



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA EL ANÁLISIS DE PROCESOS DE CARBONATACIÓN LENTA Y ACELERADA EN CONCRETOS DOPADOS

Línea de investigación:

Ecotoxicología y Química Ambiental

Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

Autora

Quintana Alfaro, Noemi Leopoldina

Asesor

Breña Oré, Jorge Luis

Código ORCID: 0000-0001-6450-7052

Jurado

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Zamora Talaverano, Noé Sabino

Lovera Bernaola, Denny Rolando

Lima - Perú

2023

Reporte de Análisis de Similitud

Archivo:

[1A_QUINTANA ALFARO NOEMI LEOPOLDINA DOCTORADO 2023.Docx](#)

Fecha del Análisis:

9/03/2023

Analizado por:

Astete Llerena, Johnny Tomas

Correo del analista:

jastete@unfv.edu.pe

Porcentaje:

14 %

Título:

IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA EL ANÁLISIS DE PROCESOS DE CARBONATACIÓN LENTA Y ACELERADA EN CONCRETOS DOPADOS

Enlace:

<https://secure.arkund.com/old/view/153270627-269229-898059#HZFLTsrADETVknUJdfvTbc9VEAs0ApQFs5kl4u68oHS1I9eT5Up+ju/ncXsdmpqDe1zVkKN AiRbaqFBrTrgJ5/iO7/iO7/iOH3jBjGBGwARMwARMwARMMiPhEi7hEi7hEi7hEi7hFtyCW3Cbuq8Kv +E3/lbf8Bv+OrQarLdMRghjYZsps4noWiF6PhA9h3M4whhhjDBGGCOMEQYUEgjGr7f/uhBGcHD15 +Ry8jj7hVJbu1WqoZoqU7kqxHa1VFuF1eiZYts2tatDneoldu960/E8vx7n53l/f9w/jtt44VuvIWk9+ENE/fsH>



DRA. MIRIAM LILIANA FLORES CORONADO
JEFA DE GRADOS Y GESTIÓN DEL EGRESADO



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO
IMPLEMENTACIÓN Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES
PARA EL ANÁLISIS DE PROCESOS DE CARBONATACIÓN LENTA Y
ACELERADA EN CONCRETOS DOPADOS

Línea de Investigación:

Ecotoxicología y Química Ambiental

Tesis para optar el Grado Académico de

Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

Autora:

Quintana Alfaro, Noemi Leopoldina

Asesor:

Breña Oré, Jorge Luis

(ORCID: 0000-0001-6450-7052)

Jurado:

Zambrano Cabanillas, Abel Walter

Zamora Talaverano, Noé Sabino

Lovera Bernaola, Denny Rolando

Lima – Perú

2023

Dedicatoria:

A mis padres y hermanos por la motivación constante para mi superación.

Agradecimientos:

Mi agradecimiento, en primer lugar, al Dr. Luis Mosquera Leiva por su valioso apoyo en el diseño y construcción de la cámara de carbonatación acelerada y apoyo en el funcionamiento y equipamiento.

En segundo lugar, a mi asesor Dr. Jorge Breña Oré por su apoyo técnico y paciencia en la revisión de este trabajo.

Al personal técnico del laboratorio de ensayo de materiales LEM-UNI en la persona del Sr. Elvis Polo Blas cuya ayuda y colaboración ha sido indispensable.

Finalmente, mi agradecimiento a la Dra. Carmen Reyes C. Jefe del Laboratorio de Química FIC-UNI por su apoyo en los análisis requeridos.

ÍNDICE

RESUMEN -----	10
ABSTRACT -----	11
I. INTRODUCCIÓN -----	1
1.1 Planteamiento del problema -----	1
1.2 Descripción del problema -----	2
1.3 Formulación del problema -----	3
- <i>Problema general</i> -----	3
- <i>Problemas específicos</i> -----	3
1.4 Antecedentes -----	4
1.5 Justificación de la investigación -----	7
1.6 Limitaciones de la investigación -----	7
1.7 Objetivos -----	8
- <i>Objetivo general</i> -----	8
- <i>Objetivos específicos</i> -----	8
1.8 Hipótesis de investigación -----	9
II. MARCO TEÓRICO -----	11
2.1 Marco conceptual -----	11
III. MÉTODO -----	80
3.1 Tipo de investigación -----	80
3.2 Población y muestra -----	81
3.3 Operacionalización de variables -----	82
3.4 Instrumentos -----	84
3.5 Procedimientos -----	84
3.6 Análisis de datos -----	92
IV. RESULTADOS -----	95
V. DISCUSIÓN DE RESULTADO -----	193
VI. CONCLUSIONES -----	244
VII. RECOMENDACIONES -----	246
VIII. REFERENCIAS -----	247

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Composición química media del clinker del cemento Portland</i>	14
Tabla 2 <i>Efectos de carbonatación en la pasta de cemento</i>	44
Tabla 3 <i>Composición del vidrio de sosa y cal</i>	64
Tabla 4 <i>Análisis químico M02.</i>	66
Tabla 5 <i>Resumen de la geometría, relación a/c</i>	81
Tabla 6 <i>Operacionalización de variables</i>	83
Tabla 7 <i>Dosificación para pastas, morteros y concretos de la serie 1</i>	85
Tabla 8 <i>Dosificación para pastas, morteros y concretos de la serie 2</i>	86
Tabla 9 <i>Dosificación para pastas, morteros y concretos de la serie 3</i>	86
Tabla 10 <i>Dosificación para pastas, morteros y concretos de la serie 4</i>	87
Tabla 11 <i>Características de cementos utilizados para la fabricación de probetas</i>	89
Tabla 12 <i>Tratamiento de carbonatación de pastas, morteros y concreto cilíndricos</i> 90	90
Tabla 13 <i>Resumen de las muestras elaboradas para el proceso de carbonatación</i> ...	92
Tabla 14 <i>Técnicas de caracterización experimental de probetas</i>	93
Tabla 15 <i>Profundidad de carbonatación (mm)</i>	96
Tabla 16 <i>Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación</i>	96
Tabla 17 <i>Profundidad de carbonatación de morteros</i>	97
Tabla 18 <i>Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación</i>	98
Tabla 19 <i>Variación de pH en proceso de carbonatación</i>	100
Tabla 20 <i>Estadística descriptiva Variación de pH en proceso de carbonatación</i>	101
Tabla 21 <i>Variación de pH en proceso de carbonatación</i>	101
Tabla 22 <i>Estadística descriptiva Variación de pH en proceso de carbonatación</i>	103
Tabla 23 <i>Coefficiente de carbonatación k_c, k_a</i>	103
Tabla 24 <i>Estadística descriptiva de porcentaje de absorción de CO_2</i>	104
Tabla 25 <i>Coefficiente de carbonatación k_c, k_a</i>	105
Tabla 26 <i>Estadística descriptiva de porcentaje de absorción de CO_2</i>	106
Tabla 27 <i>Ganancia de masa (g) de CO_2</i>	106
Tabla 28 <i>Estadística Descriptiva de la Ganancia de masa</i>	108
Tabla 29 <i>Ganancia de masa carbonatada (g)</i>	108
Tabla 30 <i>Estadística Descriptiva Ganancia de masa (g) de CO_2</i>	109
Tabla 31 <i>Cálculo de porosidad del cemento tipo 1</i>	110
Tabla 32 <i>Cálculo de porosidad del cemento tipo HS</i>	110
Tabla 33 <i>Profundidad de carbonatación</i>	113
Tabla 34 <i>Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación</i>	114
Tabla 35 <i>Profundidad de carbonatación</i>	115
Tabla 36 <i>Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación</i>	116
Tabla 37 <i>Variación de pH en proceso de carbonatación</i>	117
Tabla 38 <i>Estadística descriptiva Variación de pH en proceso de carbonatación</i>	118
Tabla 39 <i>Coefficientes de carbonatación en la cámara de aceleración</i>	119
Tabla 40 <i>Coefficientes de carbonatación atmosférica</i>	119
Tabla 41 <i>Coefficientes de carbonatación en la cámara de aceleración</i>	120
Tabla 42 <i>Coefficientes de carbonatación atmosférica</i>	121
Tabla 43 <i>Coefficientes de carbonatación en la cámara de aceleración</i>	122
Tabla 44 <i>Masas de muestras carbonatas. Serie 2</i>	123
Tabla 45 <i>Estadística Descriptiva Masas de las diferentes muestras carbonatas</i>	125
Tabla 46 <i>Masas de las diferentes muestras carbonatas</i>	126
Tabla 47 <i>Estadística Descriptiva Masas de las diferentes muestras carbonatas</i>	127
Tabla 48 <i>Ganancia de CO_2 en carbonatación acelerada de cemento TI</i>	128

Tabla 49	<i>Estadística descriptiva Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada ...</i>	128
Tabla 50	<i>Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada</i>	131
Tabla 51	<i>Estadística descriptiva Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada...</i>	131
Tabla 52	<i>Resistividad de muestras de pastas y morteros.....</i>	134
Tabla 53	<i>Profundidad de carbonatación Serie 3</i>	138
Tabla 54	<i>Estadística descriptiva de profundidad de carbonatación</i>	139
Tabla 55	<i>Profundidad de carbonatación</i>	140
Tabla 56	<i>Estadística descriptiva de profundidad de carbonatación</i>	142
Tabla 57	<i>Variación de PH en muestras carbonatadas</i>	143
Tabla 58	<i>Estadística descriptiva variación de PH en muestras carbonatadas</i>	144
Tabla 59	<i>Coefficiente de carbonatación (Kc) y Ka.....</i>	145
Tabla 60	<i>Estadística descriptiva coeficiente de carbonatación Kc</i>	145
Tabla 61	<i>Coefficiente de carbonatación (Kc) y (Ka)</i>	146
Tabla 62	<i>Estadística descriptiva coeficiente de carbonatación Kc</i>	146
Tabla 63	<i>Ganancia de masa de pastas y morteros en carbonatación acelerada</i>	147
Tabla 64	<i>Estadística descriptiva de ganancia de masa</i>	148
Tabla 65	<i>Ganancia de masa de pastas y morteros en carbonatación acelerada</i>	149
Tabla 66	<i>Estadística descriptiva de ganancia de masa en carbonatación</i>	150
Tabla 67	<i>Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada</i>	151
Tabla 68	<i>Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada</i>	152
Tabla 69	<i>Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada de cemento tipo HS.....</i>	155
Tabla 70	<i>Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en carbonatación.....</i>	155
Tabla 71	<i>Resistencia a la Compresión (MPa) de pastas, y morteros Cemento</i>	157
Tabla 72	<i>Resistencia a la Compresión (MPa).....</i>	158
Tabla 73	<i>Estadística descriptiva de resistencia a la Compresión (MPa).....</i>	159
Tabla 74	<i>Resistencia a la Compresión (MPa) de pastas, y morteros Cemento</i>	161
Tabla 75	<i>Resistencia a la Compresión (MPa) de pastas, y morteros Cemento</i>	162
Tabla 76	<i>Estadística descriptiva de resistencia a la Compresión (MPa).....</i>	163
Tabla 77	<i>Fichas de patrones normalizados para el análisis de DRX.....</i>	164
Tabla 78	<i>Tabla de porosidad de pastas y morteros del cemento Tipo I</i>	172
Tabla 79	<i>Tabla de porosidad de pastas y morteros del cemento Tipo HS.....</i>	174
Tabla 80	<i>Profundidad de carbonatación Serie 4</i>	175
Tabla 81	<i>Promedio de profundidad de carbonatación</i>	176
Tabla 82	<i>Estadística descriptiva profundidad de carbonatación</i>	177
Tabla 83	<i>Profundidad de carbonatación</i>	178
Tabla 84	<i>Promedio de profundidad de carbonatación</i>	179
Tabla 85	<i>Estadística descriptiva profundidad de carbonatación</i>	180
Tabla 86	<i>Variación de pH en proceso de carbonatación - Serie 4.....</i>	181
Tabla 87	<i>Estadística descriptiva de variación de pH en proceso de carbonatación</i>	182
Tabla 88	<i>Ganancia de masa de morteros de carbonatación acelerada</i>	183
Tabla 89	<i>Promedio de incremento de masa (g) en morteros Cemento.....</i>	184
Tabla 90	<i>Estadística descriptiva de ganancia de masa en carbonatación</i>	184
Tabla 91	<i>Ganancia de masa de morteros en carbonatación acelerada</i>	185
Tabla 92	<i>Promedio de ganancia de masa (g) de morteros Cemento Andino</i>	187
Tabla 93	<i>Estadística descriptiva de ganancia de masa por carbonatación</i>	187
Tabla 94	<i>Ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas de cemento andino tipo I... ..</i>	188
Tabla 95	<i>Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas</i>	189
Tabla 96	<i>Ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas</i>	190
Tabla 97	<i>Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas</i>	191
Tabla 98	<i>Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂.....</i>	199

Tabla 99 <i>Modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 1</i>	200
Tabla 100 <i>Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂</i>	202
Tabla 101 <i>Modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 2 cemento</i>	204
Tabla 102 <i>Modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 3 cemento</i>	206
Tabla 103 <i>Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂</i>	208
Tabla 104 <i>Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂</i>	211
Tabla 105 <i>Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂</i>	212
Tabla 106 <i>Análisis de regresión de Resistencia a la compresión Serie 3</i>	215
Tabla 107 <i>Modelo del análisis de regresión de Resistencia a la compresión</i>	217

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Clasificación de los factores que afectan la carbonatación</i>	39
Figura 2 <i>Relaciones de durabilidad y desempeño del concreto</i>	57
Figura 3 <i>Mineral Grafito Muestra 01.</i>	65
Figura 4 <i>Diagrama del equipo de medición de carbonatación</i>	68
Figura 5 <i>Cámara de carbonatación y equipamiento de medición</i>	69
Figura 6 <i>Equipo medidor de pH, PC-700 – OAKLN</i>	70
Figura 7 <i>Fenómeno de difracción.</i>	71
Figura 8 <i>Probetas fabricadas de pastas, morteros y concreto</i>	87
Figura 9 <i>Cámara de carbonatación utilizado en la investigación</i>	92
Figura 10 <i>Profundidad de carbonatación, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo I</i>	97
Figura 11 <i>Profundidad de carbonatación, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo HS</i>	98
Figura 12 <i>Muestras carbonatadas – Serie 1</i>	99
Figura 13 <i>Variación de pH en muestras carbonatadas - Serie 1</i>	100
Figura 14 <i>Variación de pH en muestras carbonatadas– Serie 1</i>	102
Figura 15 <i>Ganancia de CO₂ (%) de, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo I y aditivos.</i> ...	104
Figura 16 <i>Ganancia de CO₂ (%)</i>	105
Figura 17 <i>Ganancia de masa carbonatada (g)</i>	107
Figura 18 <i>Ganancia de masa carbonatada (g) de la Serie 1</i>	109
Figura 19 <i>Porcentaje de porosidad del cemento tipo 1 y tipo HS</i>	111
Figura 20 <i>Muestras carbonatadas – Serie 2</i>	112
Figura 21 <i>Profundidad de carbonatación de pastas con aditivos</i>	113
Figura 22 <i>Profundidad de carbonatación de morteros con aditivos</i>	114
Figura 23 <i>Profundidad de carbonatación de morteros con aditivos</i>	116
Figura 24 <i>Variación de pH en muestras carbonatadas</i>	117
Figura 25 <i>Incremento de masa de pastas de cemento T1 y tipo HS Vs tiempo</i>	124
Figura 26 <i>Incremento de masa de morteros de cemento Tipo 1 Vs. tiempo</i>	124
Figura 27 <i>Incremento de masa de pastas y morteros de cemento HS Vs tiempo</i>	126
Figura 28 <i>Absorción de CO₂ (%) de pastas de cemento andino</i>	129
Figura 29 <i>Absorción de CO₂ de morteros de cemento andino tipo I con adiciones.</i>	129
Figura 30 <i>Incremento de masa Vs Absorción de CO₂</i>	130
Figura 31 <i>Incremento de masa Vs Absorción de CO₂</i>	130
Figura 32 <i>Absorción de CO₂ de morteros de cemento andino tipo HS con aditivos</i>	132
Figura 33 <i>Incremento de masa Vs Absorción de CO₂ de morteros</i>	132
Figura 34 <i>Resistividad (kΩ) de pastas de cemento andino tipo I</i>	135
Figura 35 <i>Resistividad (kΩ) de pastas de cemento andino</i>	135
Figura 36 <i>Resistividad (kΩ) de morteros de cemento andino tipo I</i>	136
Figura 37 <i>Resistividad (kΩ) de morteros de cemento andino tipo I</i>	136
Figura 38 <i>Resistividad (kΩ) de morteros de cemento andino tipo HS</i>	137
Figura 39 <i>Resistividad (kΩ) de morteros de cemento andino tipo HS</i>	138
Figura 40 <i>Profundidad de carbonatación (mm) de pastas, de Cemento Andino</i>	140
Figura 41 <i>Profundidad de carbonatación (mm) de morteros de Cemento Andino</i> ..	141
Figura 42 <i>Profundidad de carbonatación (mm) de morteros de Cemento tipo HS</i> ..	142
Figura 43 <i>Muestras carbonatadas – Serie 3</i>	143
Figura 44 <i>Variación de PH en muestras carbonatadas de Mortero Cemento</i>	144
Figura 45 <i>Ganancia de masa de pastas (Tipo I y Tipo HS)</i>	148
Figura 46 <i>Ganancia de masa de morteros vs tiempo</i>	150
Figura 47 <i>Absorción de CO₂ Vs Tiempo en pasta con y sin adiciones</i>	152
Figura 48 <i>Absorción de CO₂ Vs Tiempo en morteros - serie 3</i>	153

Figura 49	<i>Ganancia de masa de pastas vs % de absorción de CO₂</i>	154
Figura 50	<i>Ganancia de masa de morteros vs % de absorción de CO₂ con aditivos</i>	154
Figura 51	<i>Absorción de CO₂ Vs Tiempo en morteros</i>	156
Figura 52	<i>Ganancia de masa de morteros vs % de absorción de CO₂ con aditivos</i>	156
Figura 53	<i>Recta de ajuste del coeficiente de carbonatación kc vs la resistencia</i>	159
Figura 54	<i>Recta de ajuste del coeficiente de carbonatación kc vs la resistencia</i>	160
Figura 55	<i>Recta de ajuste del coeficiente de carbonatación kc vs la resistencia</i>	163
Figura 56	<i>Difractogramas de Mortero Tipo I sin adiciones</i>	164
Figura 57	<i>Difractogramas de Mortero Tipo I con carbono</i>	165
Figura 58	<i>Difractogramas de Mortero Tipo I con vidrio</i>	166
Figura 59	<i>Difractogramas de Mortero Tipo I con Impermeabilizante</i>	166
Figura 60	<i>Difractogramas de Mortero Tipo I con Nanotubo de carbono</i>	167
Figura 61	<i>Difractograma de Mortero Tipo HS sin aditivos</i>	168
Figura 62	<i>Difractogramas de Mortero Tipo HS con carbono</i>	169
Figura 63	<i>Difractograma de Mortero Tipo HS con vidrio</i>	170
Figura 64	<i>Difractograma de Mortero Tipo HS con impermeabilizante</i>	171
Figura 65	<i>Difractograma de Mortero Tipo HS con Nanotubo de carbono</i>	171
Figura 66	<i>Porosidad de Pastas de cementos andino tipo I y THS con aditivos</i>	173
Figura 67	<i>Porosidad de Mortero de cementos andino tipo I con aditivos</i>	173
Figura 68	<i>Porosidad de Mortero de cementos andino tipo HS con aditivos</i>	174
Figura 69	<i>Histogramas de las profundidades de carbonatación</i>	177
Figura 70	<i>Profundidad de carbonatación expuestos a diferentes % de CO₂</i>	178
Figura 71	<i>Histogramas de las profundidades de carbonatación</i>	180
Figura 72	<i>Profundidad de carbonatación expuestos a diferentes % de CO₂</i>	181
Figura 73	<i>Muestras carbonatadas – Serie 4</i>	181
Figura 74	<i>Variación de pH en muestras carbonatadas</i>	182
Figura 75	<i>Incremento de masa de morteros de cementos andino tipo I</i>	185
Figura 76	<i>Incremento de masa de morteros de cementos andino tipo HS</i>	187
Figura 77	<i>Absorción de CO₂ (%) de morteros de cementos andino tipo I</i>	189
Figura 78	<i>Absorción de CO₂ de morteros de cemento andino tipo HS</i>	191
Figura 79	<i>Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂</i>	198
Figura 80	<i>Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 1</i>	199
Figura 81	<i>Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido</i>	200
Figura 82	<i>Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 1</i>	201
Figura 83	<i>Prueba de normalidad Anderson – Darling al CO₂ absorbido</i>	201
Figura 84	<i>Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 2</i>	203
Figura 85	<i>Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido</i>	203
Figura 86	<i>Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 2</i>	205
Figura 87	<i>Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido</i>	205
Figura 88	<i>Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 3</i>	207
Figura 89	<i>Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂</i>	207
Figura 90	<i>Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 3</i>	209
Figura 91	<i>Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido</i>	210
Figura 92	<i>Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 4</i>	211
Figura 93	<i>Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido</i>	212
Figura 94	<i>Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 4</i>	213
Figura 95	<i>Prueba de normalidad de Resistencia a la compresión</i>	214
Figura 96	<i>Análisis de Regresión Resistencia a la compresión de serie 3</i>	216
Figura 97	<i>Prueba de normalidad de Resistencia a la compresión</i>	216
Figura 98	<i>Análisis de Regresión Resistencia a la compresión de serie 3</i>	217

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar la relación de las variables: concentración del CO₂, porcentaje en masa de CaO en la composición del cemento, humedad relativa, y la cantidad de agentes dopantes con el espesor del proceso de carbonatación inducida en muestras de pastas, morteros y concreto elaboradas con cementos portland tipo I y tipo HS. La carbonatación del concreto es una de las causas que afecta la durabilidad de materiales de la construcción, causando corrosión homogénea en estructuras de concreto armado, generando reacciones del CO₂ de la atmosfera con los compuestos hidratados del cemento que ingresa al concreto en presencia de la humedad, convirtiendo al hidróxido de calcio [Ca (OH)₂] en carbonato de calcio (CaCO₃). En esta investigación experimental se han valorado las profundidades de carbonatación con cambios de pH usando el test de fenolftaleína y las velocidades de carbonatación utilizando el modelo de ecuación de Fick, $x=k\sqrt{t}$ para muestras de concreto. Los ensayos se realizaron en una cámara de carbonatación acelerada con control de sensores: CO₂, humedad relativa y temperatura, construidas para esta investigación; el método acelerado (serie 3) permitió obtener una profundidad promedio de carbonatación de 9.07 mm durante 15 días y los ensayos de resistencia a compresión de morteros iniciales y luego carbonatadas, presentando una disminución promedio del 20.37%; con datos de % de absorción de CO₂ se realizaron las pruebas de ajuste de una distribución normal $p > 0.05$, mostrando la validez de los datos obtenidos.

Palabras clave: Carbonatación, corrosión, durabilidad, concreto, absorción de CO₂

ABSTRACT

The objective of this research work was to evaluate the relationship of the variables: CO₂ concentration, mass percentage of CaO in the cement composition, relative humidity, and the amount of doping agents with the thickness of the induced carbonation process in samples of pastes, mortars and concrete made with type I and type HS Portland cements. The carbonation of concrete is one of the causes that affects the durability of construction materials, causing homogeneous corrosion in reinforced concrete structures, generating reactions of CO₂ from the atmosphere with the hydrated compounds of the cement that enters the concrete in the presence of humidity., converting calcium hydroxide [Ca (OH)₂] into calcium carbonate (CaCO₃). In this experimental investigation, the carbonation depths with pH changes have been evaluated using the phenolphthalein test and the carbonation speeds using the Fick equation model, $x=k \sqrt{t}$ for concrete samples; the tests were carried out in an accelerated carbonation chamber with sensor control: CO₂, relative humidity and temperature, built for this research; the accelerated method (series 3) allowed obtaining an average carbonation depth of 9.07 mm for 15 days and the compressive strength tests of initial and then carbonated mortars, presenting an average decrease of 20.37%; with data from the % absorption of CO₂, fit tests were performed for a normal distribution $p > 0.05$, showing the validity of the data obtained.

Keywords: Carbonation, corrosion, durability, concrete, CO₂ absorption.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Uno de los principales factores del deterioro de la armadura del concreto es el proceso de corrosión de los aceros usados en las estructuras de los procesos constructivos, esto implica costos adicionales y significativos con relación a las reparaciones y mantenimientos de la infraestructura, con la preocupación que ello supone para las administraciones propietarias de las obras públicas y los particulares, cuyas viviendas sufren deterioros prematuros.

Con relación a la fabricación de materiales cementantes como: pastas, morteros y concreto se usa una mezcla homogénea de cemento, agua y agregados de piedra chancada, grava y arena de diferentes dimensiones y composición. Una vez amasados estos constituyentes, la mezcla se va endureciendo debido a la hidratación de las fases del cemento.

Entre los productos más importantes del proceso de hidratación se tiene: la portlandita Ca(OH)_2 , dispersiones coloidales de silicato cálcico hidratado (C-S-H) y los aluminatos y sulfo-aluminatos hidratados.

Un concreto de cemento portland unido a una estructura de acero da lugar a la formación del concreto armado, cuyo recubrimiento proporciona protección contra los procesos de corrosión. En primer lugar, forma una barrera física que la separa del medio ambiente, y en segundo lugar, forma una película pasivante debido al líquido que se encuentran en los poros como consecuencia de la hidratación e hidrolisis que se genera durante el endurecimiento del concreto.

En los procesos constructivos tanto el concreto, como los morteros son ampliamente usados solos o reforzados con armazones de acero debido a su gran resistencia, versatilidad, durabilidad comparados con otros materiales

A nivel mundial, en las últimas tres décadas se ha observado el deterioro de las construcciones de concreto como agrietamientos y delaminaciones, cuyas consecuencias es la corrosión de la estructura de acero generando una disminución de su durabilidad.

Por lo que es necesario estudiar los factores causales de este deterioro, una de ellas emisión de gases como consecuencia del calentamiento global del medio ambiente.

1.2 Descripción del problema

El cambio climático y sus consecuencias de naturaleza global son temas importantes para abordar el desarrollo sostenible y en este contexto, la industria de la construcción debe reconocer el impacto de la contaminación por emisiones a la atmósfera de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, entre los que cuentan el dióxido de carbono, no solo contribuye al problema del calentamiento global, si no también genera procesos de corrosión a la industria de la construcción y es necesario tomar en consideración esta problemática para facilitar los diseños estructurales del concreto armado usando materiales de calidad, que disminuyan los procesos de absorción de CO₂ por los agentes cementantes, con la finalidad de garantizar la seguridad y bienestar de la sociedad. Cabe destacar, que la carbonatación del concreto es una de las causas que genera la corrosión en estructuras de concreto armado, evoluciona en forma lenta, comparado con la corrosión por cloruros.

El proceso de carbonatación implica reacciones entre CO₂ presente en la atmósfera y que es absorbido por el concreto para posteriormente presentar reacciones con los componentes de este. En consecuencia, la reacción de carbonatación es afectado por variables naturales propios del concreto y el medio que lo rodea.

Los principales factores para considerar en la carbonatación del concreto son: el grado de compactación, relacionado con la porosidad, la relación agua/cemento, la clase y cantidad de cemento usado, el tiempo de curado, el clima y las condiciones ambientales. Cabe destacar que el grado de compactación, relacionado con la porosidad del concreto es la principal variable

responsable del proceso de carbonatación, puesto que la distribución, dimensiones y el área superficial de los poros son los principales responsables de la absorción del CO₂ proveniente del exterior y que ocasiona el deterioro del concreto en edificaciones urbanas que están sometidas a diferentes grados de agresividad atmosférica, generando como consecuencia procesos de corrosión uniforme en el armazón de acero de refuerzo.

Esta investigación examina la profundidad de carbonatación mediante absorción del CO₂ controlada en una cámara diseñada y construida en la Universidad Nacional de Ingeniería para estudiar procesos de carbonatación acelerada, donde se colocan las pastas, morteros y concretos hechos con cementos portland Andino tipo I y tipo HS Andino Ultra, habiéndose diseñado probetas con adiciones de carbón mineral, nanotubos de carbón, vidrio de reciclaje y un impermeabilizante, con el propósito de estudiar el efecto que generan en las velocidades de carbonatación acelerada.

1.3 Formulación del problema

- *Problema general*

¿Cuál es la relación de las variables: concentración del CO₂, el porcentaje en masa de CaO en la composición del cemento, la humedad relativa, ¿el pH y la cantidad de agentes dopantes con el espesor del proceso de carbonatación inducida en las muestras de pastas, morteros y concreto elaborados con cementos portland tipo I y tipo HS?

- *Problemas específicos*

¿Cuál es el nivel de profundidad de carbonatación y la fuerza a la compresión en probetas de morteros y concreto elaborados con cemento portland tipo I y tipo HS, en función de las variables experimentales de pH masa carbonatada, humedad, resistividad, fuerza a la compresión?

¿Es posible relacionar la resistividad y el proceso de carbonatación acelerada por absorción del CO₂ en cementos portland tipo I y HS con las variables experimentales de pH, masa carbonatada, humedad, resistividad, fuerza a la compresión?

¿Influye el uso de los materiales dopantes en la profundidad de carbonatación, en función de las variables experimentales de pH, masa carbonatada, humedad, resistividad, fuerza a la compresión?

¿Es posible establecer un modelo predictivo sobre la profundidad de carbonatación en función de las variables experimentales como la concentración del CO₂, el porcentaje en masa de CaO en la composición del cemento, la humedad relativa, el pH y la cantidad y calidad de agentes dopantes en la formulación de cementos portland tipo I y HS?

