYO			
UBICACIÓN:	UNC-Cajamarca, E.A.P. de Ingeniería Civil.											ADITIVO:	NO			
FECHA DE FABRIC.:	08/09/2017											f _{cr} REQUERIDA:	252 kg/cm ²			
FECHA DE ENSAYO:	06/02/2018											f _c DE DISEÑO:	210 kg/cm ²			
EXPOSICION A CO ₂	120 Días											f _c ESPERADO:	100 %			
												# DE ESPECÍMENES:	15			
PROBETA	DATOS PROBETA ENDURECIDA						DATOS PRUEBA A COMPRESIÓN									
	DIÁM. (cm)	ALT. (cm)	ÁREA (cm ²)	VOL. (m ³)	PESO (kg) 28 DIAS	P.U. (kg/m ³)	PESO (kg) A 120 DIAS DE EXP. AL CO ₂	CARGA ROT. (kg)	ESF. (kg/cm ²)	f _c -OBT. (kg/cm ²)	f _c -OBT. (%)	DEF. ROT. UNIT. (x1000):	MÓD. ELAST. POR FÓRM. - E1 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E2 (kg/cm ²):	MÓD. ELAST. POR GRÁFICO - E3 (kg/cm ²):	
M-121-SR	15,12	30,20	179,55	0,005423	12,89	2377,13	13,13	44000,00	232,47	245,05	116,69	6,62	228706,54	50291,68	61318,20	
M-122-SR	15,19	30,40	181,22	0,005509	12,96	2351,75	13,24	44000,00	232,83	242,80	115,62	6,81	228880,32	48412,84	66529,79	
M-123-SR	15,25	30,40	182,65	0,005553	12,97	2335,27	13,26	44000,00	229,51	240,89	114,71	7,30	227243,72	43282,25	46484,68	
M-124-SR	15,20	30,30	181,46	0,005498	12,95	2354,78	13,20	44000,00	227,73	242,48	115,47	7,16	226363,24	44119,97	53108,11	
M-125-SR	15,18	30,30	180,98	0,005484	13,35	2433,74	13,60	44000,00	224,29	243,12	115,77	7,76	224646,93	38968,58	49162,25	
M-126-SR	15,20	30,30	181,46	0,005498	13,10	2382,42	13,40	44000,00	231,37	242,48	115,47	6,93	228161,47	46923,90	57751,74	
M-127-SR	15,22	30,40	181,94	0,005531	12,88	2328,21	13,17	44000,00	234,87	241,84	115,16	7,01	229882,39	46912,42	57946,92	
M-128-SR	15,25	30,30	182,65	0,005534	13,11	2368,27	13,40	44000,00	228,64	240,89	114,71	7,36	226814,77	42659,60	51183,61	
M-129-SR	15,10	30,30	179,08	0,005426	12,98	2391,41	13,21	44000,00	234,98	245,70	117,00	7,29	229933,72	44387,54	61423,21	
M-130-SR	15,15	30,30	180,27	0,005462	12,89	2358,99	13,17	44000,00	230,77	244,08	116,23	7,23	227867,91	44143,96	68521,60	
M-131-SR	15,12	30,40	179,55	0,005458	12,95	2371,56	13,21	44000,00	231,52	245,05	116,69	7,50	228237,29	42094,76	60222,32	
M-132-SR	15,10	30,30	179,08	0,005426	12,94	2385,51	13,20	43000,00	235,20	240,12	114,34	6,90	230045,88	48023,65	51594,43	
M-133-SR	15,20	30,40	181,46	0,005516	12,93	2343,22	13,19	44000,00	229,27	242,48	115,47	7,37	227123,06	42706,44	45571,65	
M-134-SR	15,25	30,40	182,65	0,005553	12,89	2321,22	13,18	44000,00	225,11	240,89	114,71	7,40	225055,75	41677,16	66059,55	
M-135-SR	15,10	30,30	179,08	0,005426	12,77	2353,82	13,06	43000,00	234,23	240,12	114,34	6,67	229570,53	63018,16	63018,16	
PROMEDIOS	15,18	30,33	180,87	0,005486	12,97	2363,82	13,24	43866,67	230,85	242,53	115,49	7,15	227902,24	45841,53	57326,41	

D. Profundidad de carbonatación de muestras

Tabla 80. Profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, 30 días

MUESTRAS RECUBIERTAS CON ADITIVO CHEMA SEAL	N°	LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO			Prom.
		Superior	Centro	Inferior	Superior	Centro	Inferior	
		M-16-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-17-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-18-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-19-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-20-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-21-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-22-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-23-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-24-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-25-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-26-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-27-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-28-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-29-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-30-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION PROMEDIO				0.00				

Tabla 81. Profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, 60 días

MUESTRAS RECUBIERTAS CON ADITIVO CHEMA SEAL	N°	LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO			Prom.
		Superior	Centro	Inferior	Superior	Centro	Inferior	
		M-46-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-47-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-48-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-49-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-50-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-51-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-52-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-53-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-54-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-55-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-56-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-57-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-58-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-59-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-60-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION PROMEDIO				0.00				

Tabla 82. Profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, 90 días

MUESTRAS RECUBIERTAS CON ADITIVO CHEMA SEAL	N°	LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO			Prom.
		Superior	Centro	Inferior	Superior	Centro	Inferior	
		M-76-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-77-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-78-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-79-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-80-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-81-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-82-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-83-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-84-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-85-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-86-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-87-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-88-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-89-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
M-90-CR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION PROMEDIO				0.00				

Tabla 83. Profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, 120 días

MUESTRAS RECUBIERTAS CON ADITIVO CHEMA SEAL	N°	LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO			Prom.
		Superior	Centro	Inferior	Superior	Centro	Inferior	
		M-106-CR	1.00	1.00	0.00	1.30	1.30	
M-107-CR	1.20	1.00	1.00	1.50	1.10	1.00	1.13	
M-108-CR	1.30	1.20	0.00	1.30	1.00	1.00	0.97	
M-109-CR	1.00	1.00	1.30	1.20	0.00	1.00	0.92	
M-110-CR	1.00	0.00	1.00	1.20	1.00	1.30	0.92	
M-111-CR	0.00	1.10	1.10	1.30	1.10	1.30	0.98	
M-112-CR	1.00	1.10	1.00	1.30	0.00	1.00	0.90	
M-113-CR	1.30	1.20	0.00	1.00	1.00	1.10	0.93	
M-114-CR	1.40	0.00	1.00	1.20	1.20	0.00	0.80	
M-115-CR	1.00	1.20	1.30	1.30	1.00	1.00	1.13	
M-116-CR	0.00	1.20	1.30	1.20	1.10	1.00	0.97	
M-117-CR	1.00	0.00	1.00	1.10	1.10	1.30	0.92	
M-118-CR	1.10	1.00	0.00	1.30	1.10	1.30	0.97	
M-120-CR	1.00	0.00	1.10	1.50	1.20	1.40	1.03	
M-121-CR	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.20	0.87	
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION PROMEDIO				0.96				

Tabla 84. Profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂, 30 días

	N°	LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO			Prom.
		Superior	Centro	Inferior	Superior	Centro	Inferior	
M-31-SR	2.20	1.60	1.50	1.80	1.80	2.40	1.88333	
M-32-SR	1.50	2.00	2.30	2.00	2.30	2.50	2.10000	
M-33-SR	2.20	2.50	2.00	2.60	2.00	2.40	2.28333	
M-34-SR	3.00	1.00	2.40	2.10	2.40	2.20	2.18333	
M-35-SR	2.50	2.00	1.50	2.00	2.50	1.40	1.98333	
M-36-SR	2.40	1.50	2.00	1.80	1.50	1.50	1.78333	
M-37-SR	2.40	1.60	2.00	1.50	2.00	1.50	1.83333	
M-38-SR	2.00	3.00	1.00	2.90	1.60	2.00	2.08333	
M-39-SR	3.10	2.40	2.60	2.50	2.50	2.60	2.61667	
M-40-SR	2.00	2.00	2.00	2.50	3.00	2.00	2.25000	
M-41-SR	1.50	2.00	2.00	1.50	2.50	2.50	2.00000	
M-42-SR	2.00	3.00	1.50	1.60	1.50	1.90	1.91667	
M-43-SR	3.20	2.40	2.00	1.60	2.00	2.00	2.20000	
M-44-SR	2.00	2.50	2.20	2.00	1.50	1.80	2.00000	
M-45-SR	2.10	1.50	2.00	2.10	2.80	2.50	2.16667	
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION PROMEDIO							2.09	

Tabla 85. Profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂, 60 días

	N°	LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO			Prom.
		Superior	Centro	Inferior	Superior	Centro	Inferior	
M-61-SR	2.20	2.20	2.40	2.10	2.10	2.10	2.18	
M-62-SR	2.00	2.80	3.00	2.40	3.00	3.40	2.77	
M-63-SR	2.80	3.50	3.10	3.30	2.50	4.40	3.27	
M-64-SR	3.90	2.10	4.50	3.60	0.00	4.00	3.02	
M-65-SR	3.20	2.60	2.60	2.50	3.50	2.00	2.73	
M-66-SR	2.20	2.10	2.00	2.00	2.00	2.40	2.12	
M-67-SR	3.00	1.40	1.00	2.00	2.50	2.30	2.03	
M-68-SR	2.70	3.80	1.60	3.50	2.60	3.00	2.87	
M-69-SR	3.20	3.00	3.80	3.60	3.40	3.20	3.37	
M-70-SR	2.60	2.60	3.20	3.00	3.70	3.00	3.02	
M-71-SR	2.00	2.70	3.30	2.00	3.20	3.30	2.75	
M-72-SR	2.40	4.00	2.10	2.10	2.80	3.10	2.75	
M-73-SR	3.90	3.50	3.00	2.40	2.40	3.00	3.03	
M-74-SR	2.50	3.20	3.10	2.50	2.00	2.90	2.70	
M-75-SR	2.80	2.00	2.00	3.70	3.40	2.10	2.67	
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION PROMEDIO							2.75	

Tabla 86 Profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂, 90 días

	N°	LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO			Prom.
		Superior	Centro	Inferior	Superior	Centro	Inferior	
M-91-SR	3.00	3.40	3.60	3.00	3.20	3.60	3.30	
M-92-SR	2.50	3.20	2.80	2.80	3.00	2.60	2.82	
M-93-SR	4.20	4.10	3.80	4.40	3.40	3.80	3.95	
M-94-SR	3.00	2.70	2.50	3.00	3.00	3.00	2.87	
M-95-SR	5.00	4.50	4.50	3.00	3.20	4.00	4.03	
M-96-SR	5.00	3.00	3.50	2.00	2.60	3.50	3.27	
M-97-SR	0.00	3.50	4.00	5.00	3.00	4.50	3.33	
M-98-SR	3.80	5.20	4.00	5.00	4.00	4.00	4.33	
M-99-SR	3.20	3.20	3.50	5.00	5.00	5.00	4.15	
M-100-SR	5.00	3.00	3.60	3.10	2.80	3.00	3.42	
M-101-SR	4.10	5.00	5.00	3.50	3.60	3.00	4.03	
M-102-SR	3.00	3.20	3.00	3.00	3.10	4.00	3.22	
M-103-SR	3.00	3.00	3.00	4.00	4.00	3.00	3.33	
M-104-SR	3.20	3.10	3.00	2.90	2.55	3.30	3.01	
M-105-SR	2.70	3.00	3.00	3.00	2.40	2.80	2.82	
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION PROMEDIO							3.46	

Tabla 87. Profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento, expuestas a CO₂, 120 días

	N°	LADO DERECHO			LADO IZQUIERDO			Prom.
		Superior	Centro	Inferior	Superior	Centro	Inferior	
M-121-SR	3.50	3.50	3.90	4.00	4.10	3.70	3.78	
M-122-SR	3.10	3.00	3.70	3.30	3.60	3.50	3.37	
M-123-SR	4.30	3.00	3.60	3.00	3.20	3.00	3.35	
M-124-SR	3.40	3.20	3.20	2.70	3.10	3.10	3.12	
M-125-SR	3.50	5.30	5.00	5.20	4.30	3.70	4.50	
M-126-SR	2.50	5.20	3.50	4.00	4.00	3.10	3.72	
M-127-SR	5.30	0.50	4.00	4.50	5.00	3.50	3.80	
M-128-SR	6.00	4.30	4.50	4.50	4.50	4.00	4.63	
M-129-SR	5.00	2.80	2.90	3.00	5.00	3.00	3.62	
M-130-SR	3.80	5.10	3.50	4.10	3.50	4.00	4.00	
M-131-SR	4.00	4.60	5.50	5.20	3.80	4.10	4.53	
M-132-SR	3.50	3.50	3.70	3.50	4.50	3.60	3.72	
M-133-SR	4.50	3.80	3.50	3.50	3.50	4.50	3.88	
M-134-SR	3.20	3.60	3.40	4.00	3.70	2.60	3.42	
M-135-SR	4.00	3.80	4.00	3.50	2.80	3.00	3.52	
PROFUNDIDAD DE CARBONATACION PROMEDIO							3.80	

E. Pesos, diámetro y altura de muestras carbonatadas

Tabla 88. Características de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, 30 días

RECUBIERTAS CON ADIVO	N°		PESO MUESTRAS A	PESO MUESTRAS	PESO MUESTRAS A	DIAMETRO MUESTRA	ALTURA DE MUESTRA
			LOS 28 DIAS DE CURADO	CON RECUBRIMIENTO ADITIVADO	30 DIAS DE EXP. AL CO ₂	(cm)	(cm)
M - 16	C/R		12963.50	13038.50	13320.00	15.20	30.25
M - 17	C/R		12837.00	12927.00	13090.00	15.17	30.30
M - 18	C/R		13152.00	13241.00	13300.00	15.10	30.40
M - 19	C/R		13144.00	13231.00	13410.00	15.24	30.40
M - 20	C/R		12848.20	12934.25	13090.00	15.16	30.35
M - 21	C/R		12990.00	13070.00	13210.00	15.10	30.40
M - 22	C/R		12667.00	12757.00	12950.00	15.00	30.30
M - 23	C/R		12887.00	12967.00	13140.00	15.30	30.40
M - 24	C/R		12957.60	13038.60	13210.00	15.10	30.30
M - 25	C/R		13034.00	13116.00	13290.00	15.15	30.40
M - 26	C/R		12785.00	12868.00	13010.00	15.10	30.20
M - 27	C/R		13046.00	13130.00	13290.00	15.30	30.30
M - 28	C/R		12898.30	12983.35	13100.00	15.20	30.30
M - 29	C/R		12945.00	13035.00	13190.00	15.20	30.40
M - 30	C/R		12808.00	12895.00	13020.00	15.17	30.30

Tabla 89. Características de las muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, 30 días

SIN RECUBRIMIENTO	N°		PESO MUESTRAS A	PESO MUESTRAS A	DIAMETRO MUESTRA	ALTURA DE MUESTRA
			LOS 28 DIAS DE CURADO	30 DIAS DE EXP. AL CO ₂	(cm)	(cm)
M - 31	S/R		12801.00	13046.00	15.22	30.20
M - 32	S/R		12860.60	13140.60	15.20	30.30
M - 33	S/R		12858.00	13208.20	15.20	30.40
M - 34	S/R		12889.00	13182.00	15.20	30.40
M - 35	S/R		12880.00	13168.40	15.18	30.30
M - 36	S/R		12873.40	13152.40	15.20	30.40
M - 37	S/R		13019.00	13293.00	15.18	30.30
M - 38	S/R		12763.00	13024.25	15.20	30.40
M - 39	S/R		12905.00	13185.00	15.14	30.30
M - 40	S/R		12899.10	13191.10	15.18	30.34
M - 41	S/R		12956.00	13229.15	15.21	30.40
M - 42	S/R		12842.00	13085.00	15.20	30.40
M - 43	S/R		13123.00	13410.45	15.20	30.35
M - 44	S/R		12941.00	13226.00	15.20	30.35
M - 45	S/R		12529.00	12860.65	15.13	30.30

Tabla 90. Características de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, 60 día.