1.4 Antecedentes

El cemento usado en la elaboración de concretos y el refuerzo de acero son los materiales más importantes, pero sometidos a agentes atmosféricos se degradan produciendo el fenómeno de corrosión. Un cambio climático genera un aumento de CO₂ atmosférico, impactando en la corrosión atmosférica del concreto armado, generando preocupación en los gobiernos de diferentes países. La American Society of Civil Engineers ASCE de Estados Unidos reporta que las redes del sistema de transporte de los países presentan diversos problemas recurrentes, entre los que cuentan la degradación de la estructura de los puentes generando corrosión y en consecuencia elevados costos de reparación y mantenimiento. En el contexto peruano, no existen políticas preventivas para el mantenimiento de los puentes cuyas infraestructuras registran grietas; por ello se hace urgente intervenir a tiempo y desarrollar modelos predictivos antes que ocurran accidentes que comprometan la integridad de los usuarios.

La carbonatación ha sido un proceso poco estudiado en el país por la dificultad de implementar equipos en los laboratorios, como la cámara de carbonatación acelerada, para

realizar las investigaciones respectivas. Además, en el impacto medio ambiental no ha sido considerado que las concentraciones persistentes de CO₂ en el medio ambiente y su acumulación en el transcurso del tiempo en el concreto de las edificaciones afectan al concreto de los edificios urbanos con una antigüedad mayor de 20 años, específicamente en ciudades bastante pobladas, sometidos al incremento sostenido de emisiones de CO₂, además de otros gases por las industrias y el parque automotor.

En esta investigación se formularon objetivos con la finalidad de caracterizar el proceso de carbonatación en los concretos simulados y formulados en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil, considerando que las variables que influyen el proceso de carbonatación, método de desarrollo experimental, las recolección y procesamiento de datos, permitirán desarrollar un modelo que emule las condiciones ambientales de la ciudad de Lima y validar con los resultados un modelo de simulación computacional

Con base a lo indicado, se planteó el diseño y construcción de una cámara de carbonatación en la UNI, cuyo equipamiento ha permitido el estudio de carbonatación, y seguirá apoyando a futuras investigaciones sobre el tema

1.4.1 Antecedentes nacionales

La investigación de Valerio (2019) titulada la “preparación de probetas de concreto con nanotubos de carbono para el mejoramiento de sus propiedades” (p. 1). En la investigación, la carbonatación de probetas se desarrolló en una cámara cerrada con ingreso de CO₂ de 8%. Asimismo, para determinar las propiedades estructurales y morfológicas, empleo las técnicas de Difracción de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido, ambas técnicas fueron desarrolladas en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. La caracterización mecánica de las probetas se efectuó con los ensayos mecánicos de compresión mediante la Norma ASTM C109, todos ellos realizados en el Laboratorio N°1 de Ensayo de Materiales. Entre los resultados relevantes con relación a la compresión de las probetas de

mortero, formuladas con cemento marca Sol, con un contenido al 1 % de nanotubos de carbono, reportó un valor de $6,626 \text{ kN.cm}^{-2}$, significativamente superior al valor de $5,05 \text{ kN.cm}^{-2}$ reportado para las probetas formuladas sin el aditivo de nanotubos de carbono.

1.4.2 Antecedentes internacionales

La investigación de Iloro (2022) titulada la “efectos del CO₂ ambiental sobre la carbonatación de hormigones elaborados con distintos cementos” (p.1). El estudio de naturaleza experimental se planteó como objetivo principal “evaluar los modelos de predicción de avance del frente de cambio de pH, sus variables críticas y las estimaciones, obtenidas con cada uno de ellos, comparándolos con los resultados experimentales” (p.3), llegando a la siguiente conclusión: Los procesos de carbonatación del cemento implican en un primer paso, la difusión del dióxido de carbono a través de la porosidad y la posterior reacción con los componentes de las fases hidratadas. En consecuencia, la composición del cemento es determinante en el avance del proceso de carbonatación.

Por otro lado, las investigaciones de Iloro et al. (2013) en Brasil en el IX International Congress on Pathology and Repair of Structures presentaron el estudio: Carbonatación acelerada de morteros. En este trabajo se evaluó la influencia de las adiciones minerales y el tiempo de curado en las reacciones del proceso de carbonatación en morteros con relaciones a/c similares, manteniendo constante la humedad, temperatura y la concentración de CO₂ de 4%, concluyendo que: las resistencias a la compresión de todos los morteros se han incrementado con el tiempo de curado; el mortero patrón presenta menor profundidad de carbonatación.

De la misma forma, Tung (2013) en la revista The Open Civil Engineering Journal publica el artículo “modelamiento de procesos de carbonatación en materiales de cemento” (p. 1), este estudio se efectuó en muestras de mortero y pasta de cemento a las que sometió a carbonatación acelerada a 20 ° C, 65% de humedad relativa, concentración de CO₂ de 20% o

50%. Con la prueba de fenolftaleína se determinó la profundidad de carbonatación; con el análisis termogravimétrico se determinó la concentración de CO₂, tipo de material, exposición superficial al CO₂. Además, la porosidad accesible al agua, duración de la carbonatación. Con base a los resultados experimentales, se desarrolló una simulación numérica para predecir la profundidad de carbonatación.

1.5 Justificación de la investigación

La carbonatación producida en grandes ciudades por emisión del CO₂ generado por la contaminación ambiental que impacta en las construcciones de concreto, también es debido a la humedad relativa que ingresan al concreto a través de la red de poros, disminuyendo su durabilidad y resistencia. Este proceso no es suficientemente conocido en nuestro medio y por consiguiente no se toma conciencia de las peligrosas consecuencias finales como es la corrosión en el acero del concreto armado.

La presente investigación centra su atención en la medida de las profundidades de carbonatación producida como consecuencia del carbonato de calcio formado in situ dentro del concreto y relacionar con los parámetros como la porosidad, de relaciones agua/cemento, tipos de cemento, humedad relativa y aditivos minerales en los diferentes tipos de cemento estudiados para los cuales se diseñaron diversas muestras de concreto, diseñadas para evaluar una aceleración del ataque de CO₂ en la cámara de carbonatación acelerada.

Por consiguiente, la investigación contribuirá con el avance de técnicas experimentales en cámara de carbonatación acelerada, con un control estandarizado de sensores aplicado a interfaces para la obtención de datos. Con el objetivo de proponer medidas para la mitigación del problema.

1.6 Limitaciones de la investigación

Considerando el carácter complejo del diseño experimental, a continuación, se detalla algunas limitaciones. En primer lugar, con relación al tiempo de ejecución de los experimentos,

una limitante fue el uso de los horarios limitados en el laboratorio de Ensayo de Materiales (LEM) de la UNI, para la realización de la experimentación con las probetas diseñadas y elaboradas. En segundo lugar, con relación al espacio del laboratorio designado para el presente trabajo de investigación, cabe destacar que ha sido desarrollada en el laboratorio de la FIC-UNI, con limitaciones de espacio para el almacenamiento de las probetas usadas en la la experimentación. Finalmente, con relación a los recursos, el financiamiento del presupuesto para el diseño y construcción de la cámara de carbonatación y equipamiento se realizó con recursos propios de la investigadora, cubriendo el 80% del presupuesto y el 20 % fue cubierto por el Laboratorio de ensayo de materiales de la FIC-UNI.

1.7 Objetivos

- *Objetivo general*

Evaluar la relación de las variables: concentración del CO₂, el porcentaje en masa de CaO en la composición del cemento, la humedad relativa, el pH y la cantidad de agentes dopantes con el espesor del proceso de carbonatación inducida en las muestras de pastas, morteros y concreto elaborados con cementos portland tipo I y tipo HS.

- *Objetivos específicos*

Evaluar los niveles de profundidad de carbonatación y la fuerza a la compresión en probetas de morteros y concreto elaborados con cemento portland tipo I y tipo HS, en función de las variables experimentales de pH masa carbonatada, humedad, resistividad, fuerza a la compresión.

Determinar la relación entre la resistividad y el proceso de carbonatación acelerada por absorción del CO₂ en cementos portland tipo I y HS, en función de las variables experimentales de pH, masa carbonatada, humedad, resistividad, fuerza a la compresión.

Evaluar la influencia de los materiales dopantes en la profundidad de carbonatación, en función de las variables experimentales de pH, masa carbonatada, humedad, resistividad, fuerza a la compresión.

Proponer un modelo predictivo sobre la profundidad de carbonatación en función de las variables experimentales de pH, masa carbonatada, humedad, resistividad, fuerza a la compresión para el cemento portland tipo I y tipo HS.

1.8 Hipótesis de investigación

- Hipótesis general

La concentración del CO₂, el porcentaje en masa de CaO en la composición del cemento, la humedad relativa, el pH y la cantidad de agentes dopantes, determinan el espesor del proceso de carbonatación inducida en las muestras de pastas, morteros y concreto elaborados con cementos portland tipo I y tipo HS.

- Hipótesis Especificas

Las probetas de morteros y concreto elaborados con cemento portland tipo I, presentan mayores profundidades de carbonatación y menor fuerza a la compresión que el cemento tipo HS, bajo las mismas condiciones experimentales con relación a las variables experimentales de pH masa carbonatada, humedad, resistividad, fuerza a la compresión.

Las probetas de morteros y concreto elaborados con cemento portland tipo I, presentan menor resistividad que las elaboradas con cemento portland tipo HS, después de haber sido sometido a carbonatación, bajo las mismas condiciones experimentales con relación a las variables experimentales de pH masa carbonatada, humedad, resistividad, fuerza a la compresión.

Los cementos dopados con la adición de aditivos presentan diferentes profundidades de carbonatación de acuerdo de las características físicas y químicas del agente dopante, bajo las

mismas condiciones experimentales de pH masa carbonatada, humedad, resistividad, fuerza a la compresión.

Las variables: concentración del CO₂, el porcentaje en masa de CaO en la composición del cemento, la humedad relativa, el pH y la cantidad de agentes dopantes permiten estimar ecuaciones de regresión para explicar los niveles de profundidad de la carbonatación en cementos portland tipo I y HS.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Química del cemento y del concreto

2.1.1.1 Cemento. En términos generales el cemento es un material de construcción esencial que se utiliza como aglutinante en la fabricación de concreto y mortero. Se fabrica por calcinación de mezclas de piedra caliza, arcillas y yeso hasta obtener un material llamado Clinker, que posteriormente se somete a un proceso de molienda hasta obtener un polvo fino. Este polvo se mezcla con agua para formar una pasta de cemento, que al mezclarse con arena fina se obtiene el mortero y al añadir posteriormente la piedra chancada, el producto fraguado produce el concreto.

Se debe tener presente que el cemento es un producto estandarizado, que se comercializa en el país. En este sentido, la Norma Técnica Peruana NTP 334.009, publicado por INACAL (2016), que corresponde a la norma internacional ASTM C 150, considera la siguiente definición: “El cemento Portland es un cemento hidráulico producido mediante la pulverización del Clinker compuesto esencialmente por silicatos de calcio hidráulicos y que contiene generalmente sulfato de calcio y eventualmente caliza como adición durante la molienda” (p. 5). La NTP 334.009, establece los cinco tipos de cementos Portland y sus características.

Tipos de cemento portland:

Tipo I: Para uso general que no requiera propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo;

Tipo II: Para uso general, específicamente cuando se desea moderada resistencia a los sulfatos;

Tipo III: Para ser utilizado cuando se requiere altas resistencias iniciales;

Tipo IV: Para usar cuando se desea bajo calor de hidratación;

Tipo V: Para usar cuando se desea alta resistencia a los sulfatos (p. 5).

2.2.1.2 Tipos de cemento adicionados. Por otro lado, la Norma Técnica Peruana NTP 334.090 publicado por INACAL (2016), está en correspondencia con las normas internacionales, específicamente con la ASTM C 595, establece los requerimientos que debe cumplir el cemento Portland, adicionados o mezclados, con propósitos de uso general y específicos, con escoria, puzolana, caliza o por mezcla de estas.

Cemento adicionado binario: Es un tipo de cemento adicionado hidráulico producido por la mezcla de dos tipos diferentes de clínker, que es el componente esencial utilizado en la fabricación de cemento. La adición de un segundo tipo de clínker a la formulación, permite conseguir cementos con propiedades específicas, tales como una mayor durabilidad y resistencia a la corrosión y con un tiempo de fraguado más corto. Cabe destacar, que el uso de cementos adicionados binarios, resultan ser más costoso que el uso de cemento Portland convencional, en razón a que se requiere, la producción y mezcla de dos tipos diferentes de clínker. Un ejemplo de cemento adicionado es el hidráulico, es un cemento Portland con cemento de escoria, o cemento Portland con una puzolana.

Cemento adicionado ternario: Cemento adicionado hidráulico es un cemento Portland con una combinación de dos puzolanas diferentes, o cemento Portland con cemento de escoria y puzolana, una puzolana y una caliza, o cemento de escoria y una caliza. El uso este tipo de cementos adicionados es menos común debido a los costos de fabricación, pero puede ser conveniente en proyectos de construcción que requieren una combinación de propiedades específicas que no se pueden lograr con otros tipos de cemento.

La norma NTP 334.090 clasifica a los tipos de cementos Portland adicionados, como: “Tipo IS: cemento Portland con escoria de alto horno, tipo IP: cemento Portland puzolánico,

Tipo II: cemento Portland – caliza, tipo I(PM): cemento Portland puzolánico modificado, tipo IT: cemento adicionado ternario y Tipo ICo: cemento Portland compuesto”.

Este marco inicial, nos permite apreciar los diferentes tipos de cementos Portland estándar y adicionados, que son utilizados actualmente en el sector construcción de nuestro país. Sin embargo, el presente trabajo se orienta a explorar la carbonatación en diversas muestras de concreto, para determinar su corrosión y su aplicabilidad como medio de captura de CO₂. Por esta razón, debemos considerar los diversos aditivos químicos, que también han sido estandarizados, así por ejemplo la ASTM (American Society for Testing and Materials) propone los siguientes tipos de aditivos químicos: Tipo A: Reductores de agua (ASTM C 494), Tipo B: Retardadores de fraguado (ASTM C 494), Tipo C: Acelerantes (ASTM C 494), Tipo D: Reductores de agua y retardadores de fraguado (ASTM C 494)., Tipo E: Reductores de agua y acelerantes (ASTM C 494), Tipo F: Reductores de agua de alto rango (ASTM C 494), Tipo G: Reductores de agua de alto rango y retardantes (ASTM C 494), Incorporadores de Aire (ASTM C 260)., Aditivos minerales – Puzolanas (ASTM C 618), Aditivos minerales – Microsílice (ASTM C 989), Inhibidores de corrosión (ASTM C 1582), Superplastificantes (ASTM C1017). Adicionalmente se pueden considerar impermeabilizantes, curadores y nuevos Aditivos.

2.1.2 La química de la carbonatación de los cementos

Entender la química de la reacción de carbonatación en el concreto es muy importante para apreciar donde se produce y se ubica la carbonatación en el ciclo de vida útil del cemento. Para facilitar este objetivo, debemos enfocarnos primero en la química de cemento.

El cemento Pórtland, es el aglomerante hidráulico producido por la calcinación de una mezcla de piedra caliza y arcillas a 1450°C, en hornos tubulares rotatorios. Una de las partes del proceso produce la fusión parcial de la mezcla de los óxidos disociados con la consecuente producción de determinados minerales del clinker a diferentes temperaturas (entre 700 a

1450°C). A partir de la molienda fina del Clinker (en molinos de bolas) con una adición de un pequeño porcentaje de yeso (sulfato de calcio 0,5-1%) y se obtiene el cemento. Taylor (1997).

La química del cemento puede ser muy compleja. Antes que las materias primas ingresen a los hornos, la química de los componentes principales puede ser cuidadosamente controlada. Sin embargo, una vez que entra al horno, existen múltiples variables que pueden afectar la química del clinker producido. Debido a que los químicos especializados en cemento se enfocan principalmente en los óxidos importantes contenidos dentro del Clinker. Lo que le da al cemento sus propiedades de compactación. Dayaram (2010).

Se puede observar que el cemento en bruto o clinker está constituido básicamente por cuatro óxidos metálicos que son CaO (C), SiO₂ (S), Al₂O₃ (A) y Fe₂O₃ (F), y estos son responsables del volumen del Cemento Portland estándar. La adición al clinker de sustancias tales como cenizas volantes, yeso, Humos de sílice, piedra caliza, escoria de alto horno, entre otros, puede ser usada para influenciar las propiedades y configurar los tiempos de fraguado del concreto esperado, variando sus fases constituyentes más importantes.

En la Tabla 1, Lorca (2014), propone un ejemplo sobre la composición de un determinado tipo de cemento Portland. El clinker de cemento Portland está compuesto por cuatro constituyentes mineralógicos cristalinos que corresponden a sus cuatro fases mayores Taylor (1997), Kurdowski (2014) y André (2017): Alita (C3S: 50-70 %): se asimila al silicato tricálcico [3CaO · SiO₂], Belita (C2S: 15-30 %): se asimila al silicato bicálcico [2CaO · SiO₂], Aluminato (C3A: 5-10 %): se asimila a aluminato tricálcico [3CaO · Al₂O₃], Ferrita (C₄AF: 5-15 %): se asimila a ferritoaluminato tetracálcico [4CaO · Al₂O₃ · Fe₂O₃]

Tabla 1

Composición química media del clinker del cemento Portland

Composición mineralógica del Clinker (%)		Composición química del clinker (%)	
Fases	%	Óxidos	Contenido (%)

Ferroaluminato tetra cálcico	3-10	SO ₃	2 - 3,5
Ferrita (C4AF)			
Aluminato tri cálcico (C3A)	5-10	(Na ₂ O) Álcalis	0,3 - 1,2
Silicato di cálcico Belita (C2S)	20 - 25	MgO (Periclusa)	0,5 - 4
Silicato tri cálcico Alita (C3S)	50-60	Fe ₂ O ₃	0,5 - 6
		Al ₂ O ₃	3 - 8
		SiO ₂	17 - 25
		CaO	66 - 67

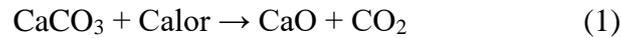
Nota. Tomado de (Lorca, 2014).

En la fabricación del cemento, a temperaturas altas otros compuestos del sodio, el potasio, magnesio y el azufre se incorporan a las fases del clinker, alterando potencialmente la estructura cristalina y otras propiedades de manera significativa.

Para producir cemento Portland, se usan materias primas calcáreas, que contienen carbonato de calcio (por ejemplo, piedra caliza) se trituran junto con una fuente de sílice (que proviene de la arcilla), se muelen y mezclan. La alúmina (Al₂O₃) y el óxido de hierro (Fe₂O₃) a menudo están presentes como impurezas en la arcilla, pero a veces también se agregan intencionalmente a la mezcla.

La mezcla se calienta en un horno tubular rotatorio a la temperatura máxima de alrededor de 1450 °C, donde se transforma en un material sólido denominado clinker. Por debajo de 1300 °C, los minerales arcillosos se descomponen y la calcita se disocia a cal viva (CaO) y dióxido de carbono (CO₂). La cal luego reacciona con productos de descomposición de cuarzo y arcilla para formar belita, aluminato y ferrita. En esta fase de fusión se forma principalmente la belita, la ferrita y el aluminato a través de reacciones en estado sólido. Esta

parte del proceso es responsable del gran impacto en el medio ambiente debido a las emanaciones de dióxido de carbono, debido a la descomposición del carbonato de calcio:



A temperaturas más altas, por encima de alrededor de 1300 °C, se forma una masa fundida, principalmente por ferrita y aluminato, que facilita la formación de alita a partir de belita y CaO a las temperaturas más altas. Después de enfriar, se agrega yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o alguna otra fuente de sulfato, al clinker, para hacer que el aluminato sea menos reactivo durante la hidratación, y luego la mezcla se somete a molienda para producir un polvo fino.

En el clinker, además de los cuatro minerales fundamentales, citados previamente (que constituyen entre el 96% - 97%), presentan otras fases en menor porcentaje (3% - 4% en peso) que son descritos por Kurdowski (2014), Hewlett (2004), Sánchez y Herrero (2017): Estas fases minoritarias son la cal libre CaO (1,5%), la periclase MgO (1,5%), compuestos sulfatados (< 1%): Na_2SO_4 , K_2SO_4 , ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2 \text{CaSO}_4$).

2.1.3 Hidratación del cemento

El concreto, es una mezcla formada por cemento, agua, arena y agregados calcáreos, con aditivos que pueden mejorar su performance. El cemento es un material aglomerante que sirve para unir la arena y agregados juntos. Diferentes resistencias de concreto se obtienen al cambiar las proporciones de componentes antes mencionados. Las aplicaciones especiales del concreto pueden añadir otros materiales, llamados plastificantes, que alteran las características del concreto. La hidratación del cemento se obtiene, cuando un cemento anhidro, se mezcla con agua. El Yeso, es un material que contiene sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), este es mezclado con el Cemento Portland para ayudar a controlar la tasa de fijación y endurecimiento inicial, además de aumentar la resistencia a la tracción y a la compresión del cemento. aunque sólo se añade en pequeñas proporciones (0-5%). Las reacciones involucradas en la hidratación del cemento son más complejas que una simple conversión de compuestos anhidros en sus

respectivos hidratos, considerando que la hidratación completa necesita mayor tiempo. Las reacciones químicas del cemento son entonces escritas y vistas como sumas de su composición de óxidos. Dayaram (2010).

Las reacciones del cemento Portland con el agua generan reacciones químicas exotérmicas complejas y envolventes que tienen lugar durante la fabricación y el endurecimiento del cemento Portland, pero en general se pueden dividir en dos fases principales: la hidratación y la carbonatación.

Con relación a la hidratación e hidrólisis entre los componentes del Clinker, el sulfato de calcio (regulador del fraguado) produciendo una pasta inicialmente plástica y trabajable que con el tiempo fragua y endurece; produciendo un gel C-S-H y portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), entre otros productos (Sánchez y Herrero, 2017).

De acuerdo con las velocidades de hidratación del cemento de las diferentes fases o minerales del Clinker se puede ordenar de la siguiente forma:



De todas las fases, el C3A presenta mayor reactividad frente al agua, y la que tiene mayor influencia sobre la hidratación del cemento a primeras edades; esta reacción es muy exotérmica. Esta fase genera el fraguado inicial debido a la elevada velocidad de reacción, produciendo las siguientes sustancias hidratadas: C4AH19, C4AH13, C3AH6 y C2AH8.



Teniendo en cuenta las consideraciones indicadas anteriormente, las reacciones de hidratación de la alita (C3S) y la velita (C2S) que son las fases más importantes del clinker son las siguientes:





2.1.4 Cambio Climático y Sostenibilidad del Cemento

Una de las principales preocupaciones ambientales de naturaleza global, es como lograr una economía resiliente de baja huella de carbono y basados en estas necesidades de mitigación y abordar los problemas de cambio climático, en el ámbito de la industria del cemento, se han desplegado diversos esfuerzos significativos por su trabajo continuo durante varias décadas por la Federación Interamericana del Cemento. Esta organización, ha tomado en cuenta los objetivos globales para la sostenibilidad (ODS), los desafíos propuestos por el acuerdo de París (COP21) y las iniciativas relacionadas con la sostenibilidad de la industria del cemento (CSI). Estas organizaciones han desarrollado una Hoja de Ruta CO₂ (FICEM, 2017), que busca impulsar la sustentabilidad del sector en Latinoamérica. A continuación, se presentan algunos temas y conceptos del documento, relacionados con los objetivos propuestos en el presente estudio.

2.1.4.1 Marco Internacional para Abordar el Cambio Climático. El Marco Internacional para abordar el cambio climático es un acuerdo internacional para combatirlo. Fue adoptado en la conferencia de las partes de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21) en París en diciembre de 2015.

El objetivo principal del Acuerdo de París es mantener el aumento de la temperatura global por debajo de 2 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales y esforzarse por limitar el aumento a 1,5 grados Celsius.

Los países que han ratificado el Acuerdo de París están comprometidos a presentar y actualizar periódicamente sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC), que son sus planes nacionales para abordar el cambio climático. También se comprometen a informar sobre su progreso en la implementación de sus NDC y a participar en un sistema de revisión mutua.

El Acuerdo de París es un paso importante para abordar el cambio climático a nivel global, pero su éxito depende de la acción real y concreta de todas las partes involucradas. Es necesario que todos los países, incluidas las economías emergentes y los países en desarrollo, se unan para abordar este desafío y lograr un futuro más seguro y sostenible para todos.

Según refiere Bali (2007), la Conferencia de las Partes COP 3 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se llevó a cabo en Kioto, Japón, en diciembre de 1997. En la COP 3, los países miembros acordaron adoptar un Protocolo de Kioto para abordar el cambio climático. El Protocolo de Kioto estableció objetivos vinculantes para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para los países industrializados. Estos objetivos incluyen la reducción del 5,2% en promedio de las emisiones de GEI respecto a los niveles de 1990 durante el período de compromiso de 2008-2012.

El Protocolo de Kioto también estableció un mecanismo de mercado, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que permite a los países cumplir con sus objetivos de reducción de emisiones mediante la compra y venta de permisos de emisión.

El Protocolo de Kioto fue ratificado por el número necesario de países para entrar en vigor en febrero de 2005. Aunque ha sido ampliamente elogiado como un paso importante hacia el abordaje del cambio climático, también ha sido objeto de críticas por no incluir objetivos vinculantes para los países en desarrollo y por no incluir objetivos más ambiciosos para la reducción de las emisiones.

En 2015, los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático adoptaron un acuerdo para suceder al Protocolo de Kioto, conocido como el Acuerdo de París. El Acuerdo de París incluye objetivos vinculantes para todos los países, incluidos los países en desarrollo, y se espera que tenga un impacto más significativo en la lucha contra el cambio climático.

Los resultados de la COP de París entraron en vigor el 4 de noviembre de 2016, han sido ratificados por más de 100 naciones y cubren aproximadamente el 80% emisiones de GEI. El acuerdo de la ONU es jurídicamente vinculante y tiene como objetivo comprometer a las naciones a reducir el calentamiento global, manteniendo la temperatura media por debajo de los 2 °C para 2050 en comparación con los niveles preindustriales. Esto requiere una reducción significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero proyectadas. Lo anteriormente expuesto se refleja en instrumentos internacionales denominados INDC (Contribuciones Previstas y Confirmadas Nacionalmente), que entrarán en vigencia en 2020 y serán revisados cada cinco años a través de un mecanismo simple y transparente de supervisión del cumplimiento. Además, se pueden utilizar mecanismos de mercado, relacionados con la compra y venta de bonos de emisiones, para alcanzar la meta.

2.1.4.2 Instrumentos para la Mitigación y Adaptación al Cambio Climático. Hay dos tipos principales de instrumentos para abordar el cambio climático: la mitigación y la adaptación.

Instrumentos de mitigación. Estos se enfocan en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar la eficiencia energética para prevenir el cambio climático. Algunos ejemplos incluyen: 1) Políticas de energías renovables: fomentar el uso de energías renovables, como la energía solar, eólica y geotérmica, para reducir la dependencia de los combustibles fósiles. 2) Eficiencia energética: mejorar la eficiencia energética en la industria, el transporte y la construcción para reducir el consumo de energía y las emisiones de GEI. 3) Comercio de emisiones: establecer un sistema de comercio de emisiones para permitir a las empresas comprar y vender permisos de emisión de GEI y reducir las emisiones de manera económica. 4) Carbono y secuestro: investigar y desarrollar tecnologías para la captura y el almacenamiento de carbono para reducir las emisiones de GEI.

Instrumentos de adaptación. Estos se enfocan en ayudar a las comunidades a prepararse y adaptarse a los efectos del cambio climático. Algunos ejemplos incluyen: 1)

Protección costera: desarrollar estrategias de protección costera, como la construcción de diques y la restauración de humedales, para proteger a las comunidades costeras de las inundaciones y la erosión. 2) Agricultura: mejorar la resiliencia de la agricultura frente a las sequías, las heladas y otros desastres climáticos mediante la investigación y el desarrollo de nuevas prácticas agrícolas y tecnologías. 3) Gestión de riesgos de desastres: mejorar la capacidad de las comunidades para responder a los desastres climáticos, como las tormentas, las inundaciones y los incendios forestales, mediante la planificación, la preparación y la coordinación. 4) Desarrollo urbano: planificar el desarrollo urbano de manera sostenible y adaptarse a los desafíos del cambio climático, como el calentamiento urbano, la gestión de la lluvia y la protección de los recursos hídricos.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de los muchos instrumentos disponibles para abordar el cambio climático. Es importante utilizarlos de manera efectiva y coordinada para lograr un futuro más seguro y sostenible. Entre los instrumentos más importantes se tiene.

Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC). Las Contribuciones Nacionalmente Determinadas son compromisos voluntarios de acción climática que los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático han presentado con el objetivo de combatir el cambio climático al año 2030. Las NDC incluyen medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la resiliencia y la adaptación al cambio climático, y fomentar la transición hacia una economía baja en carbono.

Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL). Son Mecanismo de Desarrollo Limpio, que permite a los países en desarrollo generar y vender créditos de carbono a los países industrializados, y el Fondo Verde para el Clima, que financia proyectos climáticos en los países en desarrollo.

El objetivo de los MDL es ayudar a los países en desarrollo a alcanzar un desarrollo sostenible mientras reducen sus emisiones de gases de efecto invernadero. Al mismo tiempo,

los países industrializados pueden cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones y ayudar a los países en desarrollo a alcanzar sus objetivos de desarrollo sostenible.