RECUBIERTAS CON ADIVO	N°		PESO MUESTRAS A	PESO MUESTRAS	PESO MUESTRAS A	DIAMETRO MUESTRA	ALTURA DE MUESTRA
			LOS 28 DIAS DE CURADO	CON RECUBRIMIENTO ADITIVADO	60 DIAS DE EXP. AL CO ₂	(cm)	(cm)
M - 46	C/R		12766.00	12859.00	13160.00	15.20	30.200
M - 47	C/R		12793.00	12873.00	13165.00	15.30	30.400
M - 48	C/R		12769.70	12850.70	13120.00	15.20	30.300
M - 49	C/R		12819.00	12911.00	13190.00	15.20	30.250
M - 50	C/R		12848.00	12931.00	13195.00	15.20	30.100
M - 51	C/R		12733.00	12817.00	13060.00	15.20	30.200
M - 52	C/R		12792.40	12877.40	13190.00	15.20	30.200
M - 53	C/R		12880.00	12966.00	13203.00	15.30	30.300
M - 54	C/R		12938.00	13025.00	13250.00	15.15	30.400
M - 55	C/R		13034.00	13114.00	13275.00	15.20	30.400
M - 56	C/R		12918.10	12999.10	13207.00	15.22	30.300
M - 57	C/R		12922.00	13007.00	13241.00	15.15	30.400
M - 58	C/R		12932.00	13015.00	13245.00	15.10	30.300
M - 59	C/R		13253.00	13337.00	13290.00	15.20	30.400
M - 60	C/R		13002.70	13087.70	13255.00	15.15	30.300

Tabla 91. Características de las muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, 60 días

SIN RECUBRIMIENTO	N°		PESO MUESTRAS A	PESO MUESTRAS A	DIAMETRO MUESTRA	ALTURA DE MUESTRA
			LOS 28 DIAS DE CURADO	60 DIAS DE EXP. AL CO ₂	(cm)	(cm)
M - 61	S/R		12756.00	13020.00	15.200	30.400
M - 62	S/R		12973.00	13275.00	15.200	30.400
M - 63	S/R		12885.00	13183.00	15.190	30.400
M - 64	S/R		12880.00	13183.00	15.200	30.400
M - 65	S/R		12780.00	13090.00	15.200	30.400
M - 66	S/R		12980.00	13300.00	15.160	30.300
M - 67	S/R		12947.00	13240.00	15.100	30.200
M - 68	S/R		12890.25	13235.00	15.150	30.300
M - 69	S/R		12763.00	13055.00	15.180	30.300
M - 70	S/R		12757.00	13030.00	15.220	30.400
M - 71	S/R		13046.00	13300.00	15.200	30.400
M - 72	S/R		12869.00	13172.00	15.200	30.300
M - 73	S/R		12830.00	13110.00	15.200	30.400
M - 74	S/R		12951.00	13260.00	15.120	30.200
M - 75	S/R		12948.00	13255.00	15.210	30.400

Tabla 92. Características de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, 90 días

RECUBIERTAS CON ADIVO	N°		PESO MUESTRAS A LOS 28 DÍAS DE CURADO	PESO MUESTRAS CON RECUBRIMIENTO ADITIVADO	PESO MUESTRAS A 90 DÍAS DE EXP. AL CO ₂	DIAMETRO MUESTRA (cm)	ALTURA DE MUESTRA (cm)
	M - 76	C/R		12894.50	12980.50	13190.00	15.21
M - 77	C/R		12942.00	13033.00	13240.00	15.25	30.30
M - 78	C/R		12857.00	12937.00	13183.00	15.20	30.30
M - 79	C/R		12957.00	13038.00	13253.00	15.10	30.40
M - 80	C/R		12917.00	12999.00	13211.00	15.19	30.30
M - 81	C/R		12908.00	12991.00	13201.00	15.25	30.40
M - 82	C/R		12843.00	12927.00	13167.00	15.22	30.20
M - 83	C/R		12951.00	13043.00	13290.00	15.10	30.40
M - 84	C/R		12903.30	12989.30	13191.00	15.19	30.30
M - 85	C/R		12950.00	13040.00	13289.00	15.10	30.30
M - 86	C/R		12876.00	12956.00	13187.00	15.10	30.30
M - 87	C/R		12924.00	13005.00	13240.00	15.17	30.20
M - 88	C/R		12921.00	13001.00	13235.00	15.14	30.28
M - 89	C/R		12989.00	13072.00	13386.00	15.15	30.40
M - 90	C/R		12929.00	13013.00	13227.00	15.20	30.20

Tabla 93. Características de las muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, 90 días

SIN RECUBRIMIENTO	N°		PESO MUESTRAS A LOS 28 DÍAS DE CURADO	PESO MUESTRAS A 90 DÍAS DE EXP. AL CO ₂	DIAMETRO MUESTRA (cm)	ALTURA DE MUESTRA (cm)
	M - 91	S/R		12889.00	13174.00	15.20
M - 92	S/R		12822.00	13141.00	15.20	30.30
M - 93	S/R		12860.00	13153.00	15.22	30.40
M - 94	S/R		12799.00	12988.00	15.11	30.20
M - 95	S/R		13046.00	13358.00	15.14	30.30
M - 96	S/R		12899.00	13180.00	15.15	30.30
M - 97	S/R		12872.00	13164.00	15.20	30.40
M - 98	S/R		12804.00	13118.00	15.18	30.40
M - 99	S/R		12893.00	13175.00	15.12	30.20
M - 100	S/R		12850.00	13153.00	15.15	30.30
M - 101	S/R		12914.00	13188.00	15.20	30.40
M - 102	S/R		12920.00	13194.00	15.21	30.40
M - 103	S/R		13146.00	13564.00	15.15	30.30
M - 104	S/R		12992.00	13233.00	15.20	30.35
M - 105	S/R		12875.00	13167.00	15.18	30.40

Tabla 94. Características de las muestras recubiertas con aditivo Chema Seal®, expuestas a CO₂, 120 días

RECUBIERTAS CON ADIVO	N°		PESO MUESTRAS A LOS 28 DÍAS DE CURADO	PESO MUESTRAS CON RECUBRIMIENTO ADITIVADO	PESO MUESTRAS A 120 DÍAS DE EXP. AL CO ₂	DIAMETRO MUESTRA (cm)	ALTURA DE MUESTRA (cm)
	M - 106	C/R		12677.00	12762.00	13328.00	15.10
M - 107	C/R		12993.00	13083.00	13188.00	15.10	30.30
M - 108	C/R		12847.00	12934.00	13163.00	15.15	30.35
M - 109	C/R		12816.00	12896.00	13266.00	15.24	30.30
M - 110	C/R		12954.00	13035.00	13325.00	15.14	30.30
M - 111	C/R		12899.00	12981.00	13191.00	15.20	30.40
M - 112	C/R		12869.00	12960.00	13163.00	15.20	30.30
M - 113	C/R		12842.00	12926.00	13129.00	15.18	30.40
M - 114	C/R		12823.00	12908.00	13298.00	15.16	30.30
M - 115	C/R		12940.00	13026.00	13181.00	15.14	30.30
M - 116	C/R		12864.35	12951.30	13299.00	15.16	30.35
M - 117	C/R		12972.00	13064.00	13265.00	15.20	30.40
M - 118	C/R		12956.00	13046.00	13329.00	15.17	30.30
M - 119	C/R		13026.00	13108.00	13301.00	15.20	30.40
M - 120	C/R		12998.00	13079.00	13253.00	15.19	30.35

Tabla 95. Características de las muestras sin recubrimiento expuestas a CO₂, 120 días