Es sustancial destacar que los MDL son mecanismos complementarios a las políticas nacionales de cambio climático y no deben ser vistos como una solución única o suficiente para abordar el cambio climático. También es necesario asegurar de que los MDL se implementen de modo eficiente y transparente para garantizar su impacto positivo y evitar posibles impactos negativos en las comunidades locales y en el medio ambiente.

Acciones de Mitigación Apropriadas a cada País (NAMAs). Son planes de acción climática voluntarios y de carácter nacional presentados por los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático con el objetivo de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero.

Las NAMAs están diseñadas para ser convenientes para cada país, teniendo en cuenta su nivel de desarrollo, sus capacidades y su potencial de mitigación. Cada una de las NAMAs incluyen una descripción detallada de las acciones y estrategias que un país plantea llevar a cabo para reducir sus emisiones GEI, así como una estimación de sus impactos y costos.

Las NAMAs son un elemento clave de la estrategia de la UNFCCC para combatir el cambio climático y apoyar el desarrollo sostenible. Los países que presentan NAMAs se comprometen a implementar sus acciones de mitigación y a monitorear y reportar regularmente sus progresos.

Asociaciones de tecnologías bajas en carbono (LCTPi) Las Asociaciones de Tecnologías Bajas en Carbono son iniciativas internacionales que tienen como objetivo apoyar el desarrollo y la difusión de tecnologías bajas en carbono en los países en desarrollo.

Las LCTPi se enfocan en áreas específicas de la economía, como la energía, la agricultura, la industria y la construcción, y buscan aumentar la eficiencia energética y reducir

las emisiones de gases de efecto invernadero a través del desarrollo y la implementación de tecnologías más sostenibles.

Las LCTPi trabajan en estrecha colaboración con los países en desarrollo, los organismos internacionales, las empresas y la sociedad civil para identificar y abordar las barreras al desarrollo y la difusión de tecnologías bajas en carbono. También brindan apoyo técnico, financiero y de capacitación a los países en desarrollo para mejorar sus capacidades en materia de tecnologías bajas en carbono y promover su uso a nivel nacional.

(LCTPi) – Cemento. Las Asociaciones de Tecnologías Bajas en Carbono (LCTPi) han determinado que la industria del cemento es una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero. El proceso de fabricación de cemento utiliza consume ingentes cantidades de combustibles-energía y emite grandes cantidades de dióxido de carbono, lo que lo convierte en un sector estratégico para la mitigación del cambio climático. Las LCTPi pueden trabajar con la industria del cemento para identificar y desarrollar tecnologías más eficientes en términos de reducción de carbono y para fomentar su adopción a nivel nacional e internacional.

Además, las LCTPi pueden brindar apoyo financiero y técnico a las empresas para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el proceso de fabricación de cemento. También pueden trabajar con los reguladores nacionales para establecer políticas y normativas que fomenten la adopción de tecnologías más sostenibles y reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector.

En resumen, las LCTPi pueden desempeñar un papel clave en la mitigación del cambio climático en la industria del cemento al fomentar el desarrollo y la difusión de tecnologías bajas en carbono y mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad del sector.

Las metas propuestas para desarrollar estrategias de mitigación en la industria cementera será reducir las emisiones de CO₂eq entre el 20% y 25% proyectados al año 2030, y que según las iniciativas de Cement Sustainability Initiative, se logrará a partir de la

implementación de las siguientes acciones: 1) Aumentar la cobertura de la base de datos de CO₂eq y energía del sector, centrándose específicamente en China (que representa alrededor del 60% de la producción mundial de cemento). 2) Innovar la matriz energética de la fabricación del cemento, basado en el uso de energías limpias. 3) Gestionar de modo eficiente los combustibles sobrantes de otras industrias, dentro del enfoque de la economía circular. 4) Reducir y optimizar la composición del clinker del cemento con el fin de racionalizar el consumo de energía. 5) Desarrollar investigaciones para la formulación de cementos más sostenibles con relación al consumo energético. 6) Desarrollar investigaciones sobre el ciclo de vida los edificios e infraestructuras con el fin de reciclar productos del concreto usado. 7) Desarrollar investigaciones de naturaleza intersectorial, con el fin de proponer alternativas de captura de CO₂ a gran escala.

Evaluar iniciativas intersectoriales, en particular sobre la oportunidad de capturar, usar y almacenar carbono a gran escala.

Avances sobre el cambio climático en el Perú. Se debe considerar que el país es vulnerable al cambio climático, en consecuencia, existe por un lado la necesidad de implementar estrategias de desarrollo nacional y resiliente, que faciliten entender el manejo de la gestión de riesgos en contextos de cambio climático. Por otro lado, urge implementar estrategias de desarrollo nacional considerando las preocupaciones cada vez más demandantes de reducir las emisiones en carbono. En este sentido a nivel nacional se han generado los siguientes instrumentos (MINAM, 2016):

Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC). Es un plan gubernamental para abordar los desafíos del cambio climático en un país. La ENCC define un conjunto de objetivos y acciones para mitigar y adaptarse a los impactos del cambio climático, así como para fomentar una transición justa y equitativa a una economía baja en carbono.

La ENCC se basa en una evaluación exhaustiva de las emisiones de gases de efecto invernadero y de los riesgos climáticos a los que está expuesto el Perú. A partir de esta evaluación, la ENCC define un conjunto de objetivos a corto, mediano y largo plazo para proponer lineamientos en los tres niveles de gobierno.

Plan Nacional de Adaptación (NAP). Es una iniciativa gubernamental que tiene como objetivo abordar los desafíos que plantea el cambio climático en el Perú. Este plan se centra en identificar y evaluar los impactos del cambio climático en diferentes sectores, como la agricultura, la salud pública, la infraestructura, entre otros, y desarrollar estrategias eficaces para mitigar y adaptarse a ellos.

El NAP suele ser un documento detallado y actualizado periódicamente que contiene información sobre los riesgos asociados con el cambio climático, las medidas que se están tomando para abordarlos y los objetivos a largo plazo para una adaptación sostenible. También puede incluir un plan de acción con un cronograma y un presupuesto para llevar a cabo las medidas necesarias. En resumen, el Plan Nacional de Adaptación es una herramienta esencial para garantizar que un país esté preparado y tenga la capacidad de responder a los impactos del cambio climático de manera efectiva y sostenible.

En el Perú el NAP, se proyecta interactuar con una visión intersectorial que facilite un enfoque transversal para la planificación e inversión en las acciones de adaptación al cambio climático.

Medidas Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMAs). El Perú viene promoviendo el desarrollo de NAMAs en diferentes sectores. A continuación, se muestran algunos de los instrumentos que cuentan con apoyo internacional para su diseño: 1) Transporte (MTC): uso de tecnologías emergentes para su optimización. 2) Bioenergía, residuos sólidos (MINAM): uso de tecnologías para su procesamiento. 3) Energía (MINEM): Desarrollo de energías renovables. 4) (MINEM): Buenas prácticas en el uso de residuos agroindustriales y agrícolas

para generar energía. 5) Agricultura (MINAGRI): promover los 4 NAMAS: Cacao, Café, Ganadería y Palma Aceitera. 6) Construcción sostenible (MVCS): El NAMA de Construcción Sostenible con visión de ciudad está enfocado en diseñar y construir nuevas edificaciones que permitan optimizar el uso del agua y energía (eficiencia hídrica y energética). Industria (PRODUCE): Innovar en el diseño y construcción de edificaciones con otros materiales más eficientes que consuman menos energía.

Disminución de Emisiones de CO₂ a lo largo de la Cadena de Valor. Se debe tener en cuenta que las industria relacionadas a la construcción, incluyen varios stakerholders, entre los que cuentan los productores de concreto, productores de grava, oficinas de ingeniería, compañías de construcción, compañías de demolición, etc.) y la presión para la reducción de CO₂, se ha mantenido principalmente en el campo de los productores de cemento.

En consecuencia, es importante considerar las diferentes etapas de la cadena de valor y calcular el potencial de ahorro de CO₂ correspondiente. En ese sentido, se pueden identificar las siguientes estrategias con el propósito de reducir las emisiones de CO₂ en la industria del concreto (Favier y otros, 2018):

Nivel Clinker: Implementar programas de innovación con el fin de reducir las emisiones de CO₂ de la producción de clínker generando menor gasto energético en las plantas de cemento. Esta estrategia incluye mejorar la eficiencia térmica de los hornos y aumentar el consumo de combustibles alternativos.

Nivel Cemento: Reducir las emisiones de CO₂ del concreto al reducir la cantidad cemento. Esta estrategia analiza las formulaciones de las mezclas de concreto y el contenido porcentual de la fase aglutinante, cantidad y calidad de los agregados.

Nivel Concreto: Reducir las emisiones de CO₂ del concreto al reducir la cantidad cemento. Esta estrategia analiza las formulaciones de las mezclas de concreto y el contenido porcentual de la fase aglutinante, cantidad y calidad de los agregados.

Nivel Estructural: Reducir las emisiones de CO₂ de las estructuras adecuando la formulación de las mezclas de concreto y la forma aplicación final. Se tienen en cuenta dos aspectos, es decir, reducir la masa de concreto para fabricar un elemento estructural o un edificio residencial estándar en primer lugar y reducir la masa de concreto si la forma de un elemento está optimizada para cumplir con los mismos requisitos de carga estructural.

Nivel Reciclaje o Economía Circular: La filosofía de economía circular está relacionada con la optimización de la calidad de los recursos, teniendo en cuenta el ciclo de vida de la cuna a la tumba de las edificaciones, desde su planificación inicial y la fabricación de productos de construcción hasta la demolición final y el tratamiento y eliminación de residuos. Mejorar la calidad de los recursos a lo largo del ciclo de vida de edificios haciendo al sector de la construcción ser más competitivo y reducirá el empleo de materiales y el impacto ambiental asociado con nuestro entorno construido, debe considerarse los siguientes tipos de reciclaje.

Reciclaje de hormigón: El hormigón reciclado puede reutilizarse como agregados; la calidad varía mucho según el origen y el tratamiento. Los agregados reciclados a menudo tienen menor resistencia intrínseca que los agregados vírgenes. A menudo es necesario aumentar una cantidad de cemento en el concreto nuevo para lograr la misma resistencia que un concreto con agregados naturales.

Reciclaje de Elementos: El reciclaje de concreto después de la construcción implica, no solo de ser reciclado en agregados sino también sobre la reutilización de ciertos elementos en su forma original.

Todas estas estrategias se pueden combinar, para que el resultado final sea brindar el mismo nivel de servicios a la sociedad, pero con mucho menos emisiones de CO₂.

2.1.5 El proceso de carbonatación del Concreto

La carbonatación del concreto es un proceso en el que el dióxido de carbono penetra en el concreto y reacciona con el hidróxido de calcio para formar carbonato de calcio, reduciendo

de esa forma la concentración de iones hidróxido y reduciendo la capacidad de neutralización del concreto. Esto puede provocar un aumento en la acidez del ambiente interno del concreto y una disminución en la resistencia a la compresión y la durabilidad de este.

La carbonatación es un proceso natural que ocurre en el concreto con el tiempo y es acelerada por factores como la humedad, la temperatura y la presencia de dióxido de carbono. La carbonatación es especialmente problemática en estructuras expuestas a una atmósfera húmeda y contaminada, como puentes y edificios.

Para prevenir la carbonatación, es importante utilizar materiales de alta calidad y técnicas adecuadas en la fabricación del concreto, así como mantener un buen control de la humedad y la temperatura en la estructura. Además, se pueden aplicar revestimientos protectores y tratamientos de superficie para ayudar a retrasar el proceso de carbonatación y prolongar la vida útil del concreto.

La fabricación de morteros y concretos implica la formulación de un blend de cemento, con agua y áridos rocosos de diferentes orígenes, dimensiones y composición. En el caso de los morteros, estos se fabrican con áridos finos, tal como la arena, en tanto que, el concreto requiere, de arena y piedra chancada. Ambos materiales se someten a un tratamiento de homogenización de los constituyentes, las cuales fraguan lenta y progresivamente, conforme se produce el proceso de hidratación de las fases del cemento.

La durabilidad de las estructuras de concreto armado se consigue debido al doble efecto protector que tiene el concreto sobre el acero. Por un lado, el recubrimiento de concreto es una barrera física que reduce la interface de contacto con sustancias agresivas externas, y por otro lado, la alta alcalinidad del concreto forma una capa de pasivación sobre el acero, que en estas condiciones lo dejan intacto. El concreto es un material compacto, denso y a la vez poroso. Una red de poros consiste en una red de pequeños tubos y capilares de diferentes tamaños que no siempre están conectados entre sí. A pesar de que la cubierta de armadura es una barrera

física, la porosidad del hormigón permite cierta penetración de líquidos y gases y elementos posiblemente agresivos para llegar al acero (Galán, 2011, pp. 2-3)

La carbonatación es el principal proceso de la reducción de la durabilidad del concreto en atmosferas urbanas, rurales o mixtas, libres de otros agentes agresivos como el ion cloruro.

La acción constante de la atmósfera sobre las estructuras de concreto favorece el fenómeno de la carbonatación de las estructuras de concreto. El CO_2 atmosférico reacciona con compuestos alcalinos contenidos en el cemento para formar carbonatos. Como resultado, la alcalinidad inicial del hormigón se reduce y, por lo tanto, también se reduce la protección química que el hormigón ejerce sobre las barras de acero de la estructura. Los estudios sobre la química de la corrosión del concreto generalmente se basan en el supuesto de que el ambiente es aire y que no existe reacciones significativas con ninguno de los componentes del cemento hidratado. Pero en realidad, el aire atmosférico contiene cantidades significativas dióxido de carbono, que reacciona con los hidratos de cemento en presencia de humedad formando carbonatos que involucran contracciones del material de construcción. En general, todos los componentes del cemento Portland hidratado son susceptibles a la carbonatación (Hernández, 2016, pp. 54-55).

2.1.6 Mecanismo de Carbonatación

Se debe considerar que, durante la hidratación, el cemento forma dos productos principales: hidróxido de calcio (CH) e hidrosilicato de calcio (CSH).

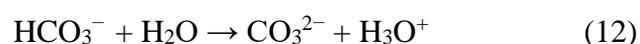
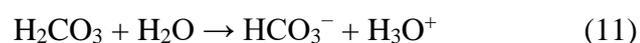
La carbonatación se refiere a la reacción de los productos de hidratación (principalmente CH y CSH) (producidos en los poros que contenían agua, con el CO_2 de la atmosfera). En el caso de los materiales con base al cemento hidratado, la carbonatación ocurre cuando están expuestos al CO_2 atmosférico o al CO_2 disuelto en agua como ácido carbónico. El CH y la CSH son las principales fases atacadas por el CO_2 durante la carbonatación (8) y (9), respectivamente (Galán, 2011), (Mwiti et al., 2019).

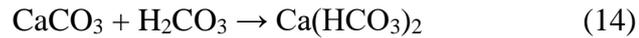


La ecuación (8) representa una carbonatación moderada que ocurre en la capa superficial de los materiales a base de cemento y que conducen a la formación de carbonato de calcio (CaCO_3). Además, se observa que el CaCO_3 formado se incrusta dentro de la red de poros en la matriz de cemento hidratado dando como resultado el refinamiento de los poros de la capa carbonatada. Esto es beneficioso ya que el refinamiento de los poros resulta en una mayor resistencia, menor porosidad y una mayor durabilidad del cemento hidratado.

Por el contrario, de acuerdo con la ecuación (9), el ingreso excesivo de CO_2 ataca a la CSH, lo que resulta en su desintegración y posterior pérdida de resistencia en las estructuras a base de cemento. Además, durante la carbonatación, se consume iones OH^- presente en CH, lo que produce una disminución del pH de la solución dentro de la red porosa. En el concreto armado, la reducción del valor del pH produce la corrosión de la capa protectora de la superficie pasiva alrededor del refuerzo de acero, resultando en corrosión de las barras de refuerzo. En áreas con alta concentración de CO_2 disuelto, los efectos de la carbonatación son más perjudiciales ya que el agua carbónica es más ácida en el agua de mar, que en el agua dulce. Esto puede agravarse por la descomposición de materia orgánica que incrementa la concentración del CO_2 .

Las reacciones químicas relacionadas con la carbonatación conducen a degradación de los materiales a base de cemento debido al CO_2 disuelto, se presentan en las siguientes ecuaciones, (Ghahari et al., 2016), (Mwiti et al., 2019).





La ecuación (10) muestra la formación de ácido carbónico (H_2CO_3) por la reacción del CO_2 disuelto dentro del concreto en proceso de corrosión. Basado en las ecuaciones (11) y (12), el H_3O^+ produce como resultado una reducción significativa del pH de la solución porosa en la matriz de cemento hidratado. La reducción de la alcalinidad en solución porosa es perjudicial, ya que da como resultado la corrosión inducida por carbonatación de las barras de refuerzo por la disolución de la capa superficial pasiva, lo que conduce a la oxidación del hierro usado. Además, la ecuación (14) muestra que una penetración significativa de CO_2 resulta en la conversión de CaCO_3 insoluble en bicarbonato de calcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ soluble que se lixivia fácilmente, disminuyendo así la porosidad del cemento hidratado.

Otros investigadores, formulan ecuaciones equivalentes para las reacciones químicas relacionadas con la carbonatación, otros investigadores formulan otras ecuaciones más complejas como las indicadas en Peter (2016) y Ye (2019).

2.1.7 Modelamiento de la Carbonatación del Concreto

Existen varias investigaciones para establecer diversos modelos de carbonatación, que describen los cambios en el tiempo, tomando en cuenta las diferentes variables y factores que intervienen e impactan en el desarrollo de carbonatación.

El investigador Galan (2011) nos indica, que para predecir la “profundidad de la carbonatación” en el concreto, los modelos están basados en soluciones matemáticas de la ecuación de difusión de la ley de Fick (15).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial x} \right), \quad (15)$$

Donde:

Φ = concentración de CO_2 .

D = coeficiente de difusión.

t = tiempo.

x = profundidad de penetración del CO_2 .

Se debe tener presente que el gradiente de concentración del dióxido de carbono entre el concreto y el ambiente atmosférico es una fuerza impulsora para la penetración de CO_2 en los poros capilares del concreto (Visser, 2012).

Al mismo tiempo, estableciendo diversos supuestos y simplificaciones, podemos definir diferentes ecuaciones para calcular la profundidad de carbonatación, que por ejemplo se pueden apreciar en los trabajos de Galán (2011), Czarnecki - Woyciechowski (2015) y Le Tang (2018)

Según lo anterior, en el modelado matemático de la carbonatación, un aspecto clave es determinar la absorción del dióxido de carbono a través del concreto en el espacio unidimensional, en base a primera ley de Fick, se describe en:

$$Q = -D \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad (16)$$

Donde:

Q = es el flujo, es decir, la cantidad de material que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo ($\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$). El signo negativo sugiere una disminución lineal en la tasa de penetración de CO_2 sobre la profundidad de carbonatación.

D = coeficiente de difusión (m^2/s).

φ = concentración de la sustancia difusora (mol/m^3).

x = profundidad de difusión (m).

La primera ley de Fick permite describir el proceso de difusión bajo una densidad constante, inmutable en el tiempo, del flujo de difusión. Sin embargo, para los casos donde densidad del flujo de difusión varía con el tiempo, el proceso de difusión se describe en la segunda ley de Fick, de la siguiente manera:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = D \cdot F_D \frac{\Delta \varphi}{x} = D \cdot F_D \frac{\varphi_{ext} - \varphi_f}{x}, \quad (17)$$

Donde:

Q, D, φ, x definidos anteriormente.

t = tiempo (s).

F_D = superficie de difusión (m²)

$\frac{\Delta\varphi}{x}$ = gradiente de concentración.

φ_{ext} = concentración de CO₂ en el aire.

φ_f = concentración de CO₂ en el concreto.

La cantidad CO₂ en el concreto que reacciona con el hidróxido de calcio Ca(OH)₂ puede ser muy pequeña. Por lo tanto, simplificando se puede suponer que φ_f es 0 y luego la ecuación (17) toma la siguiente forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{D \cdot F_D \cdot \varphi_{ext}}{x}, \quad (18)$$

Asumiendo que el dióxido de carbono difundido se usará completamente para la carbonatación, entonces el flujo de difusión ∂Q a través de un volumen dado de concreto es igual a la cantidad potencial máxima de dióxido de carbono que puede confinarse debido a la carbonatación en este volumen de concreto:

$$\partial Q = a \cdot F_D \partial x, \quad (19)$$

Donde:

a = coeficiente que determina la masa de CO₂ absorbido en la forma de carbonatación por unidad de volumen de concreto (kg / m³).

Sustituyendo la ecuación (19) en (18) e integrando sobre ∂x se obtiene un modelo básico de carbonatación y la mayoría de los investigadores utilizan este modelo que determina la profundidad de carbonatación (x) después del periodo de exposición (t) en la concentración de CO₂ igual a φ_{ext} :

$$x = \sqrt{\frac{2D\varphi_{ext}}{a}} \cdot \sqrt{t}, \quad (20)$$

En la práctica, el modelo más utilizado se simplifica enormemente, y está relacionado con ciertos parámetros que afectan la carbonatación, como por ejemplo el promedio constante de la humedad relativa y del contenido de dióxido de carbono en el medio ambiente. La ecuación simplificada se puede expresar en la siguiente forma:

$$x = k t^{1/2}, \quad (21)$$

Donde:

x = profundidad de penetración del agresivo CO₂ (mm).

k = “velocidad” de avance del CO₂ (mm/año^{1/2}).

t = tiempo (año).

Por otro lado, a menudo también se utiliza la siguiente fórmula:

$$x = \sqrt{\frac{2D_t[CO_2]}{[C_a(OH)_2]}}, \quad (22)$$

Donde:

[CO₂] y [Ca(OH)₂] = concentración molar de dióxido de carbono y concentración de hidróxido de calcio.

D = coeficiente de difusión

t = tiempo de exposición

En los trabajos de (Peter, 2016) y (Ghantous, 2016) se describe una ecuación adicional para calcular la profundidad de carbonatación:

$$x_c = \frac{\sqrt{2 \cdot D_{CO_2} \cdot P_{CO_2} \cdot t}}{QRT}, \quad (23)$$

Donde:

X_c = profundidad de carbonatación en concreto (m).

D_{CO_2} = coeficiente de difusión de CO_2 en zonas carbonatadas (m^2/s).

P_{CO_2} = presión parcial del CO_2 en superficie de concreto (Pa).

t = tiempo (s).

Q = concentración molar del material carbonatable en concreto (mol/m^3).

R = constante universal de gases (J/mol/K).

T = temperatura absoluta del sistema (K).

Los modelos descritos en las ecuaciones 20, 21, 22 y 23 tratan el fenómeno de la carbonatación como ilimitado en concreto que está expuesto a un ambiente que contiene dióxido de carbono e ilimitado en el tiempo. La finalización de carbonatación se relaciona solo con el agotamiento de reactivos disponibles en el sistema, incluyendo principalmente hidróxido de calcio y en el horizonte posterior otros hidratos. Sin embargo, una cuestión importante es la accesibilidad del dióxido de carbono en el sistema, especialmente en las zonas más profundas de concreto.

El proceso de difusión de CO_2 resultante de la diferencia de concentración en el camino desde la superficie hacia el concreto depende no solo del gradiente de concentración y microestructura del concreto. Los modelos basados en las leyes de Fick suponen que el medio en el que tiene lugar la difusión no cambia con el tiempo, permitiendo la recepción de un flujo de difusión constante (ecuación 16). Esta es una simplificación significativa de la descripción del proceso de carbonatación, que no considera una serie de factores adicionales, como los cambios en la difusividad en función de la humedad, los cambios en las concentraciones atmosféricas de CO_2 por año, la participación en la carbonatación de la fase CSH y los residuos del cemento no hidratado, las características cualitativas y cuantitativas de la composición del material de concreto (a/c, tipo de cemento, aditivos, ingredientes), factores tecnológicos y ambientales (curado, temperatura, estado de tensión) y, en primer lugar los cambios de difusividad resultantes de los cambios en el tiempo de la microestructura del concreto.

Uno de los últimos efectos, resultado de la saturación de los poros con productos de carbonatación, limita la posibilidad de una descripción directa de un proceso basado en la ley de Fick. Por otro lado, el resultado de la carbonatación es una disminución de la porosidad, en particular la capilaridad que se produce además de la contracción de la carbonatación, lo que reduce la permeabilidad de concreto, por lo tanto, la posibilidad de difusión de gases en el mismo.

Adicionalmente en el trabajo realizado por Olumuyiwa (2017), se puede observar la forma en que se pueden realizar ajustes en las ecuaciones para considerar ciertas variables y factores que intervienen en el proceso de carbonatación. Un ejemplo de la aplicación de la ecuación 21, en la práctica asume las siguientes premisas: 1) La estructura de poros es uniforme en la profundidad de concreto y ambiente de exposición constante. 2) La estructura del poro se mantiene constante en toda la profundidad del concreto. 3) El nivel de hidratación y cantidad de hidróxido de calcio permanecen constantes en toda la profundidad del concreto.

Sin embargo, en realidad, los supuestos pueden no ser válidos ya que la reacción de carbonatación en sí misma influye en el tamaño de los poros, con la consecuente reducción del volumen de poros. El carbonato de calcio, que es el principal producto de la carbonatación, obstruye los poros de aire en concreto y causa una reducción en la difusividad que a su vez disminuye la tasa de carbonatación con el tiempo.

Por lo tanto, la profundidad de carbonatación se puede expresar generalmente como:

$$x = k \cdot t^n, \quad (24)$$

Donde:

n = valor del exponente de tiempo que varía con las propiedades del concreto (estructura de poros) y el entorno de exposición.

Por lo tanto, la aplicación de la ecuación de difusión de Fick, que usa parámetros constantes, es limitada a pesar de que muchos modelos de predicción de vida útil se han derivado obteniéndose $t^{1/2} = t^{0.5}$. El valor de n puede ser menor que 0.5 si el concreto está sujeto a ciclos de humedad y secado, ya que la difusión del dióxido de carbono es más lenta a través de los poros llenos de humedad. Por otro lado, el valor de n puede ser mayor que 0.5 en para concreto fisurado; La presencia de grietas proporciona una vía directa para el dióxido de carbono. Además, en concreto antiguo, la profundidad de carbonatación es a menudo menor de lo esperado, esto es contrario a la relación de la raíz cuadrada del tiempo. En climas controlados como el laboratorio, se pueden obtener resultados satisfactorios de la tasa de carbonatación utilizando $t^{0.5}$. Sin embargo, su correlación con la tasa de carbonatación real es a menudo débil y puede producir resultados engañosos, especialmente para la exposición al aire libre con condiciones cambiantes humedad y temperatura.

Para determinar el coeficiente de carbonatación (kc) de la ecuación de Fick se obtuvo a partir de la ecuación (25) donde la profundidad de carbonatación inicial (x_0) es calculado para el acondicionamiento del ambiente del laboratorio (Moreno 1999); donde t representa el tiempo de exposición acelerada y “x” es la profundidad de carbonatación en el tiempo “t”

$$kc = \sqrt{(x^2 - x_0^2)/t} \quad (25)$$

Para los cálculos del coeficiente de carbonatación de los especímenes para concentraciones distintas de CO₂ (C1, C2) se han tomado en cuenta la ecuación (26) donde se relaciona k1 y k2 para esas concentraciones (Moreno, E.I (1999)).

$$\frac{k_1}{k_2} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (26)$$

2.1.8 Capacidad de Absorción del Dióxido de Carbono

El proceso de carbonatación del concreto es un fenómeno que sucede en una superficie expuesta por la absorción de CO₂. Las estadísticas disponibles están en m³ de concreto o en toneladas de cemento consumidas en una calidad específica del concreto. Por lo tanto, el

cemento utilizado para una estructura específica o producto cementoso tienen que ser recalculado para la superficie expuesta. (Lagerblad, 2005), (Galan, y otros, 2010) y (Le Tang, 2018).

Los cálculos deben considerar que la absorción de CO₂ está en función del tiempo, tomando en cuenta la profundidad del concreto carbonatado. Si en la mezcla de concreto, se conoce la masa de concreto expuesto a la carbonatación y la cantidad de cemento en el concreto, se debe considerar que el 75% en peso del óxido de calcio (CaO) que está presente en el clínker original puede ser consumido por la carbonatación. Entonces, será posible calcular la cantidad de CO₂ absorbido mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Absorción de CO}_2 = a = 0.75 \cdot C \cdot \text{CaO} \cdot \alpha_H \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}}, \quad (27)$$

Donde:

a = CO₂ absorbido en la carbonatación por unidad de volumen de concreto (kg/m³).

0.75 = cantidad de CaO carbonatada.

C = cantidad de cemento por m³ de concreto (kg/m³).

CaO = cantidad de CaO en el cemento (% en peso).

α_H = grado de hidratación del cemento.

M_{CO_2} = masa molar del dióxido de carbono.

M_{CaO} = masa molar de óxido de calcio. Como lo presenta

Existen otros métodos para calcular la cantidad de CO₂ absorbida como la expresión que presenta la metodología avanzada de la norma técnica europea EN 16757 (Sanjuan, y otros, 2020).

$$\text{CO}_2 \text{ (absorbido)} = (k_{\text{CO}_2} \sqrt{t}/1000) \times \text{CO}_2 \text{ max} \times C \times GC \quad (28)$$

Donde:

CO₂ (absorbido) : cantidad de CO₂ absorbido en kg CO₂ /kg cemento

k_{CO_2} : coeficiente de carbonatación (mm/año^{0.5})

CO_2 max: cantidad máxima de CO_2 que absorbe, en kg de CO_2/kg cemento

CaO reactivo: kg de CaO/kg cemento x100

C: masa de cemento por m^3 de concreto en (kg/m^3)

GC: grado de carbonatación.

$$\text{CO}_2 \text{ max} = (\text{CaO reactivo} / 100) \times \text{Conglomerante} \times (M_{\text{CO}_2}/M_{\text{CaO}}) \quad (29)$$

Donde:

CaO reactivo: kg de CaO / kg de conglomerante x 100

Conglomerante: contenido de cemento (kg)

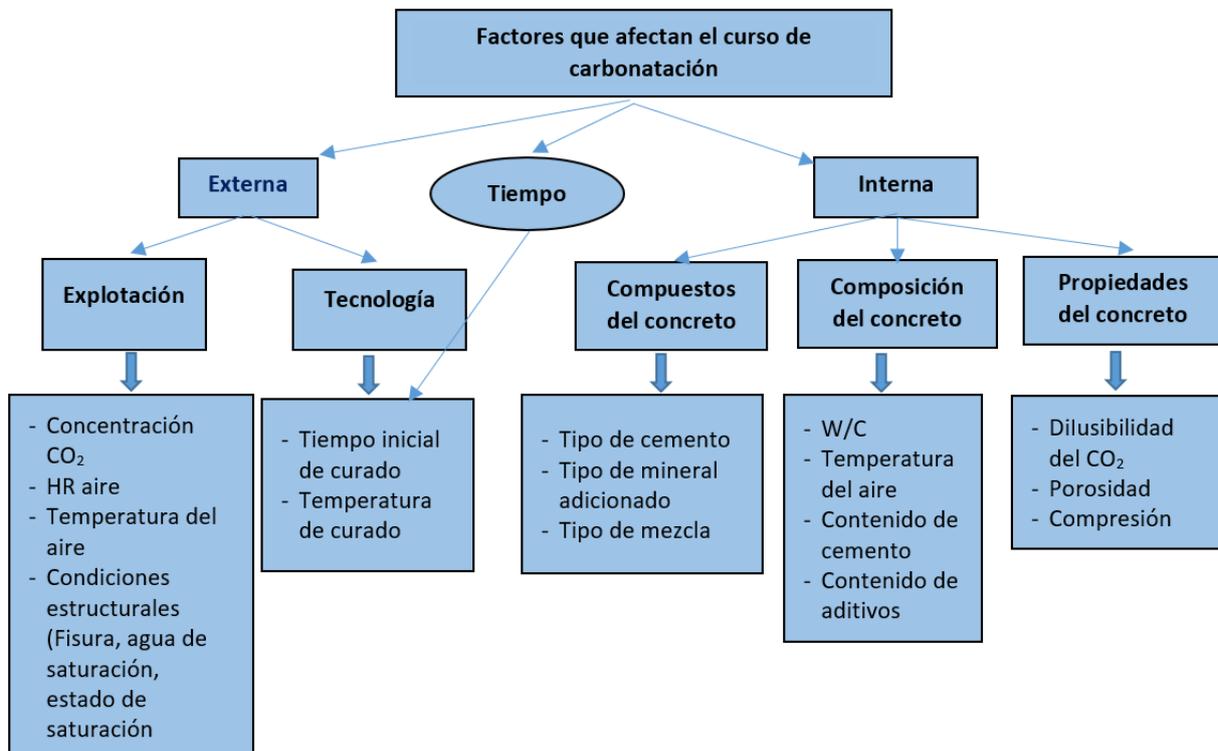
M_{CO_2} : 44 g/mol y M_{CaO} : 56 g/mol

2.1.9 Factores que Afectan la Carbonatación

Entre los factores que determinan el curso de la carbonatación se puede considerar factores externos e internos. La Figura 1 muestra la clasificación, considerando los factores externos; tecnológicos e internos (Czarnecki y Woyciechowski, 2015).

Figura 1

Clasificación de los factores que afectan la carbonatación



Nota. Tomado de Czarnecki y Woyciechowski (2015). .

Con relación a los factores externos, se destacan los factores ambientales; las condiciones de explotación del concreto como factores tecnológicos que dan forma a las propiedades del concreto durante su ejecución.

Los factores internos son los responsables del curso de la carbonatación. Entre estos factores más importantes se tiene a las propiedades de los componentes de concreto y sus proporciones, así como las propiedades del concreto endurecido. Ambos son el resultado de la composición, así como de las condiciones de ejecución del elemento. La clasificación propuesta no tiene limitaciones marcadas, dado que los factores individuales están fuertemente interrelacionados.

Se debe tener presente que la carbonatación de concreto es un proceso lento y por ende estos factores afectan su cinética. Considerando los trabajos desarrollados por Lagerblad (2005), Ghantous (2016), Tongaria et al. (2018) y Mwiti et al. (2019), se describen a continuación los siguientes factores:

2.1.10 Tipo de cemento

El concreto que incluye los cementos compuestos muestra una mayor profundidad de carbonatación que el concreto basado únicamente en el cemento Tipo I. Este resultado se relaciona con el hecho de que, en los cementos alternativos, el carbonato de calcio CaCO_3 se forma en cantidades más pequeñas, lo que facilita la progresión de carbonatación a través de la cubierta del concreto. Así como en cementos mezclados, las reacciones puzolánicas también consumen hidróxido de calcio Ca(OH)_2 . Como resultado, hay menos Ca(OH)_2 disponible y el porcentaje de carbonatación es mayor que en el cemento portland, que contiene una mayor cantidad de Ca(OH)_2 (Hidróxido de Calcio). Además, la menor disponibilidad de este hidróxido da como resultado más carbonatación en el hidrato de silicato de calcio (CSH). A

diferencia de la carbonatación con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la carbonatación de CSH no densifica la estructura de los poros.

2.2.9.1 Relación agua/cemento (a/c). Sin la presencia de grietas, el porcentaje de carbonatación se ve afectada por la relación agua/cemento. Cabe decir que, la carbonatación requiere que CO_2 penetre desde la superficie del hormigón hasta el refuerzo. La baja porosidad y la permeabilidad son factores principales que pueden inhibir la penetración de CO_2 . Otros estudios muestran que cuanto mayor es la relación a/c, mayor es la permeabilidad y la porosidad. De hecho, una alta relación agua/cemento conduce a una gran cantidad de agua evaporable. Una vez evaporados, los poros se vuelven accesibles para la difusión de CO_2 . Esto justifica el incremento de la cinética de carbonatación con el aumento de la relación agua/cemento. En el mismo contexto, una alta cantidad de cemento conduce a una pequeña profundidad de carbonatación, ya que reduce la porosidad del hormigón y aumenta su densidad, lo que reduce el acceso de CO_2 a los productos carbonatables.

En presencia de grietas, la relación w/c tiene un efecto insignificante. El CO_2 alcanza el refuerzo por medio de la grieta con una velocidad claramente mayor en comparación con su penetración desde la cubierta hasta el refuerzo en ausencia de grietas.

2.2.9.2 Porosidad. Los materiales de cemento altamente porosos permiten una mayor penetración de CO_2 , esto ocurre en materiales cementosos hidratados. La porosidad en combinación con factores como la HR (Humedad Relativa) tiene un impacto significativo en la difusión de CO_2 , es decir, los tamaños de poro. A una humedad relativa específica, cuanto más fino es el tamaño de poro, más fácil se produce la condensación capilar, por ende, la difusión de CO_2 será muy lenta ya que los poros se llenarán con agua condensada.

2.2.9.3 Tiempo de curado. Durante las primeras horas después de la fundición, el concreto puede ser sometido a desecación. Esto induce una falta de agua que se requiere para la hidratación completa del concreto. Entonces, aumenta la porosidad del hormigón y por consiguiente el porcentaje de carbonatación también aumenta. Entonces se necesita un tiempo mínimo de curado de concreto para obtener una madurez suficiente de concreto. Así es como la sensibilidad del concreto al secado se reduce. Además, se garantiza el agua requerida para la hidratación del cemento y desarrollo de la microestructura. Debe tenerse presente, que un concreto bien curado representa un alto rendimiento con relación a la durabilidad, entendida como resistencia a la penetración de agentes agresivos. El tiempo de curado del concreto, tiene relación positiva con la resistencia a la carbonatación.

2.2.9.4 Concentración de CO₂. El porcentaje de carbonatación depende de la concentración de CO₂ en el medio ambiente. En general, una alta concentración de CO₂ aumenta la velocidad de difusión de CO₂ y, por lo tanto, aumenta la velocidad de carbonatación. A mayores concentraciones de CO₂, suele incrementarse el contenido de agua en los poros como consecuencia de la alta velocidad de reacción y evolución del agua dentro de poros de concreto. Por lo tanto, si las muestras delgadas se consideran con HR (Humedad Relativa) óptima, la carbonatación a bajas concentraciones de CO₂ avanza a un ritmo más rápido que en altas concentraciones.

Cuando hay un aumento mínimo de las concentraciones atmosféricas de CO₂, las tasas de reacciones de carbonatación aumentan y esto tiene una gran influencia positiva en el aumento de resistencia de los materiales cementosos hidratados.

Por otro lado, la alta concentración de CO₂ demuestra su efecto beneficioso al acelerar el proceso de carbonatación en pruebas de laboratorio. Sin embargo, tiene un inconveniente importante que no debe olvidarse, se puede producir una falta de representatividad de carbonatación natural, debido al hecho de que, a una concentración más alta, el CO₂ induce

una fuerte descalcificación y polimerización en la cadena de silicato, lo que puede causar la desaparición de CSH y este no es el caso con concentraciones de CO_2 más bajas. Además, durante la reacción de carbonatación a una alta concentración de CO_2 , una capa impermeable de CaCO_3 rodea la portlandita. Por lo tanto, el CSH proporcionará más Ca que la portlandita, lo que induciría una fuerte descalcificación del CSH.

La solubilidad de los reactivos CSH, CO_2 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disminuye con el aumento de la temperatura. Además, varios estudios demuestran la existencia de una temperatura óptima de carbonatación por el aumento de esta, disminuye la solubilidad de los hidratos y, por lo tanto, la cinética de carbonatación disminuye. Asimismo, las propiedades de transporte del gas (CO_2) y difusión de iones (CO_3^{2-} , Ca^{2+}) aumentan con la temperatura por activación térmica y la evaporación del agua.

De la misma forma, la humedad relativa influye positivamente en el grado de carbonatación dado que la reacción no ocurre en un concreto completamente seco ni en uno saturado. De hecho, a baja HR, las reacciones químicas se inhiben por falta de agua, mientras que a alta HR, la difusión de CO_2 está limitada por los niveles de saturación de los poros del concreto. En este sentido, la HR determina la disponibilidad en el tiempo de humedad/agua en el cemento endurecido. El agua es esencial para la disolución de Ca^{2+} a partir de fases que contienen calcio tales como (CH), la hidratación de CO_2 para formar H_2CO_3 y, además, la solvatación de CO_2 gaseoso para formar CO_2 acuoso. En presencia de agua insuficiente, CO_2 y CH no se ionizan completamente. Por otro lado, en presencia de suficiente agua, genera la formación de poros que se llenan del sólido CaCO_3 en la red de poros de cemento hidratado ya que la difusividad del CO_2 es significativamente menor en soluciones acuosas que en el aire.

2.2.9.5 Efectos de Carbonatación en Cemento Hidratado La carbonatación cambia las características de concreto y puede tener efectos perjudiciales o beneficiosos. En este sentido, Savija y Lukovic (2016) establecen que la reacción de carbonatación puede ser clasificados como pasivos (porque ocurren espontáneamente cuando la pasta de cemento reacciona con CO_2) o activos (utilizar esta capacidad para lograr ciertos beneficios). De esta forma, un proceso de carbonatación pasiva es cuando la carbonatación provoca cambios no deseados y no planificados en la capa superficial de la estructura de concreto o un elemento cuando se expone al medio ambiente. Aunque la carbonatación pasiva a veces puede incluso resultar en la mejora de ciertas propiedades, generalmente se considera como un mecanismo de deterioro (o envejecimiento). Por otro lado, un proceso de carbonatación activa resulta de un procedimiento diseñado para aprovechar intencionalmente, la capacidad de las fases portadoras de calcio en la pasta de cemento a reaccionar con CO_2 para diferentes aplicaciones. La carbonatación activa supone una exposición controlada de materiales cementosos a concentraciones elevadas de CO_2 durante ciertos períodos de tiempo, lo que resulta en beneficios en términos de rendimiento mecánico o impacto ambiental del material. La Tabla 2 resume los efectos de la carbonatación en la pasta del cemento.

Tabla 2

Efectos de carbonatación en la pasta de cemento

Carbonatación de fases del cemento	
Pasiva (deterioro)	Activo (utilización)
Disminución del pH	Curado
Cambios de porosidad	Compuestos reforzados con fibra
Cambios mecánicos	Reciclaje del concreto
Agrietamiento	Inmovilización de residuos

Nota. Tomado de Savija y Lukovic (2016).

Con base a investigaciones de Savija y Lukovic (2016) y Mwit et al.(2019) se describen a continuación, algunos de los principales efectos:

Disminución del pH. Las reacciones de carbonatación que ocurre en los materiales cementosos producen el cambio en el pH las soluciones acuosas de los poros. Cabe destacar que el agua de los poros tiene una acción solvente sobre materiales cementosos. La disolución de Ca(OH)_2 y silicato de calcio hidratado (CSH) amortigua el pH de las disoluciones de los poros en equilibrio con los materiales cementosos a valores comprendidos entre 10.5 y 12.5.

La reacción del Ca(OH)_2 con el CO_2 durante la carbonatación disminuye significativamente la concentración Ca(OH)_2 en el agua de los poros, lo que conduce a la disminución del pH. Una superficie completamente carbonatada muestra un pH de aproximadamente 8. En concreto armado, la disminución del pH en el agua de los poros es perjudicial, ya que promueve la corrosión, con reducción de la vida útil de estructuras de las edificaciones basadas en el cemento.

Cambios de porosidad. Por las reacciones de carbonatación, la porosidad de los concretos y de la pasta de cemento puede cambiar. Así, por ejemplo, disminuye en pasta de cemento Portland o aumenta en pasta de cemento mezclado.

Los cambios de porosidad son causados por la disolución de las fases de cemento. La carbonatación de portlandita resulta en un aumento neto de volumen y precipitación de (CaCO_3) en la red de poros.

La precipitación de CaCO_3 tiene lugar preferentemente en poros más pequeños, debido a una mejor condensación del agua. Generando la disminución de los diámetros de los poros y puede conducir paso a paso a la obstrucción de los poros o pérdida de conectividad de los poros. Por otro lado, el crecimiento de la estructura de los poros puede estar asociado con la producción de gel de sílice adicional por la descomposición de CSH. Haciendo que las pastas de cemento mezclado contengan cantidades significativamente menores de portlandita, como consecuencia de las reacciones puzolánicas de las cenizas volantes o las reacciones hidráulicas de la escoria de alto horno, da como resultado el engrosamiento de la distribución de poros

dentro de la estructura. Además, parece que la pasta de cemento Portland reacciona similarmente por la carbonatación de la portlandita, aunque en forma retardada.

Cambios mecánicos. La resistencia a la compresión y tracción de las pastas de cemento Portland y el concreto armado puede mejorarse significativamente mediante la carbonatación. Esto está relacionado con la disminución de la porosidad y posiblemente también con los cambios estructurales del gel CSH como el principal componente de unión en el cemento.

La reacción de carbonatación moderada ocurre en la capa superficial de materiales de cemento que genera CaCO_3 . El CaCO_3 formado se deposita en los poros en la matriz de cemento hidratado dando como resultado el refinamiento de poros de la capa carbonatada. Esto es beneficioso ya que el refinamiento de los poros resulta posteriormente en una mayor resistencia, una menor porosidad y una mayor durabilidad del cemento hidratado. Esto explica el incremento de la resistencia a la compresión de los morteros/concreto con el curado continuo cuando se expone al ambiente cargado de CO_2 . A diferencia de la entrada continua de CO_2 ataca a la CSH, lo que resulta en su desintegración y posterior pérdida de resistencia en las estructuras de concreto.

Contracción y Agrietamiento. Una contracción de la pasta de cemento puede ser consecuencia de la carbonatación. Algunos estudios sugieren que esta contracción se origina en la CSH, mientras que otros afirman que resulta, al menos en parte, del CH.

Algunos estudios, establecen que la contracción por efectos de carbonatación tiene básicamente el mismo mecanismo que la contracción que se lleva a cabo por secado: esto ocurre debido a un gradiente de contenido de humedad (resultante de la reacción de carbonatación de portlandita) dentro de la capa de pasivación de CaCO_3 que se forma alrededor del CH carbonatado. La humedad retenida dentro de esta capa se retendrá, pero la humedad del exterior se eliminará mediante secado debido a las condiciones ambientales, creando así un gradiente de contenido de humedad local dentro del revestimiento impermeable y causando

grietas. La contracción no ocurriría durante la altura de la reacción de carbonatación porque la localidad particular estaría saturada con el agua formada. Dado que, tanto la cal como la pasta de cemento hidratada evidencian un comportamiento similar en las pruebas, se establece que la carbonatación de la fase de portlandita es al menos una de las causas. Otros investigadores sugieren que la contracción de carbonatación es, de hecho, un caso especial por descalcificación.

Curado por carbonatación acelerada. El curado por carbonatación acelerada se ha propuesto como una forma de capturar CO₂ atmosférico. Este procedimiento implica la exposición de pasta de cemento o concreto recién preparados (principalmente a las primeras 24 horas) a una concentración elevada de CO₂.

Este tipo de curado tiene varios beneficios importantes sobre el curado con humedad. Los estudios desarrollados determinan que el curado por carbonatación acelerada puede conducir a una alta resistencia a la edad temprana y un aumento rápido de la resistencia.

La carbonatación de la pasta de cemento fresca alcanza a tener una influencia compleja en la microestructura, dado que la exposición moderada al CO₂ aumenta la resistencia a compresión, mientras que la exposición prolongada puede afectar negativamente las propiedades mecánicas. Aunque una carbonatación más larga resultaría en más CO₂ capturado por este proceso, se debe seleccionar una duración óptima para el curado por carbonatación.

Por consiguiente, el curado por carbonatación acelerada tiene un gran potencial para crear productos cementosos sostenibles con alta resistencia temprana y buena durabilidad.

Mejora de compuestos reforzados con fibra. Al igual que el curado por carbonatación acelerada, los tratamientos de carbonatación pueden usarse para perfeccionar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los materiales compuestos cementosos que usan diferentes tipos de fibras. Pero, de forma similar a la tecnología del curado por carbonatación acelerada, existen algunas limitaciones, especialmente relacionadas con el espesor del material que puede ser

tratado. Además, los compuestos reforzados con fibra son en general más susceptibles a la carbonatación debido a mayor porosidad en la interfaz fibra/matriz. Sin embargo, un problema importante con algunos tipos de fibra es su deterioro en las condiciones altamente alcalinas de la matriz cementosa. Las dos clases principales de fibras que se ven afectadas son fibra de vidrio y las fibras naturales.

El tratamiento de carbonatación puede causar una caída en el pH, protegiendo así las fibras, al tiempo que fortalece la matriz al mismo tiempo. Además, en este caso, puede producirse una mejora significativa del enlace fibra/matriz.

Reciclaje de concreto. Las estructuras de hormigón demolido se han reciclado comúnmente, y el material se ha utilizado como agregado en la producción de hormigón nuevo. El concreto agregado reciclado tiene, en general, menor resistencia y durabilidad en comparación con concreto agregado natural. Un problema importante en este tipo de concreto es debido a que los agregados reciclados están rodeados por una masa de mortero, que es el punto más débil en el concreto reciclado.

Se han propuesto varias formas posibles de mejorar la calidad de mortero adherido en concreto agregado reciclado, y uno de los medios puede ser un tratamiento con dióxido de carbono del agregado de concreto reciclado. Este enfoque utiliza la carbonatación acelerada por períodos cortos (1 día - 1 semana) para optimar la calidad de los áridos reciclados. El procedimiento aumenta la densidad aparente y reduce la velocidad de absorción de agua y la eficiencia de trituración del agregado reciclado (con relación a los agregados reciclados no tratados). Como resultado, las características del mortero y el concreto preparado usando agregados reciclados tratados mejoraron significativamente, dado que el tratamiento de carbonatación aumentó la fluidez y resistencia a compresión del mortero, así como resistencia a la compresión y a la flexión del concreto.

Otro uso de la carbonatación acelerada en el reciclaje de concreto se encuentra en la reutilización de la pasta de cemento hidratada residual. La pasta de cemento hidratada residual es un subproducto del reciclaje de hormigón, y comúnmente se vierte en vertederos. Su cantidad generada en los procesos de reciclaje de áridos puede ser tan alta como 1/3 de la masa del hormigón residual. Con la carbonatación acelerada de la pasta de cemento hidratada residual, se captura CO₂ para luego reutilizar los residuos y producir materiales de construcción con un buen rendimiento.

Inmovilización de residuos. Se ha establecido que la carbonatación puede afectar positivamente la inmovilización de metales pesados en el interior de matrices cementosas. La carbonatación acelerada a veces se usa como una técnica de estabilización/solidificación para diferentes tipos de materiales cementosos que contienen diversos contaminantes metálicos.

La carbonatación de los residuos de cemento modifica la microestructura, aumenta la resistencia y puede disminuir la lixiviación de metales. Como resultado de la carbonatación, puede ocurrir la precipitación de sales dobles de calcio-metal y la formación de complejos de metal-silicato. El efecto de la carbonatación es doble: algunos metales pesados forman ya sea hidroxí-carbonato o depósitos de carbonato sobre silicatos de calcio. Además, una caída en el pH reduce la movilidad del metal para algunos metales, mientras que para otros puede aumentar la rapidez de lixiviación. Para algunas especies, existe una estabilización de los precipitados de carbonato metálico, debido al suministro de CO₂ inorgánico, con un aumento en la rapidez de lixiviación al mismo tiempo.

Los tratamientos de carbonatación de los residuos pueden ser una buena opción para la inmovilización de ciertos tipos de residuos en matrices cementosas. Sin embargo, el tratamiento puede ser perjudicial, dependiendo de la naturaleza de los residuos, por lo que para nuevos tipos de residuos y diferentes materiales cementosos, se deben realizar experimentos adicionales.

Carbonatación Natural y Acelerada. La carbonatación natural del cemento se produce de forma lenta y natural cuando el cemento está expuesto al aire, lo que permite que el dióxido de carbono que ha entrado por difusión en la red de poros que contiene la estructura del concreto y reacciona con los productos hidratados, los cuales por hidrólisis son capaces de formar compuestos alcalinos, tal como el hidróxido de calcio, reacción que conducen a la formación del carbonato de calcio. Este proceso se produce en una tasa lenta y puede tardar varios años en completarse.

Dada la lentitud de la reacción de la carbonatación natural se ha diseñado procesos de carbonatación acelerada, donde, regulando las condiciones del medio, especialmente aumentando la concentración de CO₂, se puede reproducir o emular los procesos de carbonatación. La comparación de ambos métodos permite modelar matemática o estadísticamente, estableciendo modelos predictivos de la reacción de carbonatación. Considerando los trabajos de: Iloro F.H. (2015), Iloro et al. (2016) y Muñoz (2017) se describirán las características de carbonatación natural y acelerada en los concretos:

Carbonatación natural. Si se requiere evaluar el comportamiento de morteros y concreto con relación a una carbonatación natural, se puede realizar pruebas experimentales o sobre estructuras en servicio. En esta dirección, se pueden variar los factores involucrados con el medio de exposición y las propiedades del concreto.

Los ensayos de laboratorio se pueden realizar de forma controlada tanto en ambientes internos, como externos, además para el caso de los ambientes externos se debe considerar si están protegidos y no protegidos de las condiciones climáticas como: el sol, la lluvia, la helada, etc. El control de estas condiciones nos permitirá evaluar la rapidez de carbonatación en las diferentes condiciones además de evaluar los efectos de los ciclos de mojado y secado, considerando el mojado por el contacto con el agua de las precipitaciones y el secado por el

soleamiento, además de otros eventos tales como el hielo y deshielo, que varían el estado de saturación de la solución contenido en los poros.

Los resultados nos mostrarán que las condiciones de exposición del ambiente exterior hacen variar la rapidez de carbonatación de concretos con iguales características. Adicionalmente se pueden definir diferentes modelos.

Las pruebas naturales también consideran las estructuras en servicio; consisten generalmente en la extracción de muestras para caracterizar el concreto mediante ensayos físicos y químicos; adicionalmente se puede medir la profundidad de la carbonatación. Además, se pueden realizar diferentes ensayos con componentes protegidos y no protegidos y contrastarlos con los del laboratorio. El carácter complejo y multidimensional de las evaluaciones de las estructuras en servicio nace de la falta de información sobre las propiedades del concreto y del carácter heterogéneo que pueden presentar, dependiendo de las técnicas utilizadas para su fabricación, instalación y curado.

Las pruebas in situ hechas en el laboratorio o sobre las estructuras en servicio, permiten valuar los factores responsables de la modificación de la rapidez de carbonatación, las cuales son atribuibles a las condiciones ambientales del emplazamiento particularmente la concentración de CO_2 y la humedad relativa y a las características del concreto, entre los que cuentan, la porosidad; relación w/c; compactación, el tiempo y tipo curado; el tipo y contenido unitario de cemento; entre otros.

Carbonatación acelerada. Dado que la carbonatación natural es un proceso lento que puede tardar varios años, el estudio experimental de este tipo de procesos de naturaleza longitudinal no es viable para investigaciones experimentales de corrosión del concreto. Mientras que, la carbonatación acelerada del cemento es un proceso que se produce de forma artificial mediante la exposición del cemento a altos niveles de dióxido de carbono en un

ambiente controlado. Este proceso puede acelerar significativamente la tasa de carbonatación del cemento, reduciendo el tiempo necesario para la formación de carbonato de calcio.

Las cámaras de carbonatación poseen diversos diseños con relación a los materiales usados para la fabricación de los gabinetes, la interface usada para la recolección de la data y los parámetros a medir. La concentración de CO₂ se proporciona por sublimación del hielo seco o por difusión a través de un tanque de CO₂. Por otro lado, la humedad relativa se regula a través de aire húmedo, vapor de agua o, basados en las propiedades coligativas, tal como la presión de vapor, que puede ser regulada a través de soluciones salinas saturadas. La interface presenta terminales electrónicos que permiten controlar la temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂, entre otras variables. Actualmente, las normas UNE EN 83993-1(2009), regulan el diseño y construcción de las cámaras de carbonatación normalizadas para procesos de investigación sobre la corrosión del concreto.

En las pruebas experimentales de procesos de carbonatación acelerada, la concentración del dióxido de carbono se puede variar en concentraciones volumétricas entre 1 al 100 %, aceptando que una composición volumétrica alrededor del 4% ese emula los procesos de carbonatación que ocurren al carbonatarse en ambientes naturales. Sin embargo, la correlación entre el proceso natural y el acelerado no es lineal, dado el carácter complejo en razón a la influencia de otras variables que deben ser considerados en el método acelerado, las cuales pueden afectar las correlaciones y los resultados. Entre las variables a considerar en el proceso de carbonatación acelerada, se tiene el estacionamiento y pre-acondicionamiento de las probetas; concentración de CO₂; humedad relativa en la cámara de carbonatación, la forma y geometría de las probetas.

Durabilidad. El concreto armado es un material compuesto que se utiliza ampliamente en la construcción debido a sus propiedades mecánicas, versatilidad y durabilidad. El concreto

se utiliza para crear una estructura resistente y sólida. Sin embargo, el concreto por sí solo no es adecuado para soportar grandes cargas o tensiones.

El concreto armado tiene muchas ventajas sobre otros materiales de construcción. Por ejemplo, es muy resistente a la compresión y puede soportar cargas pesadas. También es relativamente fácil de moldear y dar forma, lo que lo hace ideal para la construcción de estructuras complejas. Además, el concreto armado es resistente al fuego y al agua, lo que lo hace adecuado para una amplia variedad de aplicaciones.

Otra ventaja importante del concreto armado es su durabilidad. El concreto armado puede durar décadas o incluso siglos sin necesidad de mantenimiento, lo que lo hace una opción ideal para estructuras a largo plazo. Además, el concreto armado es relativamente económico y fácil de fabricar, lo que lo hace accesible para una amplia variedad de proyectos de construcción. Sin embargo, la durabilidad de estos materiales puede ser afectado por procesos de corrosión-degradación del concreto y como consecuencia de ello, la corrosión del acero y en este contexto, los diseños deben considerar que estos mecanismos de degradación deben ser minimizados, eliminados o retardados (Rivera, 2016).

También, se debe tomar en cuenta el uso de buenos materiales y la proporción adecuada de la mezcla no garantizarán, por sí mismos, un concreto duradero. Las prácticas de colocación adecuadas y la mano de obra son esenciales para la producción de concreto duradero. El concreto fresco se puede consolidar y moldear a la forma deseada para cumplir con el propósito previsto. Durante esta etapa, se establecen ciertas propiedades que influyen significativamente en la durabilidad del concreto endurecido. El crecimiento de la estructura de los poros, la formación del sistema de vacío de aire, la uniformidad del material y el grado de agrietamiento se establecen a edades tempranas y son importantes para la máxima durabilidad del concreto. Como tal, el concreto duradero requiere la aplicación de un buen control de calidad durante la construcción. La inspección y las pruebas realizadas por personal capacitado y certificado

pueden ayudar a garantizar el empleo de mezclas duraderas y las prácticas adecuadas. (ACI 201.2R, 2016)

Condiciones de Servicio y Exposición. Las causas no estructurales que pueden afectar la durabilidad de las cimentaciones basadas en concreto están relacionadas por las condiciones de servicio y exposición. La primera causa, se refieren a la capacidad operativa de cada estructura en particular; mientras que la segunda, se refieren a las condiciones ambientales y al medio de contacto del concreto con su entorno. A continuación, identificamos las características y ejemplos de los deterioros, basado en el trabajo de Hernández (2016).