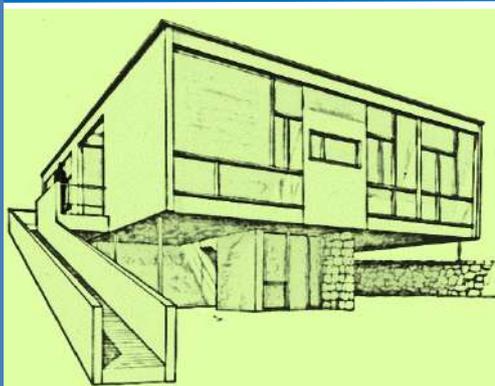
SIN RECUBRIMIENTO	N°		PESO MUESTRAS A LOS 28 DÍAS DE CURADO	PESO MUESTRAS A 120 DÍAS DE EXP. AL CO ₂	DIAMETRO MUESTRA (cm)	ALTURA DE MUESTRA (cm)
	M - 121	S/R		12890.00	13133.00	15.12
M - 122	S/R		12956.00	13236.00	15.19	30.40
M - 123	S/R		12967.00	13260.00	15.25	30.40
M - 124	S/R		12947.00	13198.00	15.20	30.30
M - 125	S/R		13346.00	13601.00	15.18	30.30
M - 126	S/R		13099.00	13399.00	15.20	30.30
M - 127	S/R		12877.00	13167.00	15.22	30.40
M - 128	S/R		13107.00	13399.00	15.25	30.30
M - 129	S/R		12976.00	13214.00	15.10	30.30
M - 130	S/R		12885.00	13173.00	15.15	30.30
M - 131	S/R		12945.00	13208.00	15.12	30.40
M - 132	S/R		12944.00	13195.00	15.10	30.30
M - 133	S/R		12926.00	13192.00	15.20	30.40
M - 134	S/R		12889.00	13175.00	15.25	30.40
M - 135	S/R		12772.00	13057.00	15.10	30.30

F. Propuesta

Cartilla de aplicación de recubrimiento en estructuras de concreto con aditivo anti carbonatación

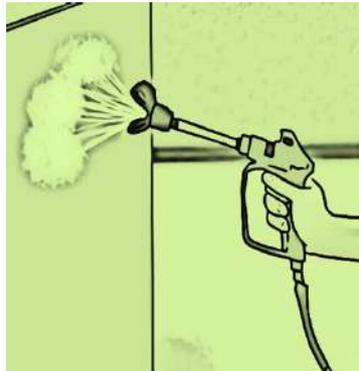
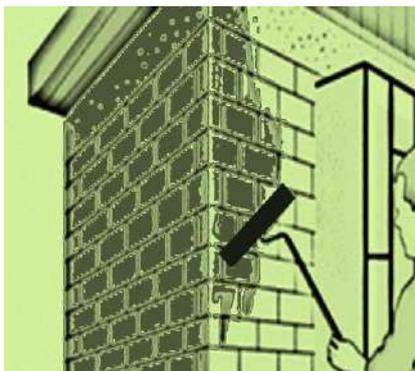
1° La base de la estructura a proteger de la carbonatación, debe encontrarse limpia y seca (sin humedad).

En estructuras tarrajeadas se dejará secar mínimo 8 días, y en las que no cuentan con tarrajeo, esperar 30 días después de haberse vaciado el concreto y asegurarse que se encuentre libre de partes sueltas o mal adheridas, totalmente exenta de pintura, grasa o aceite, etc.



2° En estructuras sin tarrajeo, nivele la superficie retirando rebabes de concreto, con herramientas de desgaste, espátulas o lijas, para evitar el consumo excesivo de material y un total recubrimiento. Verificando que la superficie tenga cierta rugosidad.

3° Aplique el aditivo anti carbonatación del concreto de acuerdo a las especificaciones técnicas del producto, con una brocha ancha, rodillo o pulverizador dos veces, tonándose el tiempo necesario para que seque bien la primera mano antes de aplicar la segunda. Cubra bien la superficie a tratar, sellando las porosidades de forma uniforme.



4° Repetir este procedimiento periódicamente cada 8 años aproximadamente, en estructuras descritas como categoría C “edificaciones comunes” por la NTE-030 y cada 4 años en estructuras de categoría A “edificaciones esenciales”; categoría B “edificaciones importantes”, de manera especial en toda estructura expuesta frecuentemente a emisiones de CO₂.



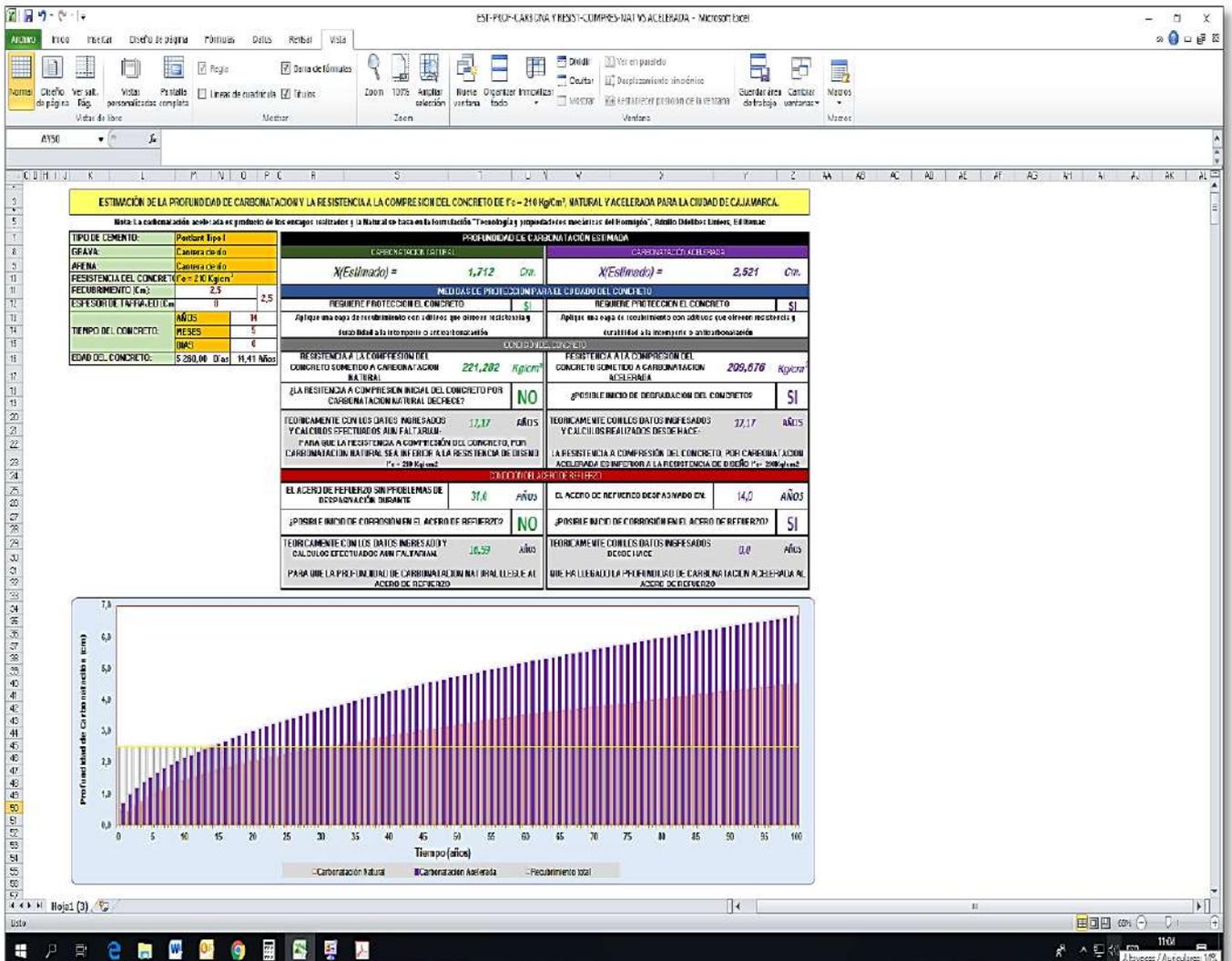
PROPUESTA

**MANUAL DE USO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PROFUNDIDAD
DE CARBONATACIÓN Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
DEL CONCRETO DE $f'c = 210 \text{ Kg/Cm}^2$, NATURAL Y
ACELERADA PARA LA CIUDAD DE CAJAMARCA**

I. INTRODUCCIÓN

La hoja de cálculo se diseñó para estimar en función al tiempo proyectado la profundidad de carbonatación del concreto de $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$, en su efecto natural y acelerado por inducción de CO_2 en un espacio confinado, así mismo determina la posible resistencia a la compresión del concreto para el tiempo solicitado. De manera valorativa sugiere cuándo se debe aplicar al concreto una capa de protección con un aditivo resistente a la intemperie para desacelerar el efecto de carbonatación. De manera ilustrativa se presenta un gráfico con los dos estados (carbonatación natural y carbonatación acelerada) y el límite que representa el recubrimiento del concreto al acero que toda estructura contempla en su ejecución, el mismo que es de vital importancia para que cualquier agente patógeno llegue a afectar a la armadura.