Deterioro por condiciones de servicio. El concreto puede sufrir deterioro por diferentes condiciones de servicio, que pueden ser causadas por factores ambientales, de diseño o de construcción. En general, el deterioro del concreto por condiciones de servicio puede evitarse mediante un diseño adecuado, una correcta selección de materiales, una construcción de calidad y un mantenimiento preventivo adecuado. El seguimiento regular y la reparación oportuna de los daños en el concreto también son medidas importantes en el proceso de mantenimiento.

Deterioro por condiciones de exposición. El concreto puede deteriorarse debido a diversas condiciones de exposición, incluyendo: la exposición a la humedad, exposición al calor, exposición a agentes químicos, exposición a ciclos de congelación y descongelación, exposición a la abrasión: La exposición a la abrasión, como la fricción causada por el tráfico de vehículos, puede desgastar la superficie del concreto y reducir su resistencia.

Para evitar el deterioro del concreto debido a estas condiciones de exposición, es importante seguir las especificaciones de diseño y construcción apropiadas, utilizar los materiales adecuados y aplicar tratamientos protectores adecuados, tales como selladores, recubrimientos y revestimientos. Además, el mantenimiento regular y las inspecciones

periódicas pueden ayudar a detectar y abordar cualquier deterioro antes de que se convierta en un problema más grave.

Durabilidad y Vida Útil. De acuerdo con el ACI (American Concrete Institute), es importante diferenciar los términos “durabilidad” y “vida útil”, dado que a menudo se intercambian erróneamente. En este sentido, se presentan las siguientes definiciones (ACI 365.1R, 2017):

Vida útil de diseño (Design Service Life) (de un edificio, componente o material): Es el período de tiempo después de la instalación o reparación en el cual el desempeño satisface los requisitos especificados si se mantiene de manera rutinaria, pero sin estar sujeto a una sobrecarga o evento extremo.

Durabilidad (Durability): La facultad de un material o estructura para resistir la acción del medio externo, el ataque químico, la abrasión y otras condiciones de servicio, y mantener la capacidad de servicio durante un tiempo específico o una vida útil.

Vida útil (Service Life): Una valoración de la vida útil restante de una estructura basada en la tasa actual de deterioro o desgaste, suponiendo una exposición continua a determinadas condiciones de servicio sin reparaciones.

Exactamente, diseñar la vida útil de una estructura de concreto implica considerar varios factores, incluyendo los aspectos técnicos, funcionales y económicos, y la selección adecuada de materiales y métodos de construcción que permitan cumplir con las expectativas y requerimientos del proyecto. El diseño de vida útil también debe tener en cuenta las cargas y las condiciones de servicio a las que se someterá la estructura, así como los planes de mantenimiento y las inspecciones regulares necesarias para garantizar su integridad y durabilidad.

La dosificación de la mezcla de concreto es un aspecto crítico en el diseño de vida útil de la estructura, ya que influye en las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. La

selección adecuada de los componentes del concreto, como los agregados, el cemento y los aditivos, también puede tener un impacto significativo en la calidad y durabilidad del concreto.

En general, el diseño de vida útil de una estructura de concreto es un proceso complejo que requiere una evaluación cuidadosa de múltiples factores y una planificación detallada para garantizar la seguridad y la durabilidad de la estructura a lo largo del tiempo.

Para proyectar la vida útil de los elementos y estructuras de hormigón, debe definirse el ciclo de vida útil, considerando que en la seguridad estructural es inaceptable la degradación del material o a la superación de capacidad de carga de diseño, que la capacidad funcional de los refuerzos ya no es suficiente para una demanda establecida, que los requisitos de mantenimiento no superan los límites de los recursos disponibles, entre otras consideraciones.

La definición del final de la vida útil de una estructura de concreto se debe tener en cuenta múltiples factores, incluyendo la seguridad humana, la funcionalidad, la facilidad de servicio y las consideraciones económicas. En algunos casos, el rendimiento, la apariencia o la capacidad de la estructura pueden mejorarse para alcanzar un nivel aceptable mediante técnicas de mantenimiento, reparación o rehabilitación, siempre y cuando los costos asociados sean justificados y razonables en comparación con los beneficios obtenidos.

El mantenimiento preventivo y las inspecciones regulares pueden ayudar a identificar y corregir problemas en una etapa temprana, evitando el deterioro excesivo de la estructura y prolongando su vida útil. Las reparaciones y rehabilitaciones también pueden ser una opción viable para extender la vida útil de una estructura que ha alcanzado su límite de servicio, siempre y cuando se realicen de manera adecuada y se utilicen materiales y técnicas apropiados.

En última instancia, la decisión de reemplazar una estructura de concreto debe basarse en una evaluación cuidadosa de todos los factores relevantes, incluyendo la seguridad humana, la funcionalidad, la facilidad de servicio, las consideraciones económicas y el impacto ambiental.

Factores que Afectan la Durabilidad y Desempeño del Concreto. La durabilidad y desempeño de las estructuras de concreto armado son conceptos relacionados que dependen principalmente de la optimización de cinco factores principales: el diseño del refuerzo de acero, el desarrollo de construcción, la gestión y el mantenimiento, las propiedades de los materiales y las condiciones ambientales externas. Estos factores abarcan todas las etapas del diseño, la construcción, el uso, la gestión y el mantenimiento de estructura de concreto; y como se observa en la Figura 2 están estrechamente correlacionados entre sí, de modo que la durabilidad de las estructuras de concreto armado se reducirá si uno de ellos es deficiente (Wang, 2014).

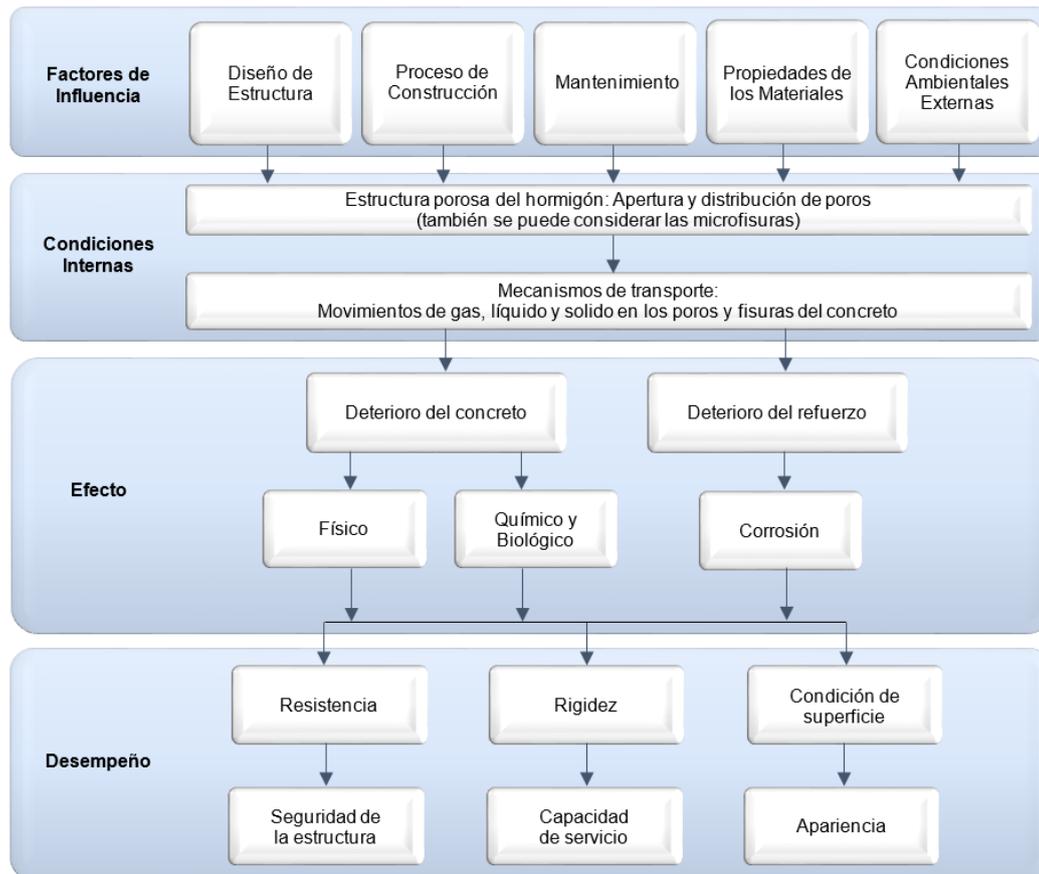
Con base en los documentos ACI 365.IR (2017) y Wang (2014) se ha elaborado la Figura 2 y también se establecen los conceptos relacionados a los factores que influyen en la durabilidad y desempeño del concreto.

Diseño. Un diseño correcto es el primer requisito para una estructura duradera. Para ello, se requiere la aplicación de normas y especificaciones técnicas adecuadas, un buen cálculo de las cargas de servicio, información sobre las condiciones ambientales, entre otros.

En este sentido, se requiere tener en cuenta las especificaciones de diseño estructural y las normas técnicas, tanto la seguridad estructural bajo carga, como el diseño de durabilidad bajo los efectos ambientales, dado que una apreciación errónea de la agresividad del medio ambiente, pueden generar una reducción en la durabilidad del concreto.

Figura 2

Relaciones de durabilidad y desempeño del concreto



Nota. Adaptado de ACI 365.IR (2017) y Wang (2014)

Proceso de construcción. Para garantizar una adecuada durabilidad de las estructuras de concreto, se requiere que la calidad de la construcción cumpla con los requisitos de diseño y las especificaciones técnicas, es decir se requieren establecer buenas prácticas en la ejecución de construcciones.

Por ende, las empresas constructoras deben adoptar tecnologías y métodos de construcción que contribuyan a mejorar la calidad en el proceso de construcción, considerando para ello el uso de materiales de buena calidad; un adecuado recubrimiento de concreto; el empleo de un buen acero en reforzamiento; etc. Adicionalmente, es fundamental contar con un sistema de control de calidad y mano de obra calificada. (ACI 201.2R, 2016)

Es importante considerar que los costos de un proyecto de construcción incluyen el tiempo, el personal y el equipo; por ende, cualquier esfuerzo de ahorro en estos ámbitos está

justificado, pero cualquier solución posible no debiera disminuir la durabilidad y la vida útil del concreto estructural.

Propiedades de los materiales. Los gases, los líquidos y los iones pueden atravesar el concreto de tres maneras diferentes: permeación, difusión y sorción. La permeación significa que pueden fluir bajo un gradiente de presión. La difusión se produce bajo un gradiente de concentración y el flujo bajo succión capilar se denomina sorción. La razón principal por la que el material de Concreto tiene un cierto grado de propiedades de transporte es que existe un gran número de poros y grietas en concreto.

Como se ha descrito anteriormente, todos los procesos que provocan el deterioro del concreto o la corrosión de las barras de refuerzo implican fenómenos de transporte por los poros y las grietas del concreto. Cuando las sustancias nocivas penetran en concreto, se producen reacciones químicas entre las sustancias y los componentes del hormigón. Esto daña la estructura del concreto, dando lugar a problemas de durabilidad en las estructuras de concreto.

Condiciones ambientales externas. Las condiciones de exposición o las condiciones ambientales duras inciden en una degradación química y física que pueden impactar adversamente en la durabilidad de concreto armado.

Estructuras dañadas debido a una apreciación errónea de la agresividad del medio ambiente ocurren con frecuencia en la totalidad de lugares. En general, se reconoce que la durabilidad del hormigón puede verse influida por los siguientes factores ambientales: Temperatura; Humedad; Factores físicos; Factores químicos y Factores biológicos.

Efectos del Cambio Climático. En ítems anteriores observamos los esfuerzos desarrollados a nivel mundial para impulsar la sostenibilidad del cemento, considerando las necesidades de mitigación y adaptación al cambio climático. Adicionalmente, se revisaron las iniciativas de las empresas productoras de cemento para reducir las emisiones de CO₂; los

trabajos para reducir las emisiones a través de la cadena de valor de la construcción; así como las tecnologías no convencionales de captura y almacenamiento de CO₂ en la industria cementera.

La ACI (2017) establece que los criterios clave de sostenibilidad de la emisión de CO₂, la energía incorporada y otros parámetros se ven muy afectados por la vida útil esperada de una estructura. El impacto general de las actividades de edificación se reduce cuanto más duran los materiales y se minimizan más eventos de reparación de mantenimiento. Por tanto, el diseño sostenible de estructuras de hormigón depende del uso de métodos adecuados para predecir la vida útil. El diseño sostenible o el diseño de edificios ecológicos adopta un enfoque holístico para la observación de todo el ciclo de vida de la instalación. Los principios de diseño ecológico, cuando se combinan con el diseño de vida útil, pueden brindar justificaciones para exceder los mínimos del código de diseño.

Otra línea de interés que podemos observar es el impacto del cambio climático y sus efectos, en el concreto armado; considerando el incremento de los riesgos de degradación, la reducción de la durabilidad y la necesidad de impulsar mantenimientos con riesgo de corrosión por carbonatación. Ejemplos de investigaciones referidos a este tema, son los trabajos realizados por Benítez Mongelós (2018), Mizzi y otros (2018), de donde extraemos los siguientes conceptos.

El cambio climático y sus efectos provocan cada año una degradación y daños considerables a la infraestructura existente; por consiguiente, establecen la necesidad de desarrollar estrategias innovadoras, para adaptar las estructuras de concreto armado, a los riesgos de degradación y garantizar su durabilidad el mayor tiempo posible.

En principio, se debe considerar a la carbonatación como el fenómeno químico que afecta a la mayor parte de estructuras de concreto en el mundo y como se ha resaltado anteriormente, es un proceso natural que está directamente relacionado con parámetros

ambientales tales como la concentración de CO₂, la temperatura y la HR. Teniendo en cuenta este enfoque, el calentamiento global y sus consecuencias como el cambio climático juega un rol significativo en el deterioro futuro de estructuras de concreto causada por este fenómeno.

Entre los efectos que pueden ocurrir en el medio ambiente debido al fenómeno del cambio climático, se pueden señalar aquellos que afectarán la durabilidad de estructuras de concreto armado. Estos efectos según Talukdar (2013) son los siguientes: 1) Cantidades crecientes de contaminantes atmosféricos. 2) Aumento de temperaturas. 3) Fluctuaciones en la cantidad anuales de precipitación. 4) Fluctuaciones en los niveles de humedad relativa. 5) Fluctuaciones en la duración de las estaciones. 6) Eventos climáticos extremos más frecuentes.

Varios estudios coinciden en que el cambio climático provocará nuevas consideraciones y establecerá nuevas condiciones para la industria de la construcción. En consecuencia, el conocimiento de las implicancias del cambio climático en la infraestructura será muy importante para la industria en los próximos años. Los impactos climáticos influyen en los costos de operación y mantenimiento y como consecuencia de ello debe enfocarse la planificación económica, basados en las consideraciones de la contabilidad ambiental.

Por otro lado, Chalmers (2014) concluye que los efectos del cambio climático: las inundaciones costeras, las precipitaciones extremas como el estrés térmico, la contaminación del aire, las precipitaciones extremas, la sequía y la escasez de agua, los deslizamientos de tierras, generan problemas en las zonas urbanas que se agravan por la falta de infraestructura y servicios de agua y desagüe o por vivir en viviendas en áreas expuestas y construidas inadecuadamente. Mejores sistemas de infraestructura reducirán la vulnerabilidad en las zonas urbanas.

En el sector de la construcción es necesario adoptar políticas y medidas agresivas y sostenidas y sustentables en el diseño de construcción tomando en cuenta los efectos de cambio climático. (Chalmers, 2014).

Influencia de las Adiciones Minerales en la Carbonatación Acelerada. Para mejorar las condiciones de morteros y concretos al estado fresco o endurecido se usan aditivos minerales finamente molidos. La incorporación de estos aditivos dependiendo de las proporciones pueden producir 3 efectos: de disolución durante la hidratación del cemento, efecto filler que se presenta en las primeras edades, la reactividad puzolánica que puede ser fuerte, moderada o débil. (Bonavetti, y otros, 2002).

Las adiciones minerales en el cemento generan efectos por el endurecimiento con el agua o por reacciones puzolánicas de sus compuestos hidratados y además por efectos físicos como la obstrucción de los poros y capilares que densifican la microestructura del concreto aumentando su resistencia y mejorando el comportamiento durable. (Bonavetti y Rahhal, 2006).

En esta investigación se compara la influencia de las adiciones minerales en el concreto para mejorar las características con la finalidad de mejorar su durabilidad frente a las reacciones de carbonatación, se usaron para tal fin el carbón, nano tubo de carbón (CNT), vidrio de sosa - cal, y un impermeabilizante.

Aplicaciones del Nanotubo de Carbón (CNT). Los nanotubos de carbono son una de las nano estructuras más versátiles y útiles en el campo de la nanotecnología, y tienen una amplia gama de aplicaciones en diferentes industrias, incluyendo la industria de la construcción. En el caso del concreto, los nanotubos de carbono pueden utilizarse como refuerzo para mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del material. Algunas de las aplicaciones más importantes de los nanotubos de carbono en el concreto son:

Refuerzo estructural: Los nanotubos de carbono pueden utilizarse como refuerzo en el concreto para mejorar la resistencia mecánica y la ductilidad del material. Los nanotubos de carbono tienen una resistencia a la tracción excepcionalmente alta, lo que les permite soportar

cargas más pesadas sin romperse o deformarse. Esto puede ser especialmente útil en la construcción de estructuras de concreto sometidas a cargas cíclicas o impactos.

Reducción de la permeabilidad: Los nanotubos de carbono pueden utilizarse como aditivos para reducir la permeabilidad del concreto, puede mejorar la densidad y la resistencia a la penetración de los materiales, lo que reduce la posibilidad de fugas de agua o de materiales agresivos.

Reducción del agrietamiento: Los nanotubos de carbono pueden ayudar a reducir la formación de fisuras en el concreto. La adición de este mineral al concreto puede mejorar la cohesión y la adherencia de los materiales, lo que reduce la posibilidad de formación de fisuras.

Mejora de la durabilidad: Los nanotubos de carbono pueden mejorar la durabilidad del concreto mediante la reducción de la corrosión de los refuerzos y la protección contra la degradación causada por los ciclos de congelación y descongelación.

En resumen, los nanotubos de carbono pueden tener una amplia gama de aplicaciones en el campo del concreto, incluyendo el refuerzo estructural, la reducción de la permeabilidad, la reducción del agrietamiento y la mejora de la durabilidad. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el uso de nanotubos de carbono en el concreto aún se encuentra en una etapa de investigación y desarrollo, y es necesario llevar a cabo más estudios y pruebas para evaluar su efectividad y seguridad a largo plazo (Chang, y otros, 2007), (Kuo, y otros, 2006).

Las investigaciones sobre los CNT han establecido que se pueden llenar las porosidades que se producen en concreto convencional. Estas porosidades son responsables que el agua se difunda a través del concreto y sean responsables de las grietas. En ese sentido, los CNT son materiales potenciales para ser usados como nano-refuerzos en cimentaciones de las edificaciones (Ajayan, 1999), (Srivastava, y otros, 2003).

Uso de Vidrios Sódicos como Aditivo. Las botellas de vidrio (sosa y cal) fabricados industrialmente son usados para el envasado de refrescos, lácteos, bebidas alcohólicas, vidrios

planos, vasos y frascos de alimentos, cuyos usos y aplicaciones son muy variados, y es sumamente útil para un sinnúmero de tareas, ya sea para decorar, para la elaboración de objetos e incluso para protección como aditivos en concretos para la construcción.

Los desechos que genera la población como consecuencia del uso y aplicación del vidrio producen un impacto ambiental negativo, sin embargo, este material es altamente reciclable y reutilizable como ocurre actualmente en el mundo.

La Tabla 3 resume la composición promedio del vidrio de sosa y cal.

Tabla 3

Composición del vidrio de sosa y cal

Composición	%
Arena: SiO ₂	71 - 75
Bicarbonato sódico: Na ₂ CO ₃	12 - 16
Cal: CaO	10 - 15

Nota: En la presente investigación usamos el vidrio reciclable de bebidas como aditivo, trituradas hasta una malla 100.

Aditivo del Mineral Grafito. El grafito es un mineral compuesto principalmente de carbono y puede ser utilizado como aditivo en el concreto (ver Figura 3). Algunas de las posibles aplicaciones del grafito como aditivo en el concreto incluyen:

Mejora de la conductividad térmica y eléctrica: El grafito es un excelente conductor térmico y puede ser utilizado como aditivo en el concreto para mejorar su conductividad térmica y eléctrica. Esto puede ser especialmente útil en la construcción de estructuras que requieren un control de la temperatura, como puentes, edificios inteligentes de gran altura.

Reducción de la retracción por secado: El grafito puede utilizarse como aditivo en el concreto para reducir la retracción por secado, lo que puede prevenir la formación de fisuras y grietas en la superficie del concreto.

Mejora de la resistencia al desgaste: El grafito es un material resistente al desgaste y la abrasión, por lo que puede utilizarse como aditivo en el concreto para mejorar su resistencia al

desgaste. Esto puede ser especialmente útil en la construcción de pavimentos y revestimientos de paredes que se someten a un desgaste constante.

Reducción del peso del concreto: El grafito es un material liviano y su inclusión en el concreto puede reducir el peso del material final. Esto puede ser especialmente útil en la construcción de estructuras de gran tamaño o en la construcción de estructuras en áreas remotas o de difícil acceso.

Es importante tener en cuenta que el uso del grafito como aditivo en el concreto aún está en una etapa de investigación y desarrollo. Se necesitan más estudios y pruebas para evaluar su efectividad y seguridad a largo plazo antes de que se pueda considerar su uso generalizado en la industria de la construcción.

Mejora de la resistencia al desgaste: El grafito es un material resistente al desgaste y la abrasión, por lo que puede utilizarse como aditivo en el concreto para mejorar su resistencia al desgaste. Esto puede ser especialmente útil en la construcción de pavimentos y revestimientos de paredes que se someten a un desgaste constante.

Reducción del peso del concreto: El grafito es un material liviano y su inclusión en el concreto puede reducir el peso del material final. Esto puede ser especialmente útil en la construcción de estructuras de gran tamaño o en la construcción de estructuras en áreas remotas o de difícil acceso.

Figura 3

Mineral Grafito Muestra 01.



La Tabla 4 muestra el análisis químico de carbón o grafito y cabe destacar que es un material inerte, en razón a que no reacciona con ácidos, bases, oxidantes o reductores.

Tabla 4

Análisis químico M02.

ANÁLISIS		RESULTADOS	MÉTODO DE REFERENCIA
Humedad, %		8,07	ASTM D 3173
Azufre, %		0,11	Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X
Ceniza, %		36,98	ASTM D 3174
Materia Volátil, %		10,16	ASTM D 3175
Carbón Fijo, %		44,8	ASTM D 3172
Poder	Btu/Lb	8649,69	Fórmula Goutel
Calorífico	Kj/Kg	20119,18	

Aditivo Líquido Impermeabilizante - Sika®-I. Entre las características más relevantes del aditivo líquido impermeabilizante Sika®-1 para concreto es un producto desarrollado por Sika, una empresa líder en la fabricación de productos químicos para la construcción y la industria.

Este aditivo se utiliza para mejorar la impermeabilización del concreto en diversas aplicaciones, como en la construcción de sótanos, cisternas, piscinas, muros de contención, entre otros. El Sika®-1 se agrega al concreto en la mezcla, mejorando sus propiedades impermeables y evitando la penetración de agua a través del material. El Sika®-1 es un aditivo líquido, de color marrón, que se presenta en envases de diferentes tamaños para facilitar su dosificación. El producto se mezcla con el agua de la mezcla de concreto, lo que permite su fácil incorporación en la obra.

Es importante seguir las instrucciones del fabricante para la dosificación y uso del producto, ya que el exceso o la falta de aditivo pueden afectar negativamente la calidad del concreto y su capacidad impermeabilizante.

En resumen, el Sika®-1 es un aditivo líquido impermeabilizante para concreto que mejora la capacidad del material para resistir el paso del agua. Su uso es recomendado en diversas aplicaciones de construcción, siempre y cuando se sigan las instrucciones del fabricante para su correcta dosificación y aplicación.

Entre las características más relevantes se tiene que es un bloqueador de los poros y capilares en los materiales cementosos proporcionando una barrera de agua efectiva contra la transferencia de agua líquida. Es decir, es el principal responsable de la impermeabilización del mortero / hormigón.

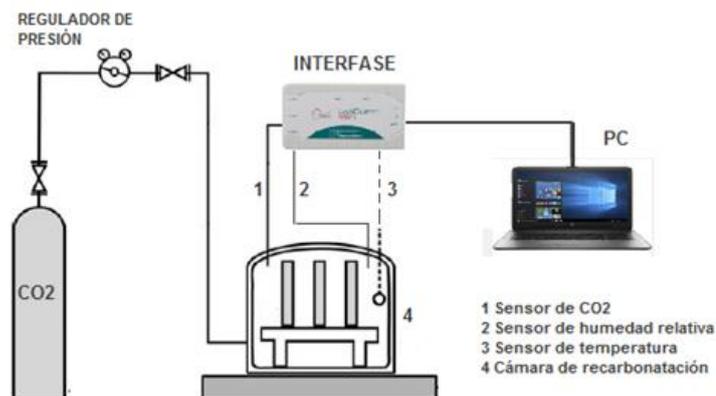
2.1.11 Técnicas de medición de carbonatación acelerada

Para el presente estudio se realizaron ensayos en una cámara de carbonatación y las técnicas de medición utilizadas, fueron las siguientes: 1) Medición de pH, (Test de Fenolftaleína y equipo medidor de pH), 2) Difracción de rayos X (XRD), 3) Porosimetría abierta. 4) Resistividad, 5) Resistencia a la compresión, 6) Determinación de propiedades físicas. A continuación, y con base en los trabajos realizados por Galán (2011), Ye (2019), Mohammed (2015), Chine et al. (2018), así como Takahashi (2019), se establecen los fundamentos básicos de cada una de ellas.

2.2.9.6 Ensayos en la Cámara de Carbonatación. En esta investigación de naturaleza experimental, se implementado un cámara de carbonatación y la Figura 4, muestra esquema del arreglo experimental desarrollado para facilitar las determinaciones de la rapidez de carbonatación de muestras consistentes en pastas de cemento, morteros y concreto. La Figura 4 representa un modelo de cámara donde se regula el ingreso de la presión del CO₂. La cámara es monitoreada en tiempo real por sensores de determinación de la concentración del CO₂, humedad relativa y temperatura; mientras se produce la carbonatación acelerada de las muestras de concreto y probetas (Valerio, 2019).

Figura 4

Diagrama del equipo de medición de carbonatación



Nota. Tomado de Valerio (2019).

Los sensores utilizados en la cámara de carbonatación son:

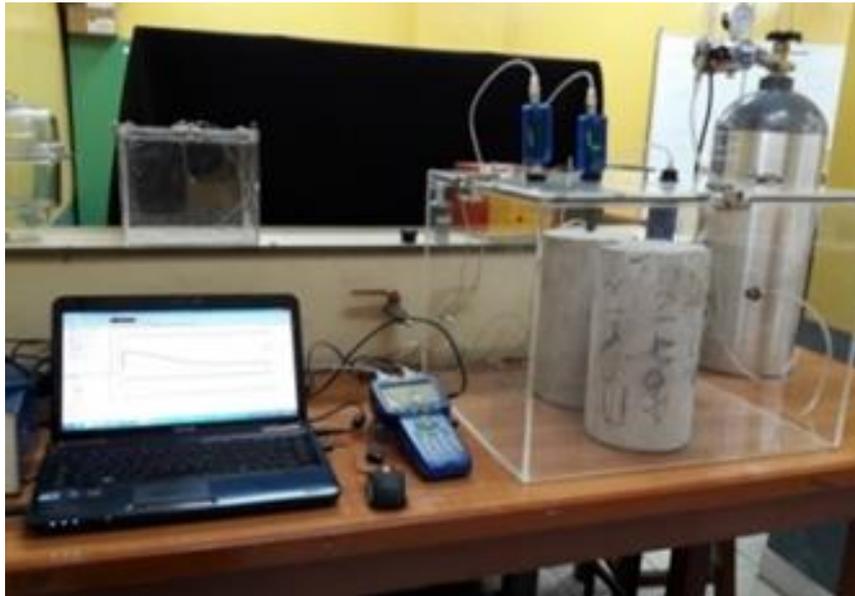
Sensor PS2110. Mide la concentración de gas dióxido de carbono en partes por millón en gases tales como el aire. El sensor está diseñado para trabajar con una interfaz compatible PASPORT (tal como el USB Link PS-2100) y software de recolección de datos PASCO (tales como Capstone o SPARKvue) para medir la concentración de gas dióxido de carbono.

Sensor PS2124. Mide la humedad y temperatura. Todas estas mediciones son registradas por su interfaz PASPORT o su software DataStudio. Por otro lado, por defecto, los datos se graban a una velocidad de 2 muestras /s. y la velocidad máxima es de 10 muestras /s.

Sensor para la humedad relativa. La humedad absoluta es obtenida mediante el punto de rocío y sus unidades en las cuales se expresan son g/m^3 , este sensor también puede expresar la humedad como humedad relativa. La temperatura por su parte es obtenida mediante una termocupla donde las unidades pueden ser expresadas en Celsius, Fahrenheit o Kelvin.

Figura 5

Cámara de carbonatación y equipamiento de medición



Medición de pH, (grado de acidez o basicidad). Las zonas carbonatadas o no carbonatadas se visualizan con el indicador fenolftaleína aplicadas en el interior de las muestras seccionadas que presentan zonas coloreadas que indica pH menores a 12,5 y zonas incoloras que indica pH entre 9,5 a 12,5.