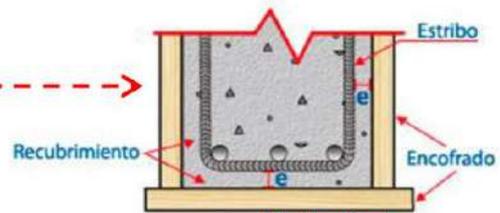
La hoja de cálculo trabaja en un entorno WINDOWS, específicamente en hoja de cálculo de Microsoft Excel y su pantalla principal es la que se presenta:



En la pantalla de la hoja de cálculo, podemos distinguir los siguientes elementos:

Datos de las características de concreto al que se le efectuará la estimación de la profundidad de carbonatación y la resistencia a la compresión, en el que se requiere ingresar los siguientes datos:

- Recubrimiento del acero en el concreto (cm):

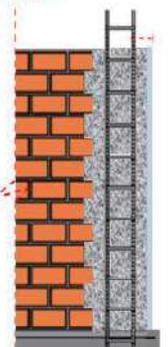


- Espesor de tarrajeo (cm)



TIPO DE CEMENTO:	Portlant Tipo I	
GRAVA:	Cantera de río	
ARENA:	Cantera de río	
RESISTENCIA DEL CONCRETO	$f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$	
RECUBRIMIENTO (Cm):		
ESPESOR DE TARRAJEO (Cm):		
TIEMPO DEL CONCRETO:	AÑOS	
	MESES	
	DIAS	
EDAD DEL CONCRETO:	Días	Años

Suma
Distancia del
exterior al acero
de refuerzo



- Tiempo que se desea estimar la profundidad de carbonatación:

Determina la edad del concreto tanto en días como en años.

II. PROCESAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS

Los datos ingresados son procesados en la hoja de cálculo dando como resultados dos grupos de valores:

1				2			
PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN ESTIMADA				PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN ESTIMADA			
CARBONATACIÓN NATURAL		CARBONATACIÓN ACELERADA		CARBONATACIÓN NATURAL		CARBONATACIÓN ACELERADA	
$X(\text{Estimado}) =$		1,773 Cm.		$X(\text{Estimado}) =$		2,608 Cm.	
MEDIDAS DE PROTECCIÓN PARA EL CUIDADO DEL CONCRETO				MEDIDAS DE PROTECCIÓN PARA EL CUIDADO DEL CONCRETO			
REQUIERE PROTECCIÓN EL CONCRETO		SI		REQUIERE PROTECCIÓN EL CONCRETO		SI	
Aplique una capa de recubrimiento con aditivos que ofrecen resistencia y durabilidad a la intemperie o anticarbonatación				Aplique una capa de recubrimiento con aditivos que ofrecen resistencia y durabilidad a la intemperie o anticarbonatación			
CONDICIÓN DEL CONCRETO				CONDICIÓN DEL CONCRETO			
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO SOMETIDO A CARBONATACIÓN NATURAL		220,618 Kg/cm ²		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO SOMETIDO A CARBONATACIÓN ACELERADA		207,499 Kg/cm ²	
¿LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN INICIAL DEL CONCRETO POR CARBONATACIÓN NATURAL DECRECE?		NO		¿POSIBLE INICIO DE DEGRADACIÓN DEL CONCRETO?		SI	
TEORICAMENTE CON LOS DATOS INGRESADOS Y CALCULOS EFECTUADOS AUN FALTARIAN:		16,16 AÑOS		TEORICAMENTE CON LOS DATOS INGRESADOS Y CALCULOS REALIZADOS DEÍDE HACE:		16,16 AÑOS	
PARA QUE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO, POR CARBONATACIÓN NATURAL SEA INFERIOR A LA RESISTENCIA DE DISEÑO $f_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$				LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO, POR CARBONATACIÓN ACELERADA ES INFERIOR A LA RESISTENCIA DE DISEÑO $f_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$			
CONDICIÓN DEL ACERO DE REFUERZO				CONDICIÓN DEL ACERO DE REFUERZO			
EL ACERO DE REFUERZO SIN PROBLEMAS DE DESPASIVACIÓN DURANTE		44,0 AÑOS		EL ACERO DE REFUERZO SIN PROBLEMAS DE DESPASIVACIÓN DURANTE		20,0 AÑOS	
¿POSIBLE INICIO DE CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO?		NO		¿POSIBLE INICIO DE CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO?		NO	
TEORICAMENTE CON LOS DATOS INGRESADO Y CALCULOS EFECTUADOS AUN FALTARIAN:		28,58 AÑOS		TEORICAMENTE CON LOS DATOS INGRESADO Y CALCULOS EFECTUADOS AUN FALTARIAN:		5,0 AÑOS	
PARA QUE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN NATURAL LLEGUE AL ACERO DE REFUERZO				PARA QUE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN ACELERADA LLEGUE AL ACERO DE REFUERZO			

1. El concreto bajo los efectos de una carbonatación natural

2. El concreto bajo los efectos de una carbonatación acelerada simulada en un ambiente hermético.

En cada uno de estos dos grupos se determina:

a) Profundidad de carbonatación estimada

PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN ESTIMADA			
CARBONATACIÓN NATURAL		CARBONATACIÓN ACELERADA	
$X(\text{Estimado}) =$		$X(\text{Estimado}) =$	
1,773 Cm.		2,608 Cm.	

Los cálculos para la estimación del avance en la profundidad de carbonatación natural, están basados en los amplios y completos estudios realizados que conllevaron en su oportunidad a la formulación de la publicación "Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón", en Madrid, España el año 1987, Intemac por Adolfo Delibes Liniers Madrid, el mismo que caracteriza una curva desde 0 hasta 100 años, la misma que es la más acertada y la más utilizada en diversos estudios, evaluaciones, peritajes, formulaciones para mantenimientos y/o reparaciones de estructuras.

La estimación de la profundidad de carbonatación acelerada es calculada tomando como referencia los resultados de los ensayos obtenidos en la presente investigación, la misma que generó una curva de reajuste $0.64 \times \sqrt{t}$ donde t = tiempo en años.

b) Medidas de protección para el cuidado del concreto

La aplicación de aditivos protectores anticarbonatación, en superficies del concreto caravista o en el tartajeo que evitan penetración de agentes agresivos que atacan al concreto y a la armadura, son buenas prácticas para prolongar la vida útil de las estructuras retardando el proceso de carbonatación. La hoja de cálculo sugiere el momento adecuado para aplicar esta lámina protectora.

Si el concreto requiere la aplicación de una capa protectora de ADITIVO ANTICARBONATACIÓN, presentará la palabra “SÍ”,

Y emitirá el siguiente mensaje:



Si no quiere presentará la palabra “NO”

y emitirá el siguiente mensaje:



c) Condición del concreto

La resistencia a la compresión en el concreto de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ frente a la exposición al CO_2 natural o acelerada, inicialmente es creciente, luego la evolución de la resistencia en función al período de exposición, presenta una disminución progresiva describiendo ecuaciones que se han tomado en cuenta para la formulación de la hoja de cálculo cuyos resultados se presentan en:

Calcula y muestra la proyección de la resistencia a compresión del concreto de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ en el tiempo ingresado.

CONDICIÓN DEL CONCRETO	
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO SOMETIDO A CARBONATACION NATURAL <input type="text"/> Kg/cm^2	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO SOMETIDO A CARBONATACION ACCELERADA <input type="text"/> Kg/cm^2
¿LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO POR CARBONATACION NATURAL DECRECE? <input type="text"/>	¿LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO POR CARBONATACION ACCELERADA DECRECE? <input type="text"/>
AÑOS <input type="text"/>	AÑOS <input type="text"/>

Si la resistencia a compresión del concreto está en el rango de decrecimiento mostrará la palabra “SÍ”, caso contrario indicará “NO”

Así mismo en las ventanas sombreadas aparecerá la información que se muestra a continuación, según sea el caso y presentará el tiempo que falta para que ocurra la carbonatación o hace que tiempo ya ocurrió



d) Condición del acero de refuerzo.

La ventana en la que se realiza este cálculo es la siguiente:

CONDICIÓN DEL ACERO DE REFUERZO			
	AÑOS		AÑOS
¿POSSIBLE INICIO DE CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO?	NO	¿POSSIBLE INICIO DE CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO?	
	AÑOS		AÑOS

La hoja de cálculo permite determinar el tiempo en el que la carbonatación llega al acero estructural emitiendo los siguientes mensajes:

EL ACERO DE REFUERZO DESPASIVADO EN:		AÑOS
¿POSSIBLE INICIO DE CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO?		SI
TEORICAMENTE CON LOS DATOS INGRESADOS DESDE HACE		AÑOS
QUE HA LLEGADO LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACION ACCELERADA AL ACERO DE REFUERZO		

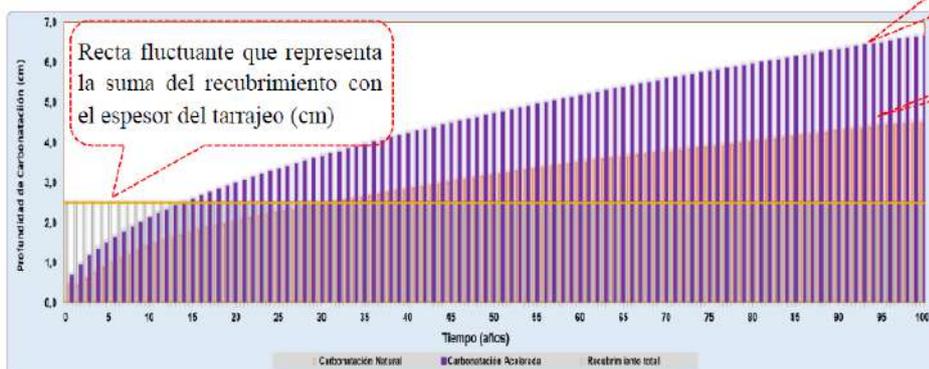
Muestra el tiempo en años en que se producirá y/o que ya se produjo el efecto

Y si aún no llega la carbonatación al acero emitirá los siguientes mensajes:

EL ACERO DE REFUERZO SIN PROBLEMAS DE DESPASIVACIÓN DURANTE		AÑOS
¿POSSIBLE INICIO DE CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO?		NO
TEORICAMENTE CON LOS DATOS INGRESADO Y CALCULOS EFECTUADOS AUN FALTARIAN:		AÑOS
PARA QUE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACION NATURAL LLEGUE AL ACERO DE REFUERZO		

e) Gráfico

Se presenta un gráfico con las curvas de profundidad de carbonatación tanto natural como acelerada y una recta fluctuante que representa la profundidad o distancia desde la superficie hasta el acero de refuerzo, a fin de hacerlo más ilustrativo.



G. Panel fotográfico



Figura 77. Acopio de Agregados en el laboratorio para determinación de sus propiedades físicas. Cantera Aguilar río Chonta – "Tartar chico", Baños del Inca.



Figura 78. Reducción de muestras mediante el método del cuarteo



Figura 79. Peso de muestra para ensayo de contenido de Humedad.



Figura 80. Muestras para los 03 ensayos



Figura 81. Muestras en la estufa para ensayo de contenido de humedad



Figura 82. Ensayo de densidad agregado grueso



Figura 83. Peso sumergido de la grava, ensayo peso específico y absorción.



Figura 84. Determinación de la granulometría de los agregados.



Figura 85. Ensayo de Abrasión.



Figura 86. Ensayo de peso específico y absorción del agregado fino.



Figura 87. Ensayo de determinación de la condición saturada superficialmente seca (SSS) de la arena para el ensayo de peso específico y absorción



Figura 88. Chequeo del slump del concreto para elaboración de muestras



Figura 89. Elaboración de testigos



Figura 90. Entrada de muestras y codificación.



Figura 91. Curado de muestras



Figura 92. Registro del diámetro, altura, peso de probetas cilíndricas de concreto, antes del ensayo



Figura 93. Ensayo a compresión axial de muestras patrón



Figura 105. Ilustra una de las fallas producidas en las muestras patrón



Figura 106. Medición de la cantidad de gases emitidos por el motor de la moto lineal



Figura 94. Tanque de carbonatación acelerada



Figura 95. Aplicación y verificación del espesor de lámina del recubrimiento con aditivo Chema Seal® y



Figura 109. Medición e identificación de muestras a exponer 30 días a CO₂



Figura 110. Verificación de CO₂, emitido en el tanque



Figura 96. Ensayo a compresión axial de muestras expuestas 30 días a CO₂



Figura 97. Aplicación de la fenolftaleína para el test de profundidad de carbonatación



Figura 98. Determinación de la profundidad de carbonatación en los 6 puntos propuestos



Figura 99. Chequeo de la profundidad de carbonatación, primer lote de 30 muestras con y sin aditivo expuestas 30 días a CO₂



Figura 100. Medición e identificación de muestras a exponer 60 días a CO₂



Figura 101. Ensayo a compresión axial de muestras expuestas 60 días a CO₂



Figura 102. Aplicación de la fenolftaleína para muestras expuestas 60 días a CO₂



Figura 103. Determinación de la profundidad de carbonatación en los 6 puntos propuestos

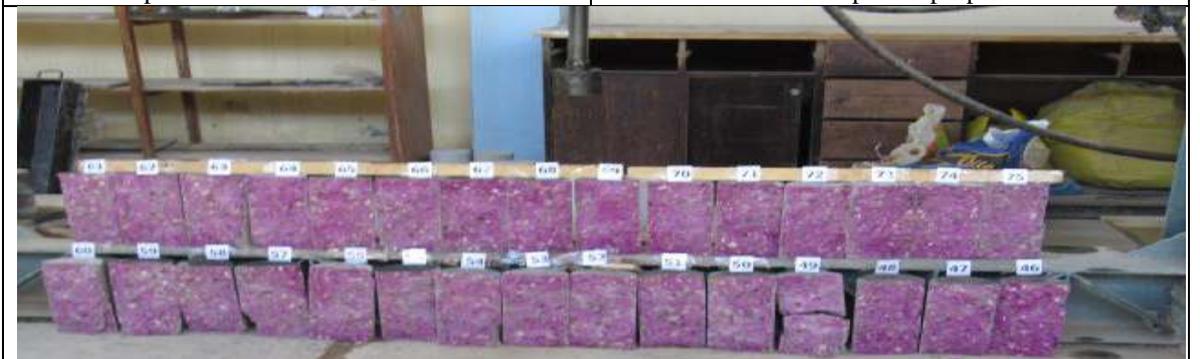


Figura 104. Segundo lote de 30 muestras expuestas al CO₂ 60 días, con y sin aditivo



Figura 105. Medición e identificación de muestras a exponer 90 días a CO₂



Figura 106. Ensayo a compresión axial de muestras expuestas 90 días a CO₂



Figura 107. Aplicación de la fenolftaleína para muestras expuestas 90 días a CO₂



Figura 108. Determinación de la profundidad de carbonatación en los 6 puntos propuestos



Figura 109. Tercer lote de 30 muestras expuestas al CO₂ 90 días, con y sin aditivo



Figura 110. Medición e identificación de muestras expuestas 120 días a CO₂



Figura 111. Ensayo a compresión axial de muestras expuestas 60 días a CO₂



Figura 112. Aplicación de la fenolftaleína para muestras expuestas 90 días a CO₂



Figura 113. Determinación de la profundidad de carbonatación en los 6 puntos propuestos



Figura 114. La profundidad de carbonatación de muestras recubiertas con aditivo expuestas 120 días a CO_2 , muestran carbonatación en los bordes