La técnica usada para la prevención de la corrosión del concreto armado utilizando la coloración generada por la solución de fenolftaleína nos presenta que para pH menores a 8 el acero de la armadura del concreto se puede corroer; si el pH se mantiene en el rango alcalino entonces el concreto se encuentra pasivado. A la profundidad alcanzada en el cual el pH es superior a 8 entonces presenta una zona incolora al cual se le denomina profundidad de carbonatación.

Para las muestras de morteros y concretos de las 4 series se midieron el pH en forma instrumental, con un equipo PC-700 – OAKLN, como se muestra en la Fig. 6; usando el método de la Norma Técnica Peruana 339.073; los resultados se muestran en las respectivas tablas de las 4 series.

Figura 6

Equipo medidor de pH, PC-700 – OAKLN



2.2.9.7 Difracción de Rayos X (XRD)

Esta técnica facilita el análisis de las propiedades químicas de las muestras utilizadas en el presente estudio. Los rayos X se utilizan para investigar y cuantificar la naturaleza cristalina de las muestras, midiendo la difracción de los rayos X desde el nivel del átomo dentro del material. Se debe considerar que las sustancias cristalinas actúan como rejillas de difracción tridimensionales para longitudes de onda de rayos X similares a la separación de planos en una red cristalina, para que se produzca este fenómeno es necesario que se cumpla la Ley de Bragg que se indica en la ecuación 30 y se puede visualizar en la Figura 7.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \text{sen } \theta, \quad (30)$$

Donde:

d = distancia entre el nivel de átomos.

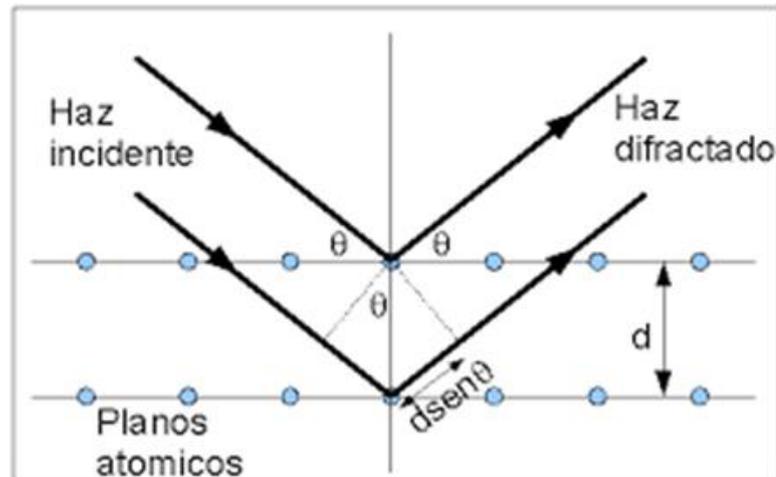
θ = ángulo de incidencia/difracción del haz.

n = número entero.

λ = longitud de onda del haz incidente.

Figura 7

Fenómeno de difracción.



Nota: Deducción de la Ley de Bragg por diferencia del camino óptico.

La difracción de rayos X (XRD) es una de las técnicas analíticas más destacadas en la caracterización de materiales cristalinos o de grano fino, dado que permite caracterizar e identificar las fases cristalinas, de los polvos y materiales cementantes, en una muestra.

El ensayo que se describe se llama difracción de rayos X (DRX) y se utiliza para determinar la estructura cristalina de un material. La difracción de rayos X se basa en la interacción de los rayos X con la estructura cristalina del material, produciendo un patrón de difracción que es específico de la estructura atómica del material.

El patrón de difracción se obtiene al variar el ángulo de difracción θ y registrar la intensidad de la radiación difractada en cada ángulo. Este patrón de difracción se puede comparar con patrones de difracción teóricos para determinar la estructura cristalina del material. La difracción de rayos X es una técnica ampliamente utilizada en la caracterización de materiales, en campos como la metalurgia, la ciencia de materiales, la geología y la biología estructural, entre otros.

Cada sólido cristalino genera difractogramas característicos (huella digital) esta técnica reconoce cada compuesto de forma inequívoca y permite describir las características tanto cualitativas como cuantitativas.

2.2.9.8 Porosimetría abierta

Esta metodología facilita el análisis de las propiedades físicas de las muestras utilizadas en el presente estudio. Se ha utilizado la norma UNE-EN 83980: 2014 para determinar la porosidad accesible al agua para muestras de morteros y concretos antes y después de ser carbonatados. Aplicando la siguiente formulación:

$$\text{Porosidad accesible al agua en \%} = \left(\frac{d_{ap} - d_{sec}}{d_{ap}} \right) \times 100 \quad (31)$$

Donde:

d_{ap} = densidad aparente

d_{sec} = densidad seca

La porosidad es la fracción volumétrica de poros del material, pueden situarse en la superficie o en la estructura interna, esta es una propiedad importante que se debe tomar en cuenta por la facilidad de penetración de sustancias agresivas en el concreto, siendo una variable importante para tomar en cuenta en el estudio de la carbonatación.

2.2.9.9 Resistividad Eléctrica del concreto

La resistividad eléctrica del concreto es una medida de su capacidad para conducir corriente eléctrica. El concreto es un material que tiene una resistividad eléctrica relativamente alta en comparación con otros materiales conductores, como los metales.

La resistividad eléctrica del concreto se relaciona con su contenido de humedad y su estructura porosa. El agua que se encuentra en los poros del concreto es un buen conductor de electricidad, por lo que un aumento en el contenido de humedad en el concreto aumentará su conductividad eléctrica y disminuirá su resistividad.

La estructura porosa del concreto también afecta su resistividad eléctrica. Los poros en el concreto pueden actuar como conductos para la corriente eléctrica, reduciendo la resistencia eléctrica del material. Sin embargo, si los poros están llenos de aire, la resistencia eléctrica del concreto aumentará.

La resistividad eléctrica del concreto se puede medir utilizando diferentes métodos, como la medición de la resistencia eléctrica de un electrodo insertado en el concreto o la medición de la resistencia eléctrica entre dos puntos del concreto utilizando un multímetro. La resistividad eléctrica del concreto se expresa en ohmios ($k\Omega$) y puede variar ampliamente en función de las condiciones ambientales y las propiedades del material.

La medición de la resistividad eléctrica del concreto es una técnica útil en la evaluación de la calidad y la durabilidad del concreto en diferentes aplicaciones, como en la construcción de puentes, edificios y estructuras de infraestructura. También se utiliza en la evaluación de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto, ya que la conductividad eléctrica del concreto puede verse afectada por la corrosión del acero. (Corral et al., 2011)

Procedimiento de medida de resistividad. Después de 10 días de secado las muestras se conectaron al equipo MILLER 400D. Este equipo tiene cuatro entradas de los cuales dos para la intensidad de corriente y dos entradas para la diferencia de potencial como se detalla en el método Wenner. Las medidas de la resistividad se realizan antes de someter las probetas a carbonatación acelerada, luego después de cada etapa de carbonatación. Estas medidas se realizaron para muestras de pastas, morteros, concretos para cementos Andino tipo I y tipo HS con o sin aditivos. La tabla (49) muestran los resultados obtenidos.

2.2 Marco filosófico

El estudio de la diada hombre-naturaleza, filosóficamente exigen una reflexión para buscar comprender las relaciones de carácter complejo y dinámicas de las interacciones hombre-naturaleza. Considerando un enfoque holístico y sistémico debemos considerar los

derechos de la otredad, así como la valoración de las alteraciones que provoca el hombre en la naturaleza y sus efectos en el espacio-tiempo, con el fin de restablecer un proceso de reconciliación del hombre con la naturaleza.

De acuerdo a Ferrer - Echavarría (2009) el desarrollo histórico de la relación sociedad - naturaleza distingue tres formas: En una perspectiva biocentrista, el hombre es parte de la naturaleza y esta relación exige un respeto y consideración para cada uno los componentes de la naturaleza. En ese contexto, el hombre tendría que mostrar mesura en la explotación de la naturaleza para su beneficio. La segunda forma de esta relación se produce desde una perspectiva antropocentrista fuerte o débil y se impulsa las prácticas productivas que se desarrollan con el apoyo de las ciencias y tecnologías. En esta etapa el hombre pasa a ser dominante y se interesa en obtener los recursos relacionados con la alimentación, energía y materia prima. En la perspectiva del antropocentrismo fuerte, el hombre es albacea de la naturaleza y se cree con derecho de poder decidir como explotarla y no toma conciencia de los daños que puede ocasionar debido a sus actividades extractivas de detrimento de la naturaleza. La tercera forma se enfoca dentro del antropocentrismo débil y se reconocen las alteraciones al equilibrio hombre-naturaleza y por ende se consideran todos los impactos en el medio ambiente, así como las problemáticas asociadas a los residuos industriales, por ello se genera una toma de conciencia sobre los impactos actuales y futuros en la tierra, entonces se genera acciones para mejorar la relación entre los hombres y la naturaleza.

En la investigación realizada por Ortiz Blanco (2014) se desarrolla un análisis del tema, considerando las perspectivas y obras de diferentes autores y filósofos: Se debe considerar que la relación hombre-naturaleza se caracteriza en un primer momento por el desarrollo de mitos sobre la naturaleza, considerando los cultos a las montañas, los ríos, los astros, el sol, especies animales, etc. Adicionalmente, en los procesos de observación del mundo que nos rodea, se empiezan a identificar los principales elementos: el agua, la tierra, el fuego y el aire que son

percibidos como los componentes esenciales de la naturaleza, desde una apreciación materialista.

Las reflexiones iniciales de la relación del hombre con naturaleza se orientan a identificar la belleza natural del entorno, considerando los animales y las plantas, y como todo ello puede generar las costumbres. También se busca diferenciar los entes naturales que son propias de la naturaleza y los entes artificiales desarrollados por el hombre.

Posteriormente se incorporan los sentimientos religiosos, donde se manifiesta la aproximación entre la naturaleza y Dios, considerando que el hombre es la creación suprema de Dios y la naturaleza ha sido creado para su felicidad. Así mismo, se generan los pensamientos iniciales que conciben a la naturaleza como suministradora de los elementos indispensables.

En la época del Renacimiento, se desarrollan con mayor intensidad las ciencias, debido a un mayor interés del hombre por conocer la naturaleza, a fin de generar su transformación y dominación mediante el desarrollo del nivel de conocimiento. En este contexto, se fundamentan las bases para creer que la ciencia y la técnica son los instrumentos del ser humano en el dominio de la naturaleza. Adicionalmente se plantea que los hombres no solo deben conocerse a sí mismos, sino también a la propia naturaleza, así como las leyes de la naturaleza.

Con el tiempo, se suceden los descubrimientos científicos y por ende hay un salto de calidad en los estudios de la naturaleza y el hombre, debido al incremento del nivel de conocimientos.

Sin embargo, según García, y otros (2018) el avance de la ciencia, la innovación y la tecnología, genera y profundiza la mentalidad antropocéntrica con una visión utilitarista de la naturaleza, porque se busca sacar provecho y rentabilidad a los diversos recursos naturales, propiciando con ello la violencia contra la naturaleza. Se considera que la tierra es una despensa ilimitada y como resultado de nuestra interacción con la naturaleza, adquirimos los recursos,

pero a costa de zonas deforestadas, lugares contaminados, especies en vías de extinción, etc. generando el desequilibrio del planeta. En consecuencia, el antropocentrismo en cualquiera de sus vertientes, demanda de una relación del hombre sobre la naturaleza, siendo de carácter parasitario, porque vivimos a expensas de los recursos naturales, sin devolver nada a cambio en una mentalidad de abundancia y derroche, desconociendo que los recursos son finitos.

De acuerdo con Alvarado (2020) el antropocentrismo impulsa al ser humano a priorizar sus intereses por encima de la naturaleza, en este sentido desarrolla la ciencia y tecnología para optimizar la fuerza extractiva de los recursos en un afán de satisfacer sus apetitos de consumismo compulsivo, o con el fin de facilitar su progreso social, cultural y espiritual. Entonces se puede apreciar que las sociedades establecen sus propios intereses y todo intento de preservación está sujeta a garantizar su bienestar, diversidad genética, alimentación, etc. por ende, no responde al verdadero cuidado del medio ambiente, sino al valor de uso del mundo no humano.

En respuesta a la mentalidad antropocéntrica, surge el biocentrismo cuya filosofía es de respeto a la vida en todas sus formas. De esta forma cualquier organismo viviente al igual que el ser humano, tiene derecho a existir y por ello requiere de respeto y cuidado. Así se puede establecer la relación simbiótica entre los diferentes seres vivos que forman parte de una misma tierra, considerando que los ecosistemas son apreciados como una totalidad y donde cada organismo por autopoiesis persigue su propia finalidad una interdependencia con su entorno. En este sentido, el valor de la vida se convierte en la medida de toda realidad y debe ser entendida en un sentido amplio considerando los aspectos biológico, filosófico, teológico, económico y social.

Este nuevo enfoque, descarta la visión centrada solo en el hombre y además deja en evidencia el desequilibrio generado en la relación prevalente del hombre sobre la naturaleza; en consecuencia, se hace necesario establecer nuevas acciones con enfoque en los ecosistemas

naturales. Así se han generado diversos movimientos ecologistas y pro ambientalistas, sobre la base de una sensibilización social frente a la degradación del medio ambiente, debido a las actividades antropocéntricas.

En este sentido, García, y otros (2018) desarrollan los nuevos conceptos referidos a la filosofía en función a la ecología, sobre la base de los cambios que se dan desde la década de los 60 debido a la preocupación por la destrucción del planeta y de sus diferentes formas de vida, que adicionalmente a impulsado agendas de gobierno con encuentros, cumbres, foros, entre otros. Además, se han propiciado cambios culturales, políticos, sociales y económicos, que impulsan nuevas formas de consumo, como por ejemplo el “consumo ecológico”, que toma en cuenta el origen de los productos, las buenas prácticas con los alimentos de origen animal, así como los empaques amigables con el medioambiente.

Debemos tener presente que el campo multidisciplinario de la ecología centra sus estudios en los modelos y estructuras de la naturaleza, y son constructos que permite incorporar una visión integral del planeta con todos sus habitantes. Por ende, en el ámbito de la filosofía se desarrollan conceptos asociados a la filosofía ecológica y filosofía de la naturaleza.

Con relación a lo anterior, por ejemplo, se ha establecido un término como la “ecosofía” que busca impulsar la sabiduría que nos permita interpretar la naturaleza para vivir en ella de forma diferente y busca convertirse en una nueva filosofía de la vida, una filosofía práctica que nos orienta a comprender el mundo que nos rodea, considerando que formamos parte de un mismo sistema: “nosotros somos parte de la tierra y ella es parte de nosotros”.

La ecosofía requiere que todos actuemos con el propósito de cuidar la tierra y todos sus seres vivos, y nos orienta por un sentido que surge de la reflexión sobre nuestra responsabilidad en todas las formas de interacción que tengamos con la tierra.

Otro concepto relacionado es la ecofilosofía, que es una expresión filosófica de la nueva unicidad entre el hombre y la otredad en la búsqueda incesante del equilibrio ecosistémico de

nuestro planeta; dado que se requiere una nueva forma de reflexionar sobre la naturaleza, considerando que el planeta es el hogar de los seres humanos, y por ello tenemos la responsabilidad de administrar, proteger, construir y transformar. En consecuencia, se establece que la filosofía del hombre y la filosofía de la naturaleza son dos enfoques filosóficos indisolubles y con ello se busca lograr el equilibrio ecológico y el equilibrio humano.

Asociado a lo anterior, también se han establecido los conceptos relacionados a la ética ecológica y ética medioambiental. En este sentido, Alvarado (2019) indica que la protección de la naturaleza, la conservación de la diversidad biológica, demanda de la ética de la responsabilidad, cuyos fundamentos ontológicos son el respeto, la justicia y la responsabilidad. Es decir que “la ética medioambiental debe proporcionar un equilibrio entre el lugar del ser humano dentro del mundo y su interconexión con el resto de los seres vivos, aceptándose cada individuo como un ser existente, es decir, otorgando una cualidad de pensar a otros desde sí” (p. 15).

Además, la ética medioambiental incorpora diversos pensamientos divergentes y suma esfuerzos con otras disciplinas, para mostrar idoneidad en el cuestionamiento del entorno actual y futuro del medio ambiente, señalar los problemas ecológicos con enfoques sociales, políticos, éticos y epistemológicos, a fin de impulsar la búsqueda de respuestas eficientes que faciliten la preservación de la naturaleza.

La ética medioambiental busca impulsar acciones prácticas, que se encuentren sustentadas en los siguientes principios teóricos básicos: 1) Justicia ecológica, 2) Solidaridad intergeneracional, 3) Solidaridad interespecífica, 4) Enfoque biocéntrico, 5) Responsabilidad, 6) Precaución, 7) Austeridad.

En el ámbito del tema al que se orienta el presente trabajo, según Ramirez (2002), representante de la Construcción Verde española, sostiene que la construcción sostenible se refiere a las prácticas de planificar, diseñar, construir y conservar edificios y estructuras de

forma responsable y respetuosa con el medio ambiente. Se trata de un enfoque integral que intenta maximizar los beneficios de la ecoeficiencia, economía circular, basados en la innovación de la construcción sostenible, mientras se minimizan los impactos negativos en el medio ambiente, la economía y la sociedad.

El término de construcción sostenible no debe ser aplicado solo a los edificios, sino a todo el entorno urbano considerando las diversas formas en que se integran para formar las ciudades.

El desarrollo urbano basado en la sostenibilidad también es conocido como urbanismo sostenible y tiene el propósito de proyectar y recrear ambientes urbanos, que, por un lado, impliquen el uso racional y sustentable de los recursos naturales y, por otro lado, proporcionen recursos urbanísticos suficientes, considerando no sólo las formas sino también la eficiencia energética y el agua, además de la funcionalidad básica de ser un lugar mejor para vivir.

Sin embargo, el statu quo del sistema de construcción tradicional de las edificaciones, así como la gestión de sus recursos y residuos, tiene un enfoque basado en el utilitarismo, donde el factor económico determina el curso de los proyectos y es muy resistente a los cambios de estos hábitos de consumismo compulsivo. Para ello, urge políticas de estado basados en la sustentabilidad de los proyectos, basados en una educación ambiental que permita cambiar de hábitos perpetuados en el ejercicio de la construcción por décadas.

III. MÉTODO

Tomando en cuenta los objetivos de esta investigación se clasifica como una investigación aplicada, de naturaleza longitudinal, que contrastara la teoría con la experimentación y tiene como objetivo: investigar, comprobar o reiterar hipótesis sugeridas por los modelos teóricos presentados.

Por consiguiente, para evaluar longitudinalmente la evolución del proceso de carbonatación en el concreto se realizaron una serie de ensayos enfocados a obtener datos que relacionan las variables y los parámetros del concreto con las velocidades de carbonatación.

Basados en estas consideraciones el método y diseño de la investigación, se describen a continuación.

3.1 Tipo de investigación

La investigación experimental es el tipo de estudio que se aplicó en este trabajo. Los autores Sánchez. y Reyes (2015) sostienen que “su objetivo es realizar un experimento que permita demostrar presupuesto e hipótesis explicativas, se trabajar en una relación causa-efecto inmediato por la cual requiere la aplicación del método experimental” (p.50).

3.1.1 Nivel de investigación

Por los objetivos de investigación presentados, la investigación es de naturaleza explicativa, en tanto que, se pretende estudiar las relaciones causales entre las variables independientes: variables: concentración del CO₂, el porcentaje en masa de CaO en la composición del cemento, la humedad relativa, y la cantidad de agentes dopantes y el espesor del proceso de carbonatación inducida en las muestras de pastas, morteros y concreto elaborados con cementos portland tipo I y tipo HS.

3.1.2 Diseño de la investigación

Por la naturaleza experimental del estudio, se desarrolló un diseño experimental con control de las variables. Según Sánchez y Reyes (2015, pp. 135-136); “estos diseños son

principalmente más adecuados que los diseños Pre-experimentales ya que controlan algunas, aunque no todas, las fuentes que amenazan la validez”.

Para el desarrollo de la investigación se fabricaron cuatro series de probetas (1, 2, 3 y 4), sometiéndolos a procesos experimentales de carbonatación bajo condiciones específicas diferentes. Las probetas fueron evaluadas por diversas técnicas instrumentales, en tres momentos diferentes de la experimentación: al inicio, durante el experimento y al final.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población

Según Ary et al. (1978), citado por Sánchez y Reyes, (2015, p.155), la población considera a “todos los miembros de cualquier clase bien definida de personas, eventos u objetos”. En el contexto de la presente investigación, la población está constituida por una cantidad de muestras de la Serie 1 (38), serie 2 (42), serie 3 (126), serie 4 (112) probetas diseñadas según las características de los materiales usados en las construcciones de concreto: cementos Andino Tipo I y Tipo HS para uso en procesos constructivos comunes, las cuales fueron sometidas a carbonatación acelerada, por absorción de CO₂.

3.2.2 Muestra

Según Sánchez y Reyes (2015, p. 156), por diversas razones no se puede estudiar a toda la población objetivo y sostiene que una población accesible se debe “extraer la muestra, de tal forma que está presente efectivamente en dicha población, si la muestra extraída es representativa de la población accesible, los resultados que se obtienen son generalizables para esta población”. Sin embargo, para procesos constructivos con materiales de concreto se diseñarán muestras de probetas de pastas, morteros y concreto según la Tabla 5.

Tabla 5

Resumen de la geometría, relación a/c

Tipo	Serie	Dimensiones Geometría	Relación a/c	Tipo cemento	Dosificación	Curado
-------------	--------------	------------------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------

						HR 99%
Morteros	Serie 1	10x5cm Cilindros	0,45	Tipo I, y Tipo HS	Tabla 7	28 días
Concreto 1	Serie 1	10x5 cm	0,60	Tipo I, y Tipo HS	Tabla 7	28 días
Concreto 2	Serie 1	10x5 cm	0,45	Tipo I, y Tipo HS	Tabla 7	28 días
Pastas	Serie 2	5x5x5 cm Cubos	0,35	Tipo I, y Tipo HS	Tabla 7	28 días
Morteros	Serie 2	5x5x5 cm Cubos	0.55	Tipo I, y Tipo HS	Tabla 7	28 días
Pastas	Serie 3	5x5x5 cm Cubos	0.35	Tipo I, y Tipo HS	Tabla 7	28 días
Morteros	Serie 3	5x5x5 cm Cubos	0.55	Tipo I, y Tipo HS	Tabla 7	28 días
Morteros	Serie 4	1x5 cm Cilindros	0.55	Tipo I, y Tipo HS	Tabla 7	28 días

Nota: Resumen de la geometría, relación a/c, curado y tipos de cementos para pastas, morteros y concreto.

3.3 Operacionalización de variables

Para el presente trabajo, se consideran variables: independiente, dependiente e interviniente; referidos a la carbonatación, el concreto y las construcciones urbanas, así como la emisión de CO₂.

En la Tabla 6, se pueden apreciar las variables, dimensiones e indicadores utilizados en la investigación.

Variable Independiente. Factores externos de carbonatación.

Los indicadores que permiten caracterizar este variable son:

- Porcentaje de CO₂ en ambiente natural y cámara de carbonatación.
- Variación de la humedad relativa.
- Composición del cemento.

Variable Dependiente. Grado de deterioro del concreto.

Los indicadores que permiten caracterizar este efecto son:

- Disminución de la resistencia a la tracción.

- Incremento del porcentaje de la porosidad del concreto.
- Relación agua/cemento.
- Profundidad de carbonatación.
- Porcentaje de absorción de CO₂ por el mortero y concreto

Variable Interviniente. Construcciones urbanas y generadores de CO₂.

Tabla 6

Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
Variable Independiente:	Emisión de CO ₂ por procesos industriales y parque automotor.	Porcentaje de CO ₂ del ambiente Composición del cemento
Factores externos de carbonatación	Construcciones en ambientes urbanos de diferente agresividad atmosférica	Variación de la humedad relativa con la temperatura
Variable Dependiente:	Proceso de Carbonatación.	Profundidad de carbonatación. Incremento del porcentaje de la porosidad del concreto. Incremento de masa % Abs de CO ₂ por concreto
Grado de deterioro del concreto	Implicancias en la durabilidad de las construcciones	Disminución de la resistencia a compresión Relación agua/cemento
Variable Interviniente: Construcciones urbanas de Lima Generadores de CO ₂		

3.4 Instrumentos

Para el desarrollo experimental se fabricaron cuatro series de probetas, que fueron sometieron a diferentes pruebas enfocados a identificar relaciones entre los parámetros que describe a los materiales sometidos a las pruebas de carbonatación, las cuales fueron analizadas en tres momentos del experimento. Las técnicas usadas en la evaluación de las probetas fueron técnicas instrumentales, y los datos utilizados fueron recolectados y procesados por técnicas computacionales.

Para el recojo de información, se utilizó las siguientes técnicas:

De muestreo. Instrumento con el cual se seleccionó las unidades representativas de las probetas, de las diferentes series y luego se obtuvo los datos que permitió extraer inferencias acerca de las muestras sometidas a los efectos de carbonatación acelerada.

Recolección de datos. Se realizó de distintas maneras a través de: Pruebas y Hojas de control

De procesamiento. Para el almacenamiento y procesamiento de datos, se usó hojas de cálculo en Microsoft Excel. La interpretación de la información se realizó a través del análisis de tablas, gráficos y la información de análisis estadísticos de tendencia central y de variabilidad.

3.5 Procedimientos

Para llevar a cabo la investigación se realizaron los siguientes procedimientos:

Planificación. Comprende plantear estrategias para la selección de métodos y técnicas para la obtención y análisis de datos para lograr los objetivos planteados (desarrollo del plan de tesis).

Diseño. Elaboración y validación de las técnicas para caracterizar los ensayos de las diferentes probetas según su geometría.

Ejecución. Comprende la obtención de datos, trabajo de gabinete, elaboración del análisis, conclusiones y recomendaciones.

Evaluación. Comprende la valoración cualitativa y cuantitativa de los resultados que aportaran en beneficio de sociedad. Además, se tomó en cuenta la eficiencia, los costos de construcción, reparación y mantenimiento de la cámara y de los sensores.

Desarrollo experimental. Para evaluar el avance de la profundidad de carbonatación en probetas de pastas, morteros y concretos, se efectuó una serie de pruebas experimentales con el fin de identificar relaciones significativas entre los parámetros que caracterizan al material de cementos tipo I y tipo HS sometidos a diferentes procesos de carbonatación acelerada.

Preparación de las muestras Las probetas de pastas, morteros, y concreto fueron elaborados con cementos portland Andino Tipo I Premium y cementos portland Andino Tipo HS Ultra. La Tabla 7, 8, 9 y 10 resumen las características de cada una de las muestras para la dosificación de las series.

Tabla 7
Dosificación para pastas, morteros y concretos de la serie 1

Serie 1 - Dosificación para Probetas 10 x 5 cm (Por Cada Espécimen)					
Componentes (gr)	Mortero				
	Tipo I y Tipo HS				
	Patrón	Carbono	Vidrio	IMP	NTC
Cemento	250	247.5	247.5	247.5	247.5

Arena	687.5	687.5	687.5	687.5	687.5					
Agua	137.5	137.5	137.5	137.5	137.5					
Adición	-----	2.5	2.5	2.5	2.5					
a/c	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55					
Componente (g)	Concreto I					Concreto II				
	Tipo I -Tipo HS					Tipo I - Tipo HS				
	Patrón	Carbono	Vidrio	IMP	NTC	Patrón	Carbono	Vidrio	IMP	NTC
Cemento	225	222.75	222.75	222.75	222.75	250	247.5	247.5	247.5	247.5
Arena	510.5	510.5	510.5	510.5	510.5	455.5	455.5	455.5	455.5	455.5
Piedra	471.5	471.5	471.5	471.5	471.5	474.5	474.5	474.5	474.5	474.5
Agua	135	135	135	135	135	112.5	112.5	112.5	112.5	112.5
Adición	-----	2.25	2.25	2.25	2.25	-----	2.5	2.5	2.5	2.5
a/c	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45

Tabla 8

Dosificación para pastas, morteros y concretos de la serie 2

Componentes (gr)	Pasta		Mortero				
	Tipo I y Tipo HS		Tipo I y Tipo HS				
	Patrón	Carbono	Patrón	Carbono	Vidrio	IMP	NTC
Cemento	250	247.5	100	99	99	99	99
Arena	-----	-----	275	275	275	275	275
Agua	87.5	87.5	55	55	55	55	55
Adición	-----	2.5	-----	1	1	1	1
a/c	0.35	0.35	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55

Nota: Serie 2 - Dosificación para Cubos 5 x 5 x 5 cm (Por Cada Espécimen)

Tabla 9

Dosificación para pastas, morteros y concretos de la serie 3

Componentes (gr)	Pasta		Mortero				
	Tipo I y Tipo HS		Tipo I y Tipo HS				
	Patrón	Carbono	Patrón	Carbono	Vidrio	IMP	NTC

Cemento	245	242.55	78	77.2	77.2	77.2	77.2
Arena	-----	-----	214	214	214	214	214
Agua	770	770	39	39	39	39	39
Adición	-----	2.45	-----	0.8	0.8	0.8	0.8
a/c	0.35	0.35	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55

Nota: Serie 3 - Dosificación para Cubos 5 x 5 x 5 cm (Por Cada Espécimen)

Tabla 10

Dosificación para pastas, morteros y concretos de la serie 4

Componentes (gr)	Mortero				
	Tipo I y Tipo HS				
	Patrón	Carbono	Vidrio	IMP	NTC
Cemento	12.5	12.35	12.35	12.35	12.35
Arena	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5
Agua	7	7	7	7	7
Adición	-----	0.15	0.15	0.15	0.15
a/c	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55

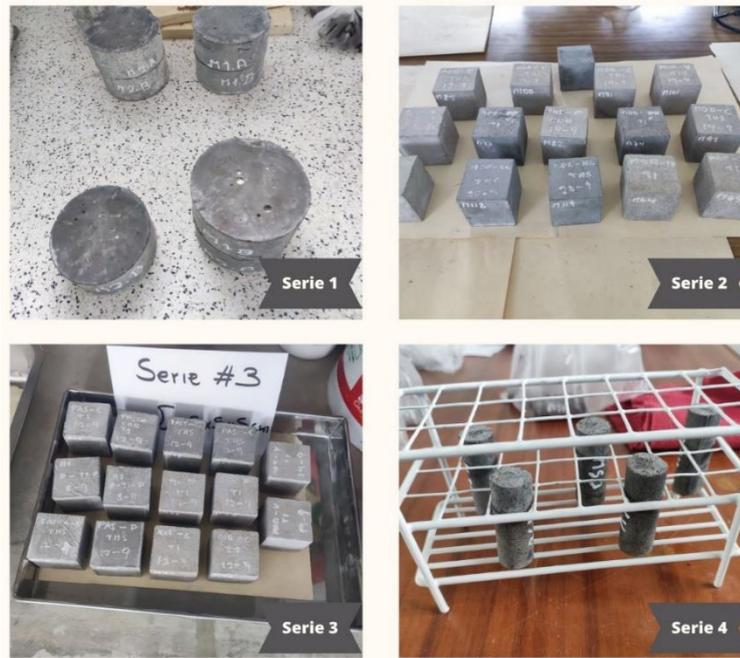
Nota: Serie 4 - Dosificación para Probetas 1.5 x 5 cm (Por Cada Espécimen).