Figura 115. La profundidad de carbonatación de muestras sin recubrimiento expuestas 120 días a CO_2 , muestran carbonatación avanzada



Figura 116. Tercer lote de 30 muestras expuestas al CO_2 120 días, con y sin aditivo

Anexos

1. Hoja técnica de cementos portland tipo I



CEMENTOS PACASMAYO S.A.A.
Calle La Colonia Nro. 150 Urb. El Vivero de Monterrico Santiago de Surco - Lima
Carretera Panamericana Norte Km. 666 Pacasmayo - La Libertad
Teléfono 317 - 6000



G-CC-F-04
Versión 03

Cemento Portland Tipo I

Conforme a la NTP 334.009 / ASTM C150
Pacasmayo, 15 de Agosto del 2017

COMPOSICIÓN QUÍMICA		CPSAA	Requisito NTP 334.009 / ASTM C150
MgO	%	2.3	Máximo 6.0
SO3	%	2.8	Máximo 3.0
Pérdida por ignición	%	3.1	Máximo 3.5
Residuo Insoluble	%	0.66	Máximo 1.5

PROPIEDADES FÍSICAS		CPSAA	Requisito NTP 334.009 / ASTM C150
Contenido de Aire	%	8	Máximo 12
Expansión en Autoclave	%	0.09	Máximo 0.80
Superficie Específica	cm ² /g	3650	Mínimo 2800
Densidad	g/mL	3.08	NO ESPECIFICA

Resistencia Compresión :

Resistencia Compresión a 3 días	MPa (Kg/cm ²)	26.5 (271)	Mínimo 12.0 (Mínimo 122)
Resistencia Compresión a 7 días	MPa (Kg/cm ²)	34.3 (350)	Mínimo 19.0 (Mínimo 194)
Resistencia Compresión a 28 días (*)	MPa (Kg/cm ²)	39.8 (406)	Mínimo 28.0 (Mínimo 286)

Tiempo de Fraguado Vicat :

Fraguado Inicial	min	138	Mínimo 45
Fraguado Final	min	261	Máximo 375

Los resultados arriba mostrados, corresponden al promedio del cemento despachado durante el periodo del 01-07-2017 al 31-07-2017.
La resistencia a la compresión a 28 días corresponde al mes de Junio 2017.
(*) Requisito opcional.

Ing. Gabriel G. Mansilla Fiestas
Superintendente de Control de Calidad

Solicitado por :

Distribuidora Norte Pacasmayo S.R.L.

Está totalmente prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de Cementos Pacasmayo S.A.A.

2. Inspección técnica vehicular



CENTRO DE INSPECCION TECNICO VEHICULAR EL CUMBE S.A.C
Resolución Directoral N° 4208-2015-MTC/15

INFORME DE INSPECCIÓN TÉCNICA VEHICULAR INFORME N° 22104 - 21909

Tipo de Inspección : Ordinaria

Fecha de Inspección 05/oct/2017

I.- CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO

1.- Titular o propietario	MOSQUEIRA RAMIREZ CESAR Pelayo	8.- Combustible	GASOLINA	14.- N° Asient. / Pasaj.	1 / 1
2.- Placa	ML-5332	9.- VIN / N° de Serie	MC125P025886PE96	15.- Largo / Ancho / Alto	1.660 / 0.800 / 1.500
3.- Categoría	L3	10.- N° de Motor	CG125E2836107	16.- Color (es)	AZUL
4.- Marca	MOTOKAR	11.- Carrocería	MOTOCICLETA	17.- Peso Neto (kg)	200
5.- Modelo	MC125 EX	12.- Marca Carrocería	MOTOKAR	18.- Peso Bruto (kg)	270
6.- Año Fabricación	2,007	13.- N° Ejes / N° Ruedas	2 / 2	19.- Carga Útil (kg)	70
7.- Kilometraje	174				

II.- DATOS DE LOS EQUIPOS

CITV	EL CUMBE	Frenómetro	Alineador	Analizador u Opacímetro	Regloscopio Luxómetro	Banco de Suspensión
LINEA	Combinada - Línea	Equipo N°	Equipo N°	Equipo N°	Equipo N°	Equipo N°
		Beissbarth serie 0007530	Beissbarth serie 0006470	HGA 400 serie 1034	Beissbarth serie 0658	Beissbarth serie 0002701

III.- RESULTADOS OBTENIDOS

Ejes	Peso (Kg)	PRUEBA DE FRENOS											
		FRENO DE SERVICIO				FRENO DE ESTACIONAMIENTO				FRENO DE EMERGENCIA			
		Fuerza de Frenado (kN)		Deseq. (%)	Result	Fuerza de Frenado (kN)		Deseq. (%)	Result	Fuerza de Frenado (kN)		Deseq. (%)	Result
1°	100	Der.	Izq.		A	Der.	Izq.			Der.	Izq.		
2°	100			0.26				0.51		A			
					40					26			A

PRUEBA ALINEAMIENTO			PROF. NEUMÁTICOS		PRUEBA DE LUCES				SUSPENSIÓN			
Ejes	Desviación (m/km)	Resultado	Medida (mm)		Medida (Lux o C)		Alin.	Result.	Delantera (%)	Posterior (%)		
			Der.	Izq.	Der.	Izq.			Izq.	Izq.		
				2.00	A	Bajas	5	5	0.00	A	Der.	Der.
				2.00	A	Altas	11	11	0.00	A	Desv.	Desv.
						Alta Adicional					Result.	Result.
						Nebliñeras					Resultado Final	

EMISIÓN DE GASES	T° Aceite (°C)	77 / 77	CO Ral. (%)	1.53	CO Acel. (%)		Resultado	EMISIONES SONORAS	Sonometro (dB)	Resultado
	RPM	825 / 2563	CO + CO2 Ral (%)	3.57	CO + CO2 Acel. (%)		A		82.00	A
	Opacidad (m -1)		HC Ral. (ppm)	280	HC Acel. (ppm)					

IV.- OBSERVACIONES DETECTADAS

CÓDIGO	INTERPRETACIÓN DE DEFECTOS	CALIFICACIÓN
A.5.1	No tiene Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito (SOAT) o Certificados Contra Accidentes de Tránsito (CAT) vigente o no corresponde al tipo de servicio o los datos registrados no corresponden al vehículo. - VIN o chasis 0	GRAVE
D.1.2	Frenos principales o de servicio con eficiencia entre 30 y 50%	LEVE
H.3.1.4	Intensidad de luces no cumple con el reglamento y/o normativa internacional - Baja Der., Baja Izq., Alta Der., Alta Izq.	LEVE

Serie Reflectómetro: Reflex 20 serie 1006, Resultado Prueba Reflectividad. APROBADO, Adjunta Declaración Jurada de ITV Inicial Estimado Usuario:

Pasado el plazo máximo de subsanación, no tendrá derecho a reinspección. El vehículo pasará una nueva inspección Técnica Vehicular (D.S. N°025-2008-MTC, Art 20 y 21). Este informe no autoriza la circulación. (Art 24.6 del D.S. N°025-2008-MTC.)

[Firma]
Segundo Oswaldo Fernández Sánchez
ING. ANTONIO ALVARO SANCHEZ
ING. CIVIL

CEL: 987874869
WWW.CITVELCUMBE.COM
CITVELCUMBE@GMAIL.COM

AV. ZARATE MIRANDA S/N
PREDIO BETANIA - CAJAMARCA

3. Hoja técnica aditivo Chema Seal®



Hoja Técnica
CHEMA SEAL
Sellador impermeabilizante de superficies en colores, que se aplica muy fácilmente en tanques, reservorios o techos
V.012016

Calidad que Construye

DESCRIPCIÓN

CHEMA SEAL es un impermeabilizante sellador de superficies de concreto, mortero, ladrillo pastelero, teja y *dry wall* que una vez aplicado forma una barrera contra la penetración de humedad y aparición del salitre. Se aplica fácilmente como pintura en dos manos formando una capa delgada muy resistente y durable a la intemperie.

Una vez mezclado los componentes del CHEMASEAL (Parte A + Parte B + agua) empieza la reacción de hidratación entre éstos, formándose una barrera de cristales impermeable, a dos niveles :

Primero: A nivel de los capilares del concreto.

Segundo: A nivel de la superficie.

Es apropiado para reservorios y tanques de agua potable.

(Ver cuadro de Impermeabilizantes Superficiales CHEMA).

VENTAJAS

- Bloquea el salitre.
- La eflorescencia del salitre o ataque de los sulfatos se debe principalmente a la penetración de la humedad al concreto o mortero.
- Elimina la pérdida de líquidos por permeabilidad o por fisuras finas en tanques, piscinas, cisternas de concreto o ladrillo cuando se recubren totalmente sus paredes internas.
- No transmite olor ni sabor al agua potable, ni la contamina. Cuenta con certificado CEPIS¹.
- Tiene excelente adherencia y prácticamente se hace monolítico con la superficie donde se aplica.
- No requiere solventes, se prepara con agua.
- Puede darse diversos tipos de acabado.
- Su secado es muy rápido ahorrándose tiempo de espera para aplicar la segunda mano y para entrar en servicio (24 horas).

USOS

- Impermeabiliza muros, ladrillo de todo tipo, superficies de concreto y mortero (placas, techos o cualquier otro elemento), pasteleros o tejas de arcilla, superficies de fibrocemento y *fibrablock*.
- Evita totalmente el paso del agua y humedad en sótanos, piscinas, paredes, piso o techo por dentro o por fuera, sobre o debajo del nivel del suelo.
- Es apropiado para obras hidráulicas, represas, canales de irrigación o regadío, tanques de agua, piscinas, jardinerías, zócalos en jardines, duchas, baños y otros.
- En general en estructuras que se encuentren sometidas a grandes presiones de agua o cualquier superficie que requiera una impermeabilización efectiva.

¹ CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.



Calidad que Construye

Hoja Técnica

CHEMA SEAL

Sellador impermeabilizante de superficies en colores, que se aplica muy fácilmente en tanques, reservorios o techos

V.012016

DATOS TÉCNICOS

Especificación del producto	Parámetros	Método de ensayo
Densidad aparente (Parte A)	600 – 850 gr/L	-
Densidad (Parte B)	3.85 – 3.95 kg/gl	
Color	Blanco, verde, rojo y gris	
Impermeabilidad	99.9%	ASTM C 309
Adherencia	Bueno (385 psi)	ASTM C 882
Sellador	Bueno	ASTM C 1315
VOC	0,641 gr/L	

PREPARACIÓN Y APLICACIÓN DEL PRODUCTO

PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE:

- La base debe encontrarse limpia y seca (sin humedad) mínimo 8 días de tarrajada o 30 días de vaciada, sin partes sueltas o mal adheridas, totalmente exenta de pintura, grasa o aceite, etc.
- Nivele la superficie evitando con ello un consumo excesivo de material.
- Verificar que la superficie tiene rugosidad adecuada para la aplicación del producto.

ENVASE DE 1 GALÓN:

1. El CHEMASEAL consta de dos componentes (Parte "A" Polvo 3.9 Kg. + Parte "B" Líquido blanco o sellacryl ½ L.)
2. Cuando se trata de superficies verticales de concreto o cemento pulido: Diluya ½ litro de sellacryl en 2 volúmenes de agua potable limpia (1 L).
3. En caso de superficies horizontales o cemento frotachado: Diluya ½ litro de sellacryl en 3 volúmenes de agua potable limpia (1 ½ L.).
4. Mezcle hasta que el líquido esté homogéneo.
5. Vierta poco a poco el polvo cementoso a la parte líquida disolviéndolo sin que se formen grumos.
6. Siga removiendo hasta lograr un producto homogéneo con la consistencia de una pintura espesa.
7. Aplique con brocha ancha o rodillo en dos manos, esperando que seque bien la primera mano antes de aplicar la segunda. Cubra bien la superficie a tratar, sellando las porosidades de forma uniforme.
8. Dependiendo del clima, el CHEMASEAL se secará al tacto en un máximo de 2 horas y puede entrar en servicio en caso de reservorios en 24 horas.
9. Si existe una fuerte radiación solar cure por lo menos los primeros 2 días o en su defecto aplique un Curador CHEMA más adecuado: MEMBRANIL VISTA (climas templados), MEMBRANIL C 9 (climas con fuerte radiación solar), SUPER CURADOR CHEMA (climas fríos).

BOLSA DE 25 KG.:

Se recomienda preparar en cinco partes separando los componentes de la siguiente forma:

1. Mida en un balde de 1 galón de capacidad, polvo cementoso al ras.
2. Separe 757 cc. (3/4 litro) de sellacryl en un recipiente limpio y mezcle con 2 o 3 partes de agua potable limpia respectivamente, según sea una superficie vertical, pulida o si es horizontal o frotachada.
3. Continúe como indican los pasos 4, 5, 6 y 7 de las indicaciones para envases de 1 galón.

CETOX
CENTRO TECNOLÓGICO S.A.S.
273-2318 / 998012833

ATENCIÓN AL CLIENTE:
(511) 336-8407

Página 2 de 3



Calidad que Construye

Hoja Técnica CHEMA SEAL

Sellador impermeabilizante de superficies en colores, que se aplica muy fácilmente en tanques, reservorios o techos

V.012016

RENDIMIENTO El rendimiento es 10 m² por galón, considerando una mano.

PRESENTACIÓN
Envase de 1 gal. Blanco (Código: 06002104)
Envase de 1 gal. Gris (Código: 06002204)
Envase de 23 kg. + 1 gal. Sellacryl Blanco (Código: 06002125)
Envase de 23 kg. + 1 gal. Sellacryl Gris (Código: 06002225)

ALMACENAMIENTO De almacenarse en lugar fresco, ventilado y sellado bajo techo su tiempo de vida útil será de 12 meses.

PRECAUCIONES Y RECOMENDACIONES
En caso de emergencia, llame al CETOX (Centro Toxicológico).
Producto tóxico. NO INGERIR, mantenga el producto fuera del alcance de los niños.
No coma ni beba mientras manipula el producto.
Lávese las manos luego de manipular el producto.
Utilice guantes de seguridad, gafas y ropa protectoras de trabajo.
Almacene el producto bajo sombra y en ambientes ventilados.
En caso de contacto con los ojos y la piel, lávese con abundante agua.
Si es ingerido, no provocar vómitos; procure buscar ayuda médica

CUADRO DE IMPERMEABILIZANTES SUPERFICIALES CHEMA

CHEMA TOP	Sellador en polvo de color gris para reparaciones de superficies con salitre.
CHEMA TOP ANTISALITRE TIPO PINTURA	Sellador protector contra el salitre y la humedad, listo para usar.
CHEMA BITUMEN	Para impermeabilizar estructuras de concreto enterradas, tubos, muros de contención y protección de fuentes de agua externas. También sirve como imprimante para la aplicación de las membranas asfálticas.
CHEMA TECHO	Pasta elástica emulsionada para impermeabilizar techos de madera o concreto. Fácil aplicación y viene en colores: blanco, gris y rojo teja.
CHEMA TECHO ELASTIC	Recubrimiento elástico impermeable para techos de madera, cemento y otros. Forma una capa protectora que sella la superficie impidiendo la penetración del agua.
CHEMA SEAL	Sellador impermeabilizante de superficies, en colores: gris, blanco o rojo teja. Se aplica muy fácilmente en tanques, reservorios o techos.
POLYEPOX PRIMER RECUBRIMIENTO	Sellador epóxico impermeable de gran resistencia a presiones altas. Excelente para reparaciones en tanques, reservorios y piscinas.

La información que suministramos está basada en ensayos que consideramos seguros y correctos de acuerdo a nuestra experiencia. Los usuarios quedan en libertad de efectuar las pruebas y ensayos previos que estimen conveniente, para determinar si son apropiados para un uso en particular. El uso, aplicación y manejo correcto de los productos, quedan fuera de nuestro control y es de exclusiva responsabilidad del usuario.

CETOX
CENTRO TOXICOLÓGICO S.A.S.
273-2318 / 999012933

ATENCIÓN AL CLIENTE:
(511) 336-8407

Página 3 de 3