En la Figura 8 se pueden observar las probetas fabricadas de pastas, morteros y concreto de cementos Andino Tipo I Premium y cemento Andino Tipo HS Ultra.

Figura 8

Probetas fabricadas de pastas, morteros y concreto

3.5.1



Características para el diseño de las probetas

En la Tabla 8 resumen las características de cada las muestras de pasta, mortero, y concreto que se fabricaron para el presente estudio. Las tablas resumen las características tales como la geometría de las probetas, sus dimensiones, la relación agua/cemento, el tipo de cemento, la dosificación; además de registrar el tiempo de curado de cada una de las muestras fabricadas. La elaboración de las muestras de concreto, mortero y pastas cumplen con todas las normas: ASTM C109/C109M-2012 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars”

ASTM C305-14 “Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency”.

Requisitos técnicos para el cemento hidráulico (Referidos en la NTP 334.009:2020, NTP 334.082:2020 y NTP 334.090:2020 o ASTM C150/C150M-20, ASTM C595/C595M-20 y ASTM C 1157-C1157M-20)

De esta manera se asegura la reproductibilidad del concreto para ser usados en la industria de la construcción.

Para la elaboración de las probetas cilíndricas de 10x5 cm, cubos de 5x5x5 cm y cilindros de 1.5x5 cm; se utilizaron los cementos andinos indicados en la Tabla 10, donde se pueden apreciar las características de cementos utilizados para la fabricación de probetas (pastas, morteros y concreto); para luego ser sometidas al proceso de carbonatación acelerada en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, tal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11

Características de cementos utilizados para la fabricación de probetas

Muestra	Cemento	% Clinker	% Adiciones	% SiO₂	% Al₂O₃	% Fe₂O₃	% CaO	% SO₃	% MgO
MA1	Tipo I Andino	90 -95	-----	19,54	6,61	3,23	63,06	2,53	1,70
MB1	Tipo HS Andino	72- 75	-----	29,62	9,26	4,64	54,91	5,08	1,79
MA2	Tipo I Andino	90-95	1% Carbón	19,54	6,61	3,23	63,06	2,53	1,70
MB2	Tipo HS Andino	72 -75	1% Carbón	29,62	9,26	4,64	54,91	5,08	1,79
MA3	Tipo I Andino	90-95	1% Nanotubos de Carbono	19,54	6,61	3,23	63,06	2,53	1,70
MB3	Tipo HS Andino	72-75	1% Nanotubos	29,62	9,26	4,64	54,91	5,08	1,79

		de		Carbono					
MA4	Tipo I Andino	90-95	1% IP	19,54	6,61	3,23	63,06	2,53	1,70
MB4	Tipo HS Andino	72-75	1% IP	29,62	9,26	4,64	54,91	5,08	1,79
MA5	Tipo I Andino	90-95	1% Vidrio	19,54	6,61	3,23	63,06	2,53	1,70
MB5	Tipo HS Andino	72-75	1% Vidrio	29,62	9,26	4,64	54,91	5,08	1,79

Tabla 12

Tratamiento de carbonatación de pastas, morteros y concreto cilíndricos

Muestr a	Cemento	Carbonataci ón	Adiciones	% HR	% CO ₂	Tiempo
MA1	Tipo I Andino	Acelerada	-----	75 -85	10	120 horas
MB1	Tipo HS Andino	Acelerada	-----	75 - 85	10	120 horas
MA2	Tipo I Andino	Acelerada	Carbón	75 - 85	10	240 horas
MB2	Tipo HS Andino	Acelerada	Carbón	75 - 85	10	240 horas
MA3	Tipo I Andino	Acelerada	Nanotubos de Carbono	75 - 85	10	240 horas
MB3	Tipo HS Andino	Acelerada	Nanotubos de Carbono	75 - 85	10	240 horas
MA4	Tipo I Andino	Acelerada	IP	75 - 85	10	240 horas

MB4	Tipo Andino	HS	Acelerada	IP	75 - 85	10	240 horas
MA5	Tipo I Andino		Acelerada	Vidrio	75 - 85	10	240 horas
MB5	Tipo Andino	HS	Acelerada	Vidrio	75 - 85	10	240 horas

Nota: Condiciones para carbonatación acelerada de muestras de cemento con y sin adiciones: porcentaje de humedad relativa, porcentaje de CO₂ y tiempo.

3.5.2 Tratamiento y periodos de exposición de las probetas

Las probetas elaboradas para los ensayos de carbonatación acelerada de cementos Andino Tipo I y Tipo HS utilizados en la fabricación de las Series 1, 2, 3 y 4 pasaron por las siguiente tres etapas de exposición:

Proceso de curado. En este proceso se sometió a hidratación las muestras de pasta, morteros y concreto en agua con cal por un periodo de 28 días para remplazar el agua perdida por las reacciones de hidratación de la pasta de cemento y por la evaporación.

Exposición en el ambiente del laboratorio. Las diferentes muestras fueron expuestas a las condiciones del laboratorio, considerando una temperatura entre 16°C y 20°C, así como humedades relativas entre 85% y 95%. Adicionalmente para lograr un equilibrio entre el exterior y el interior de los poros de las muestras, se consideró un periodo entre de 10 y 20 días, antes de ser sometido al proceso de carbonatación acelerada. Estas probetas se tomaron como muestras de control.

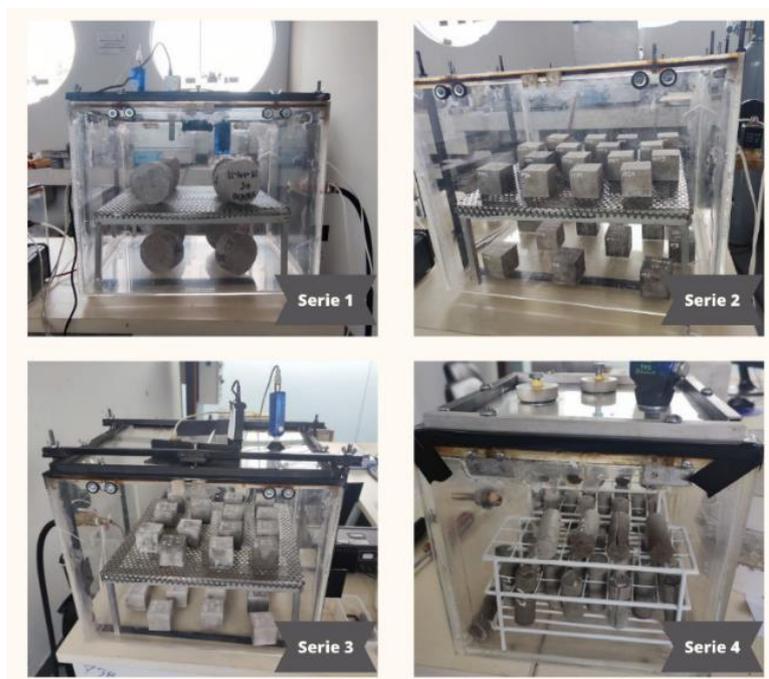
Exposición en la cámara de carbonatación acelerada. En este periodo las muestras dispusieron en una cámara de carbonatación condicionada para el control CO₂, HR, temperatura. Este periodo de exposición en la cámara (t), es el tiempo necesario para que la

carbonatación alcance una profundidad lineal (x) a una mayor concentración de CO₂ (5%-10%). Al finalizar el periodo de exposición establecido se cerró la alimentación del CO₂.

En la Figura 9 se presenta la Cámara de Carbonatación implementada para el desarrollo de la presente investigación.

Figura 9

Cámara de carbonatación utilizado en la investigación



Nota: Cámara de carbonatación acelerado con control de sensores de CO₂, HR, temperatura con muestras de las series 1, 2, 3 y 4.

3.6 Análisis de datos

Para el desarrollo de la presente investigación, se fabricaron cuatro series de probetas, que han sido expuestas a procesos acelerados de carbonatación. La Tabla 13 nos muestra resumen de las muestras elaboradas para el proceso de carbonatación según su geometría.

Tabla 13

Resumen de las muestras elaboradas para el proceso de carbonatación

	Mortero	Concreto	Pastas	Mortero	Mortero
Carbonatación	Cilindros	Cilindros	Cubos	Cubos	Cilindros
	10x5 cm	10x5 cm	5x5x5 cm	5x5x5 cm	1.5x5 cm

Control						
0.039 % CO ₂	X	X	X	X	X	X
Acelerada						
3 - 5 % CO ₂						X
Acelerada						
10 % CO ₂	X	X	X	X	X	

Nota: Geometría de muestras para carbonatación acelerada de las series de muestras 1,2, 3 y 4.

Antes, después y durante las carbonataciones, las probetas fueron analizadas mediante el uso de técnicas instrumentales cuantitativas.

Las técnicas para caracterizar las probetas carbonatadas han sido las siguientes:

Ensayos de profundidad de muestras carbonatadas.

Medidas de variación de pH

Difracción de rayos X (DRX).

Medida de porosidad

Medida de variación de masa

Ensayos de Resistividad.

Prueba de Resistencia a la Compresión

Tabla 14

Técnicas de caracterización experimental de probetas

Técnicas	Pastas Cubos 5x5x5 cm	Mortero Cubos 5x5x5 cm	Mortero Cilindro 10x5 cm	Concreto I Cilindro 10x5 cm	Concreto II Cilindro 10x5 cm	Mortero Cilindro 1.5 x5 cm
Indicador de pH	X	X	X	X	X	X
Fenolftaleína						
Difracción de rayos X		X				
Medida de peso	X	X	X	X	X	X

Porosidad	X	X	X	X	X	X
Resistividad	X	X				
Resistencia a la compresión	X	X				

Nota: Técnicas para la caracterización experimental de probetas: carbonatación acelerada.

IV. RESULTADOS

4.1 Carbonatación acelerada de pastas, morteros y concreto – Serie 1

En esta parte de la investigación se muestran los resultados experimentales obtenidos en la cámara de carbonatación acelerada de pastas, morteros, a estas muestras carbonatadas se les hizo la medida de profundidad de carbonatación y el cambio de pH, medida de peso, resistividad, resistencia a compresión.

4.1.1 Procedimiento de medida de la profundidad de carbonatación

Se elaboraron 30 especímenes de concreto de la Serie 1 (10x5 cm), 42 especímenes de pastas, morteros de la Serie 2 (5x5x5 cm), 126 especímenes de la Serie 3 (5x5x5 cm) y 80 especímenes de la Serie 4 (1.5x5 cm), para ser sometido a un control previo de acondicionamiento de estos al ambiente del laboratorio para luego proceder al proceso de carbonatación acelerada en la cámara al 10% de CO₂ y una humedad relativa entre 85% y 95% respectivamente. Se usaron tres relaciones agua cemento (a/c: 0.45, 0.55, 0.60), para los cementos Andino Tipo I y Tipo HS con sus respectivas adiciones.

Las determinaciones de las profundidades de carbonatación se realizaron tomando tres especímenes por tipo de mezcla, que fueron removidas de la cámara a los 10, 15 y 17 días, para la Serie 2. También se removieron a los 5, 10 y 15 días para la Serie 3; para la Serie 4 se removieron por lotes cada dos días de carbonatación de 2% a 10% CO₂. Las muestras carbonatadas se partieron en dos mitades, seguidamente se aplicó una solución alcohólica de fenolftaleína al 1% sobre la superficie recién cortada, y se midieron las profundidades carbonatadas con la ayuda de un vernier digital. Las medidas se realizaron siguiendo los criterios establecidos por RILEM (1988).

4.1.1.1 *Resultados en muestras de Series estudiadas 1*

Datos sobre profundidad de carbonatación y variación de PH serie 1 Para las pruebas de carbonatación acelerada para muestras de la serie 1, después de haber cumplido los 28 días

de curado, las muestras cilíndricas de 10x20 cm fueron seccionadas en 4 partes de 10x5cm c/u y acondicionadas a los ambientes de laboratorio y realizando pesadas, hasta obtener masas constantes, luego fueron colocadas a la cámara de carbonatación en ambiente controlado de sensores de 5% CO₂ y H.R entre 85-90%, durante 10 días, en la tabla (15) se muestra las profundidades alcanzadas por los morteros y concretos de cementos andino tipo I , tipo HS y sus adicciones.

Tabla 15

Profundidad de carbonatación (mm)

Muestra	Adicciones	Profundidad de Carbonatación X (mm)	Kc
1M-MA1	-----	4.03	24.19
1M-MA2	Vidrio	4.47	26.89
1M-MA3	Carbono	4.61	27.77
1M-MA4	IP	4.56	27.45
1M-MA5	NTC	1.52	8.94
1C1-MA1	-----	3.58	21.46
1C1-MA2	Vidrio	3.67	21.97
1C1-MA3	Carbono	5.55	33.43
1C1-MA4	IP	4.93	29.63
1C1-MA5	NTC	3.16	18.94
1C2-MA1	-----	2.06	12.18
1C2-MA2	Vidrio	3.35	19.96
1C2-MA3	Carbono	2.79	16.57
1C2-MA4	IP	2.62	15.5
1C2-MA5	NTC	1.52	8.87

Nota: Profundidad de carbonatación (mm) de morteros y concreto 1, concreto 2. Cemento Andino Tipo I Serie 1.

Tabla 16

Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación

	N	Rango	Mín	Máx	Media	Desv. Est.	Varianza	coeficiente de variación (CV)	
Profun. carbonata	15	4.03	1.52	5.55	3.4947	0.31766	1.23030	1.514	35.20%

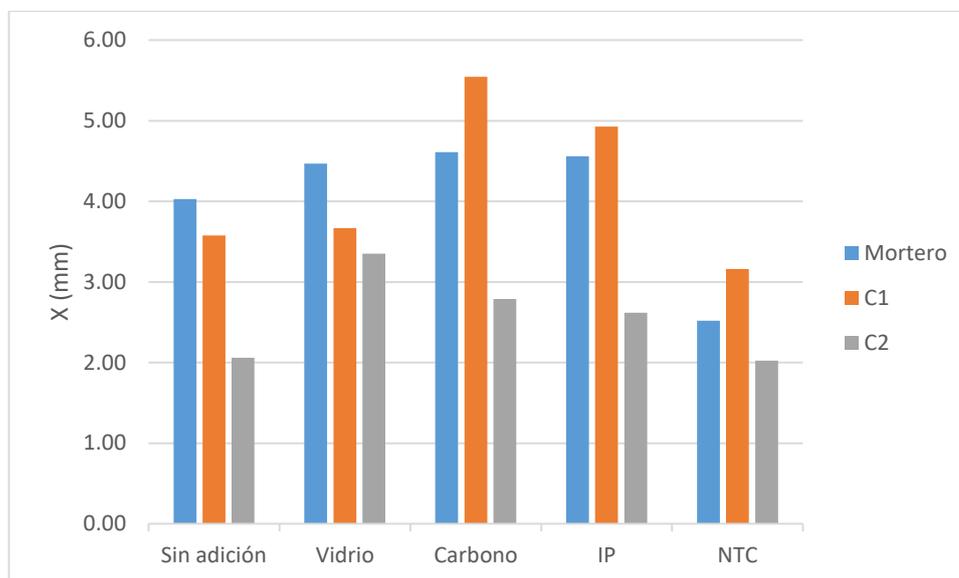
Kc 15 24.56 8.87 33.43 20.91 1.9369 7.50194 56.279 35.87%

67 9

Nota: Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación (mm) y Kc de morteros y concreto 1, concreto 2 Cemento Andino Tipo 1 de Serie

Figura 10

Profundidad de carbonatación, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo I



Nota: Profundidad de carbonatación, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo I y adiciones: vidrio, carbono, Impermeabilizante (IP), nano tubo de carbono (NTC).

Al término de 10 días de carbonatación acelerada expuesta al 5% de CO₂ de cemento

Tipo 1, se observa en la figura 10 que el mortero del concreto 1 presenta mayor profundidad de carbonatación que el mortero del concreto 2 con las diferentes adiciones.

Tabla 17

Profundidad de carbonatación de morteros

Muestra	Adiciones	Profundidad de Carbonatación X (mm)	Kc
1M-MB1	-----	3.41	20.42
1M-MB2	Vidrio	3.50	21.00
1M-MB3	Carbono	2.65	15.86
1M-MB4	IP	4.58	27.57
1M-MB5	NTC	3.32	19.95
1C1-MB1	-----	3.62	21.70
1C1-MB2	Vidrio	3.87	23.19
1C1-MB3	Carbono	4.48	26.95
1C1-MB4	IP	4.11	24.65
1C1-MB5	NTC	3.91	24.00

1C2-MB1	-----	3.99	23.97
1C2-MB2	Vidrio	3.95	23.63
1C2-MB3	Carbono	4.01	24.04
1C2-MB4	IP	3.26	19.43
1C2-MB5	NTC	2.85	17.06

Nota: Profundidad de carbonatación (mm) de morteros y concreto 1, concreto 2 Cemento Andino Tipo HS de Serie 1.

Tabla 18

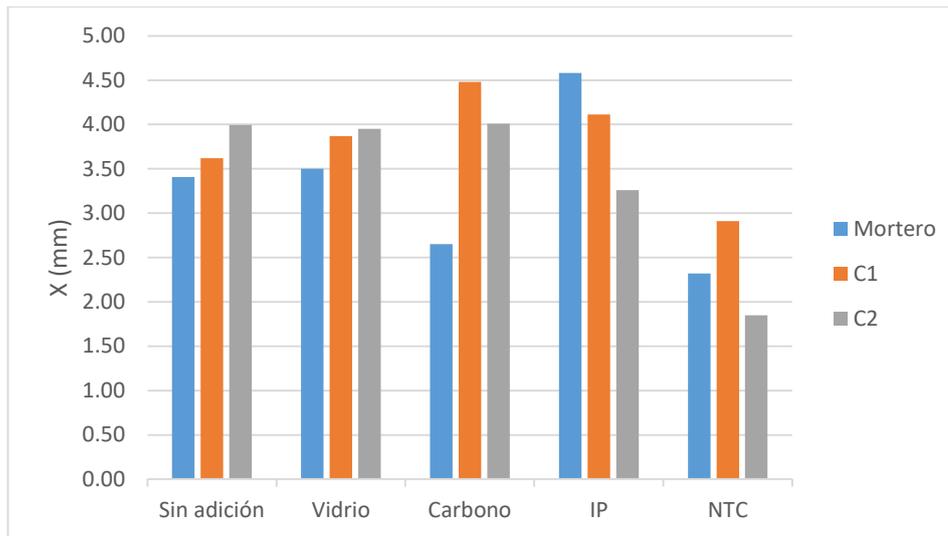
Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación

	N	Ran go	Mínim o	Máxi mo	Media	Desv. Desviaci ón	Varia nza	Curtosis	coeficie nte de variación (CV)		
	Esta d.	Esta d.	Estad.	Estad.	Esta d.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Esta d.	Desv. Error	Estad.
Profu n. Carbo n.	15	1.93	2.65	4.58	3.701	0.1407 5	0.54511	0.297	- 0.25 0	1.121	14.73%
Kc	15	11.7 1	15.86	27.57	22.22 8	0.8574 1	3.32074	11.027	- 0.30 0	1.121	14.94%

Nota: Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación (mm) y Kc de morteros y concreto 1, concreto 2 Cemento Andino Tipo HS de Serie 1.

Figura 11

Profundidad de carbonatación, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo HS

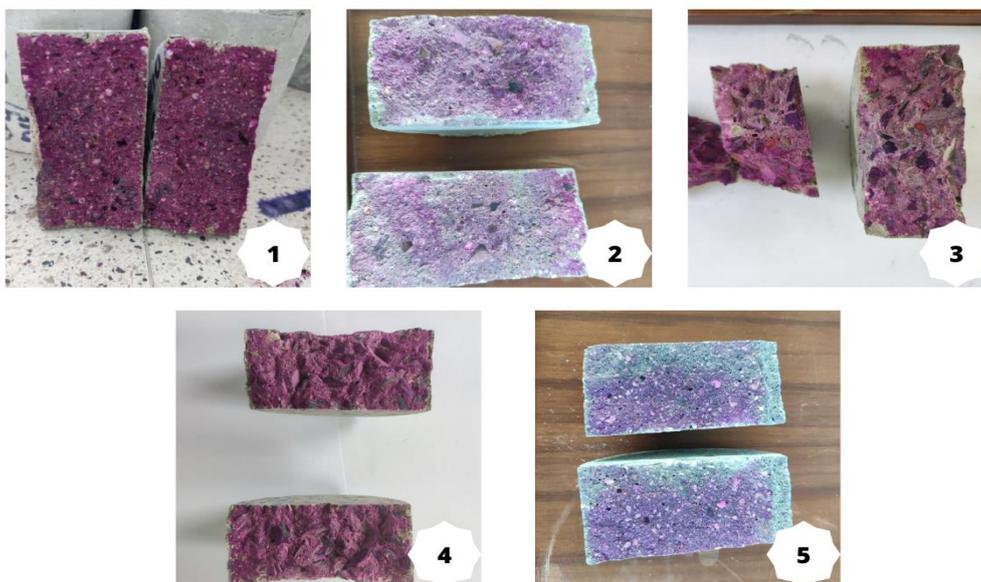


Nota: Profundidad de carbonatación, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo HS y adiciones: vidrio, carbono, Impermeabilizante (IP), nano tubo de carbono (NTC)

En la figura 11 se aprecia tras el término de la carbonatación de 10 días a 10% de concentración de CO_2 de cemento tipo HS se logra apreciar que las muestras de mortero, C1 y C2 con adición de NTC presentan menor profundidad de carbonatación.

Figura 12

Muestras carbonatadas – Serie 1



Nota: Muestras carbonatadas – Serie 1. (1. Sin Adición; 2. Carbono; 3. IP; 4. NTC 5. Vidrio).

La Tabla 19 resume la disminución del pH de muestras de carbonatación de morteros y concretos de cemento tipo I – Serie I.

Tabla 19

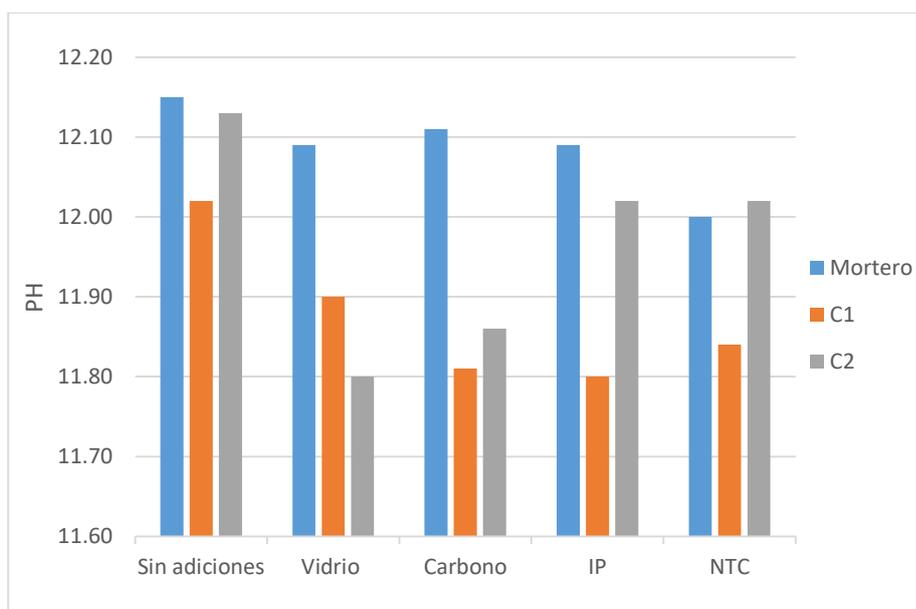
Variación de pH en proceso de carbonatación

Muestra	pH
M - T1	12.15
M - T1 - V	12.09
M - T1 - C	12.11
M - T1 - IP	12.09
M - T1 - NTC	12.00
C1 - T1	12.02
C1 - T1 - V	11.90
C1 - T1 - C	11.81
C1 - T1 - IP	11.80
C1 - T1 - NTC	11.84
C2 - T1	12.13
C2 - T1 - V	11.80
C2 - T1 - C	11.86
C2 - T1 - IP	12.02
C2 - T1 - NTC	12.02

Nota: Carbonatación de Mortero y concreto de cemento T1 - Serie 1. Los códigos de las muestras analizadas se encuentran en la Tabla 12.

Figura 13

Variación de pH en muestras carbonatadas - Serie 1



Nota: Variación de pH en muestras carbonatadas de Mortero y concreto Cemento Andino Tipo I-Serie 1

En la figura 13 se logra apreciar que la lectura de pH que el concreto 1 (C1: a/c = 0.60) presenta mayor pH que el concreto 2 (C2: a/c = 0.45) con las diferentes adiciones para el tipo I de cementos andino. En la Tabla 20 se muestran los estadísticos descriptivos de los datos del pH en el proceso de carbonatación de morteros y concretos de cemento tipo 1 – Seri 1.

Tabla 20

Estadística descriptiva Variación de pH en proceso de carbonatación

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.		
pH	15	0.35	11.80	12.15	11.9760	0.03321	0.12861	0.017	-1.606	1.121	1.07%

Nota: proceso de carbonatación de Mortero y concreto de cemento T1 - Serie 1

Tabla 21

Variación de pH en proceso de carbonatación

Muestra	pH
M - THS	12.84
M - THS - V	12.77

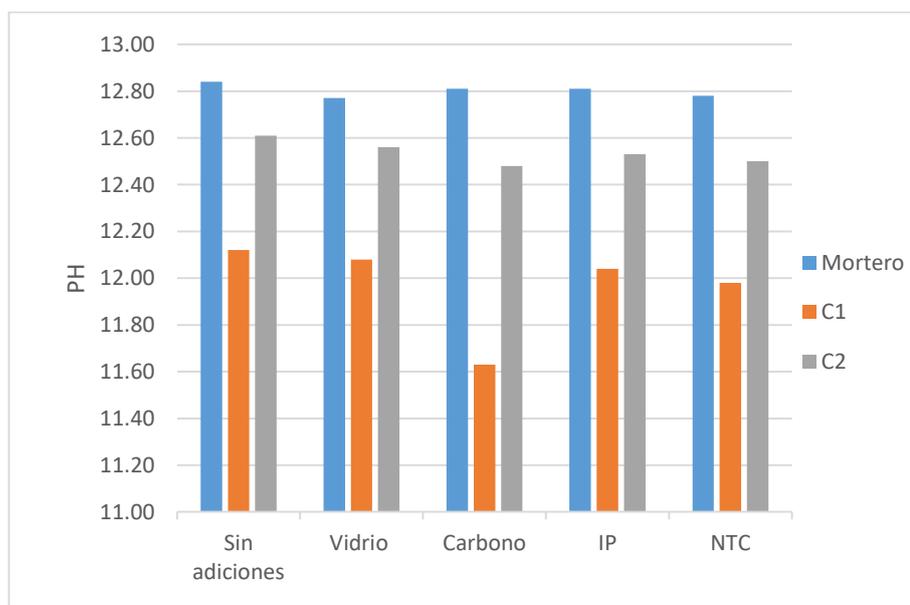
M - THS - C	12.81
M - THS - IP	12.81
M - THS - NTC	12.78
C1 - THS	12.12
C1 - THS - V	12.08
C1 - THS - C	11.63
C1 - THS - IP	12.04
C1 - THS - NTC	11.98
C2 - THS	12.61
C2 - THS - V	12.56
C2 - THS - C	12.48
C2 - THS - IP	12.53
C2 - THS - NTC	12.50

Nota: Variación de pH en proceso de carbonatación de Mortero y concreto de cemento THS - Serie 1

La Figura 14 muestra el cambio de pH de morteros y concretos carbonatados de cemento tipo HS – Serie 1

Figura 14

Variación de pH en muestras carbonatadas– Serie 1



Nota: Muestras carbonatadas de Mortero y concreto Cemento Andino Tipo HS – Serie 1.

En la figura 14 se logra apreciar que la lectura de pH que el concreto 1 (C1: a/c = 0.60) presenta mayor pH que el concreto 2 (C2: a/c = 0.45) con las diferentes adiciones para el tipo HS de cementos andino.

Tabla 22

Estadística descriptiva Variación de pH en proceso de carbonatación

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
		Estad. Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.
pH	15	1.21	11.63	12.84	12.4360	0.09696	0.37553	0.141	-0.402	1.121	3.02%

Nota: Estadística descriptiva Variación de pH en proceso de carbonatación de Mortero y concreto de cemento THS - Serie 1.

4.1.1.2 Cálculo de los coeficientes de Carbonatación

En la figura 15 se logra apreciar que las muestras con adiciones de NTC de carbono de cemento tipo I presentan menor %CO₂ absorbido en comparación a las muestras con y sin otras adicciones.

Tabla 23

Coefficiente de carbonatación kc, ka

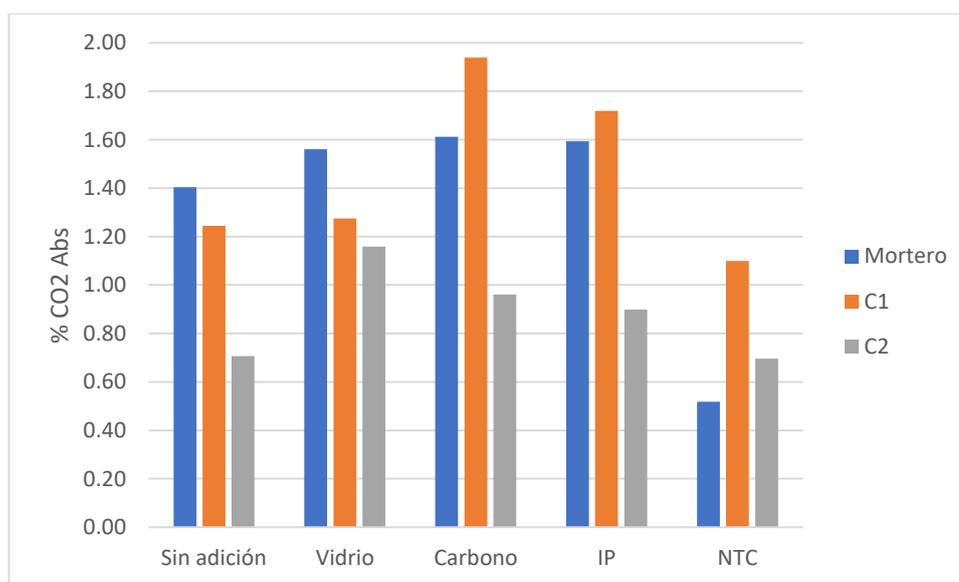
Muestra	Adicciones	Kc (mm/año ½)	Ka (mm/año ½)	% CO ₂ Abs
1M-MA1	-----	24.20	1.52	1.40
1M-MA2	Vidrio	26.89	1.69	1.56
1M-MA3	Carbono	27.77	1.75	1.61
1M-MA4	IP	27.45	1.73	1.59
1M-MA5	NTC	8.94	0.56	0.52
1C1-MA1	-----	21.44	1.35	1.24
1C1-MA2	Vidrio	21.96	1.38	1.27
1C1-MA3	Carbono	33.42	2.11	1.94

1C1-MA4	IP	29.61	1.87	1.72
1C1-MA5	NTC	18.95	1.19	1.10
1C2-MA1	-----	12.18	0.77	0.71
1C2-MA2	Vidrio	19.96	1.26	1.16
1C2-MA3	Carbono	16.56	1.04	0.96
1C2-MA4	IP	15.50	0.98	0.90
1C2-MA5	NTC	11.99	0.76	0.70

Nota: Coeficiente de carbonatación k_c , k_a , de morteros y concreto 1, concreto 2. Cemento Andino Tipo I - Serie 1

Figura 15

Ganancia de CO₂ (%) de, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo I y aditivos



Nota: Ganancia de CO₂ (%) de, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo I y adiciones: vidrio, carbono, Impermeabilizante (IP), nanotubos de carbono (NTC)

Tabla 24

Estadística descriptiva de porcentaje de absorción de CO₂

N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)
Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Estad.

%CO ₂ Abs.	15	1.42	0.52	1.94	1.2253	0.10727	0.41545	0.173	- 0.876	1.121	33.91%
--------------------------	----	------	------	------	--------	---------	---------	-------	------------	-------	--------

Nota: porcentaje de absorción de CO₂ morteros y concreto 1, concreto 2. Cemento Andino Tipo I – Serie 1.

Tabla 25

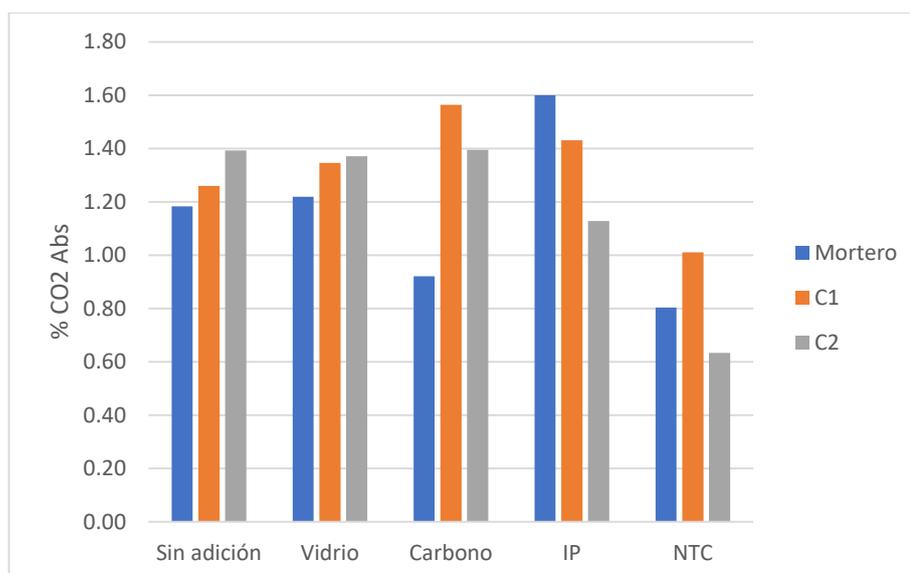
Coefficiente de carbonatación kc, ka

Muestra	Adiciones	Kc (mm/año ^{1/2})	Ka (mm/año ^{1/2})	% CO ₂ Abs.
1M-MB1	-----	20.40	1.29	1.18
1M-MB2	Vidrio	21.00	1.32	1.22
1M-MB3	Carbono	15.86	1.00	0.92
1M-MB4	IP	27.57	1.74	1.60
1M-MB5	NTC	13.86	0.87	0.80
1C1-MB1	-----	21.70	1.37	1.26
1C1-MB2	Vidrio	23.19	1.46	1.35
1C1-MB3	Carbono	26.95	1.70	1.56
1C1-MB4	IP	24.66	1.55	1.43
1C1-MB5	NTC	17.42	1.10	1.01
1C2-MB1	-----	23.99	1.51	1.39
1C2-MB2	Vidrio	23.63	1.49	1.37
1C2-MB3	Carbono	24.03	1.51	1.39
1C2-MB4	IP	19.43	1.22	1.13
1C2-MB5	NTC	10.93	0.69	0.63

Nota: Coeficiente de carbonatación kc, ka, de morteros y concreto 1, concreto 2. Cemento Andino Tipo HS – Serie 1

Figura 16

Ganancia de CO₂ (%)



Nota: Ganancia de CO₂ (%) de, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo HS y adiciones: vidrio, carbono, Impermeabilizante (IP), nanotubos de carbono (NTC).

En la figura 16 se logra apreciar que las muestras con adiciones de NTC de carbono de cemento tipo HS presentan menor %CO₂ absorbido en comparación a las muestras con y sin otras adicciones.

Tabla 26

Estadística descriptiva de porcentaje de absorción de CO₂.

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
									Desv. Error	Desv. Error	
%CO ₂ Abs.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	
%CO ₂ Abs.	15	0.97	0.63	1.60	1.2160	0.07141	0.27658	0.076	-0.052	1.121	22.75%

Nota: porcentaje de absorción de CO₂ morteros y concreto 1, concreto 2. Cemento Andino Tipo HS – Serie 1

4.1.1.2 Incremento de masa, en mortero y concreto. Serie 1

El control de masa se realizó antes y después de someter las muestras al proceso de carbonatación acelerada, para luego determinar el incremento de la mismas.

Tabla 27

Ganancia de masa carbonatada (g)

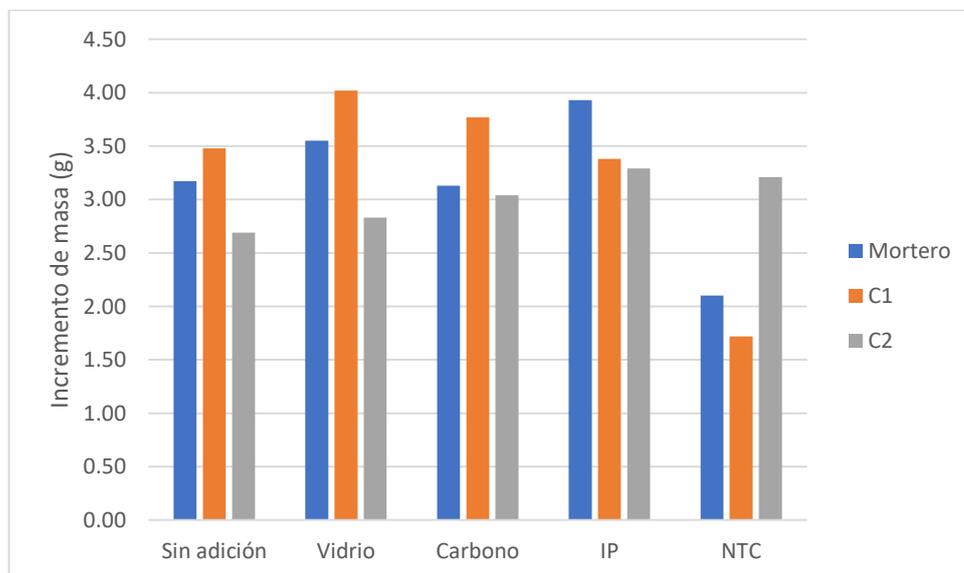
Muestra	Adiciones	Masa carbonatar (g)	sin Masa carbonatada 10 Días (g)	Incremento de masa carbonatada (g)
1M-MA1	-----	797.00	800.17	3.17
1M-MA2	Vidrio	833.00	836.55	3.55
1M-MA3	Carbono	853.00	856.13	3.13
1M-MA4	IP	778.00	781.93	3.93
1M-MA5	NTC	825.00	827.1	2.1
1C1-MA1	-----	843.34	846.82	3.48
1C1-MA2	Vidrio	886.83	890.85	3.99
1C1-MA3	Carbono	808.05	811.82	3.77
1C1-MA4	IP	805.63	809.01	3.38
1C1-MA5	NTC	803.55	805.27	1.72
1C2-MA1	-----	907.02	909.71	2.69
1C2-MA2	Vidrio	880.63	883.46	2.83
1C2-MA3	Carbono	857.10	860.14	3.04
1C2-MA4	IP	950.98	954.27	3.29
1C2-MA5	NTC	924.62	927.83	3.21

Nota: Ganancia de masa carbonatada (g), de morteros y concreto 1, concreto 2. Cemento

Andino Tipo -Serie 1.

Figura 17

Ganancia de masa carbonatada (g)



Nota: Ganancia de masa de, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo I y adiciones: vidrio, carbono, Impermeabilizante (IP), nanotubos de carbono (NTC) serie 1

En la figura 17 las muestras de C1 de cemento tipo 1 presentan mayor incremento de masa que muestras de C2, las muestras con adición de NTC presentan el menor incremento de masa.

Tabla 28

Estadística Descriptiva de la Ganancia de masa

	N	Rango		Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)	
		Estad.	Estad.								Estad.
Inc. Masa	15	2.27	1.72	3.99	3.1520	0.16209	0.62779	0.394	0.852	1.121	19.92%

Nota: Ganancia de masa (g), de morteros y concreto 1, concreto 2. Cemento Andino Tipo I - Serie 1

Tabla 29

Ganancia de masa carbonatada (g)

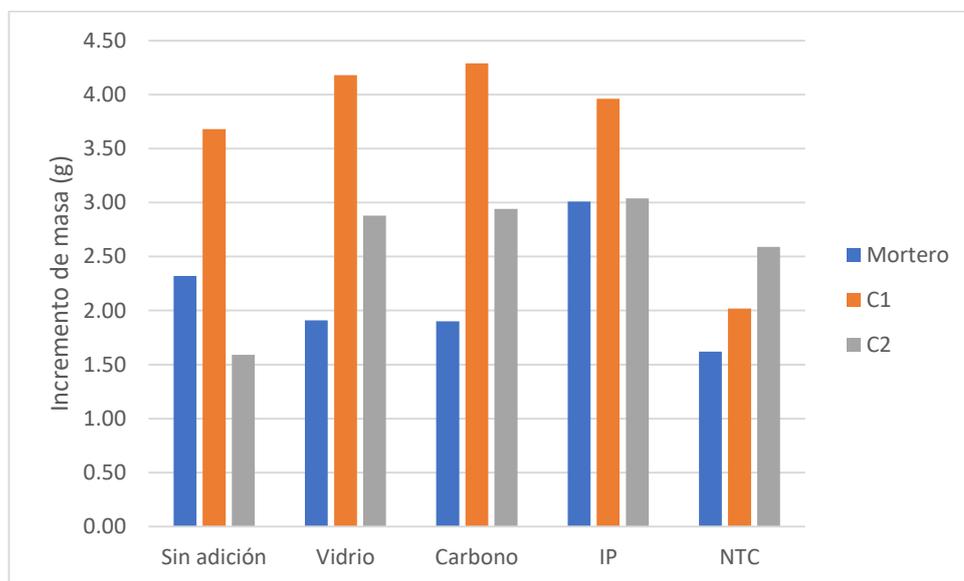
Muestra	Adiciones	Masa sin carbonatar (g)	Masa carbonatada 10 Días (g)	Incremento de masa carbonatada (g)
1M-MB1	-----	799.00	801.32	2.32
1M-MB2	Vidrio	881.00	882.91	2.91
1M-MB3	Carbono	788.00	789.9	1.9
1M-MB4	IP	831.23	834.24	3.01
1M-MB5	NTC	786.45	788.07	2.62
1C1-MB1	-----	823.37	827.05	3.68
1C1-MB2	Vidrio	796.88	801.06	4.18
1C1-MB3	Carbono	798.61	802.90	4.29
1C1-MB4	IP	799.25	803.21	3.96
1C1-MB5	NTC	797.12	799.14	3.02
1C2-MB1	-----	907.43	909.02	1.59
1C2-MB2	Vidrio	776.93	779.81	2.09
1C2-MB3	Carbono	942.68	945.62	2.94
1C2-MB4	IP	790.19	793.23	3.04
1C2-MB5	NTC	844.24	846.83	2.59

Nota: Ganancia de masa (g), de morteros y concreto 1, concreto 2 Cemento Andino Tipo HS

Serie 1.

Figura 18

Ganancia de masa carbonatada (g) de la Serie 1



Nota: Ganancia de masa (g) de CO₂ de mortero, concreto 1 y 2 – Tipo HS y adiciones: vidrio, carbono, Impermeabilizante (IP), nanotubos de carbono (NTC). Serie 1

En la figura 18 las muestras de C1 de cemento tipo HS presentan mayor incremento de masa que muestras de C2, las muestras con adición de NTC presentan el menor incremento de masa.

Tabla 30

Estadística Descriptiva Ganancia de masa (g) de CO₂.

	N	Rango		Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
		Estad.	Estad.						Estad.	Estad.	
Incremento de Masa	15	2.70	1.59	4.29	2.9427	0.20938	0.81091	0.658	-0.658	1.121	27.56%

Nota: Ganancia de masa (g), de morteros y concreto 1, concreto 2. Cemento Andino Tipo HS - Serie 1

4.1.1.3 Determinación de la Porosidad. Serie 1

El porcentaje de porosidad se calculó usando la ecuación 31, tomando en cuenta la densidad aparente y la densidad seca, antes y después de la carbonatación.

Tabla 31

Cálculo de porosidad del cemento tipo 1

Muestra	Adiciones	Densidad Aparente (g/cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)
1M-MA1	-----	2.32	2.18	6.16
1M-MA2	Vidrio	2.40	2.20	8.35
1M-MA3	Carbono	2.35	2.20	6.43
1M-MA4	IP	2.39	2.19	8.35
1M-MA5	NTC	2.39	2.20	8.16
1C1-MA1	-----	2.45	2.25	7.80
1C1-MA2	Vidrio	2.49	2.26	9.11
1C1-MA3	Carbono	2.50	2.25	9.76
1C1-MA4	IP	2.47	2.28	7.84
1C1-MA5	NTC	2.42	2.30	5.06
1C2-MA1	-----	2.62	2.37	9.61
1C2-MA2	Vidrio	2.57	2.32	9.58
1C2-MA3	Carbono	2.58	2.32	9.85
1C2-MA4	IP	2.59	2.34	9.69
1C2-MA5	NTC	3.58	3.26	8.73

Nota: Porosidad de morteros y concreto 1, concreto 2 Cemento Andino Tipo I. Serie 1

Tabla 32

Cálculo de porosidad del cemento tipo HS

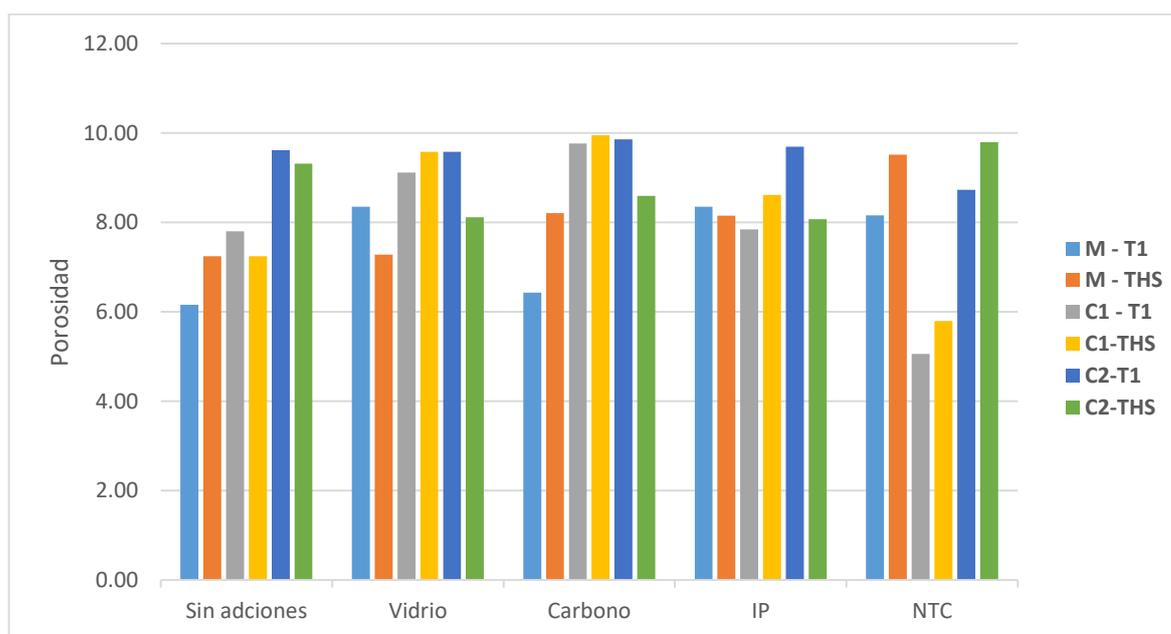
Muestra	Adiciones	Densidad Aparente (g/cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad (%)
1M-MB1	-----	2.35	2.18	7.24
1M-MB2	Vidrio	2.34	2.17	7.28
1M-MB3	Carbono	2.39	2.20	8.20
1M-MB4	IP	2.35	2.16	8.15
1M-MB5	NTC	2.38	2.15	9.52
1C1-MB1	-----	2.44	2.26	7.24
1C1-MB2	Vidrio	2.53	2.29	9.58
1C1-MB3	Carbono	2.53	2.28	9.95

1C1-MB4	IP	2.46	2.24	8.61
1C1-MB5	NTC	2.43	2.29	5.79
1C2-MB1	-----	2.51	2.27	9.31
1C2-MB2	Vidrio	2.50	2.30	8.12
1C2-MB3	Carbono	2.47	2.26	8.59
1C2-MB4	IP	2.50	2.29	8.07
1C2-MB5	NTC	2.50	2.26	9.79

Nota: Cálculo de porosidad de morteros y concreto 1, concreto 2 Cemento Andino Tipo HS. Serie 1

Figura 19

Porcentaje de porosidad del cemento tipo I y tipo HS



Nota: Porosidad (%) de, mortero, concreto 1 y 2 – Tipo I – Tipo HS y adiciones: vidrio, carbono, Impermeabilizante (IP), nanotubos de carbono (NTC)

En la figura 19 las muestras C1 de cemento tipo I y C1 de cemento tipo HS con adición de NTC presenta la menor porosidad.

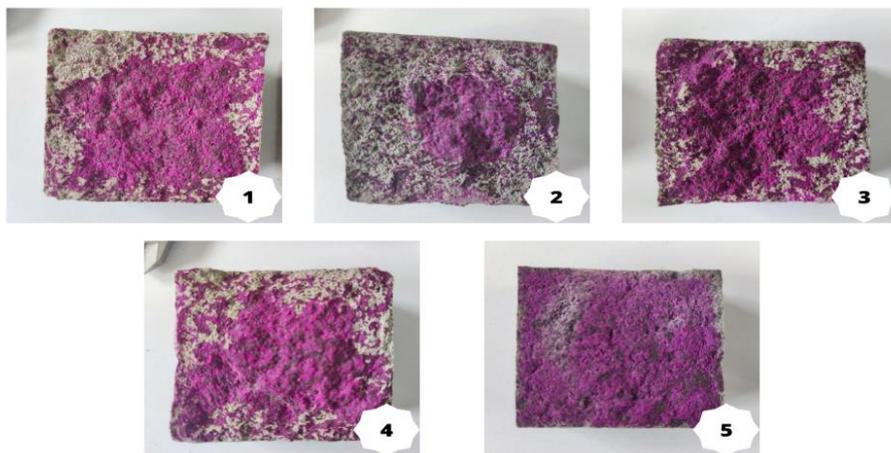
4.1.1.4 Resultados en muestras de Series estudiadas 2

Datos experimentales de profundidad de carbonatación y variación de PH serie 2. Las muestras para la carbonatación acelerada para la serie 2 presentan una geometría de un cubo

de 5x5x5 cm para cementos andinos tipo I y tipo HS. Luego del curado de 28 días estas se acondiciono a los ambientes del laboratorio antes de colocarlos a la cámara de carbonatación acelerada controlada a través de sensores de CO₂ al 10% y H. R entre 90 a 95%. El tiempo de exposición fue, 10, 15 y 17 días. Al final del periodo de carbonatación se partió las muestras en dos mitades y se aplicó una solución de indicador de fenolftaleína al 1%, en seguida se midió la profundidad con un vernier digital, los resultados se muestran en la tabla (30 y 32).

Figura 20

Muestras carbonatadas – Serie 2

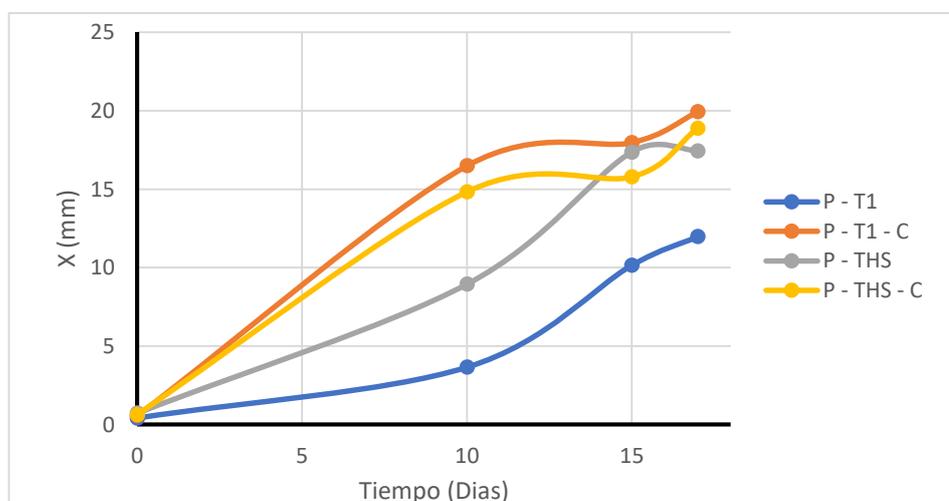


Nota: Muestras carbonatadas – Serie 2. (1. Sin Adición; 2. IP; 3. Vidrio; 4. Carbono; 5. NTC)

Tabla 33*Profundidad de carbonatación*

Muestra	Adiciones	Profundidad (mm)				k_c (mm/año ^{1/2})
		Control	Ambiente al 10% CO ₂			
		10 días	10 días	15 días	17 días	
2P-MA1	-----	0.41	3.65			19.45
2P-MA2	-----	0.52		10.15		50.00
2P-MA3	-----	0.36			11.97	55.44
2P-MA4	Carbono	0.56	16.49			99.51
2P-MA5	Carbono	0.60		17.97		88.59
2P-MA6	Carbono	0.78			19.93	92.28
2M-MA1	-----	0.62	9.1			54.85
2M-MA2	-----	0.56		15.72		77.49
2M-MA3	-----	0.68			16.53	76.53
2M-MA4	Carbono	0.61	7.48			45.04
2M-MA5	Carbono	0.68		15		73.92
2M-MA6	Carbono	0.8			16.07	74.37
2M-MA7	Vidrio	0.52	11.48			69.28
2M-MA8	Vidrio	0.71		16.95		83.54
2M-MA9	Vidrio	0.65			17.88	82.79
2M-MA10	IP	0.38	6.89			41.56
2M-MA11	IP	0.43		14.42		71.1
2M-MA12	IP	0.39			14.76	68.37
2M-MA13	NTC	0.48	10.01			60.4
2M-MA14	NT C	0.51		12.77		62.94
2M-MA15	NTC	0.59			12.85	59.48

Nota: Profundidad de carbonatación (mm) y coeficiente de carbonatación K_c de pastas, y morteros Cemento Andino Tipo I Serie 2.

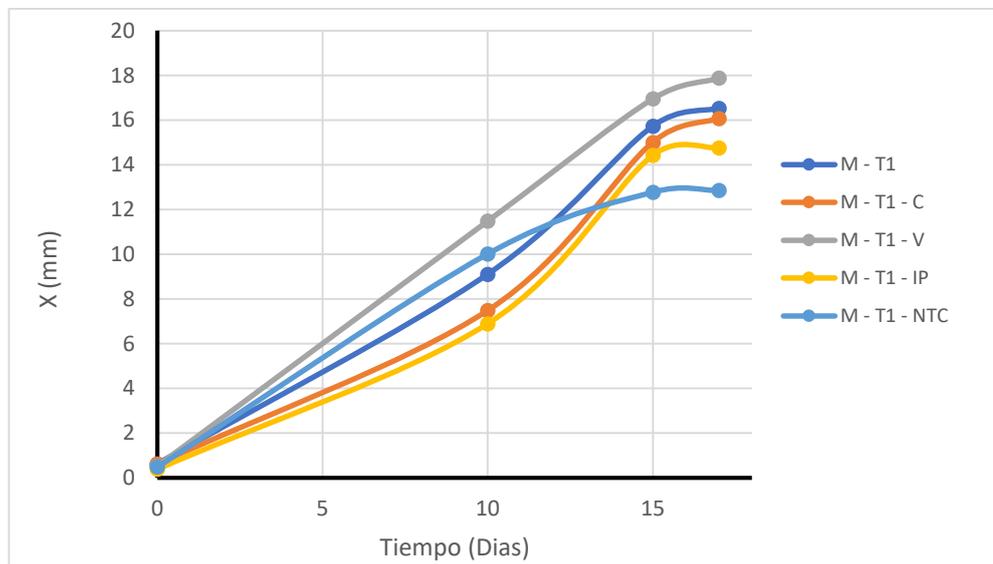
Figura 21*Profundidad de carbonatación de pastas con aditivos*

Nota: Profundidad de carbonatación de pastas con aditivos de carbono en cementos Andino tipo I y tipo HS. Serie 2

En la figura 21 la muestra de pasta con cemento THS presenta menor profundidad de carbonatación.

Figura 22

Profundidad de carbonatación de morteros con aditivos



Nota: Profundidad de carbonatación de morteros con aditivos en cementos Andino tipo I. serie 2.

En la figura 22 la muestra con adición de vidrio de cemento tipo I presenta mayor profundidad de carbonatación y a su vez las muestras con adición de NTC es una de las que presenta menor profundidad de carbonatación.

Tabla 34

Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	
Profun. 10 Días	5	4.59	6.89	11.48	8.9920	0.83495	1.86699	3.486	-1.401	2.000	20.76%
Profun. 15 Días	5	4.18	12.77	16.95	14.9720	0.69377	1.55131	2.407	0.466	2.000	10.36%
Profun. 17 Días	5	5.03	12.85	17.88	15.6180	0.85296	1.90727	3.638	0.139	2.000	12.21%

Nota: Profundidad de carbonatación (mm) de pastas, y morteros Cemento Andino Tipo I Serie

2.

Tabla 35

Profundidad de carbonatación

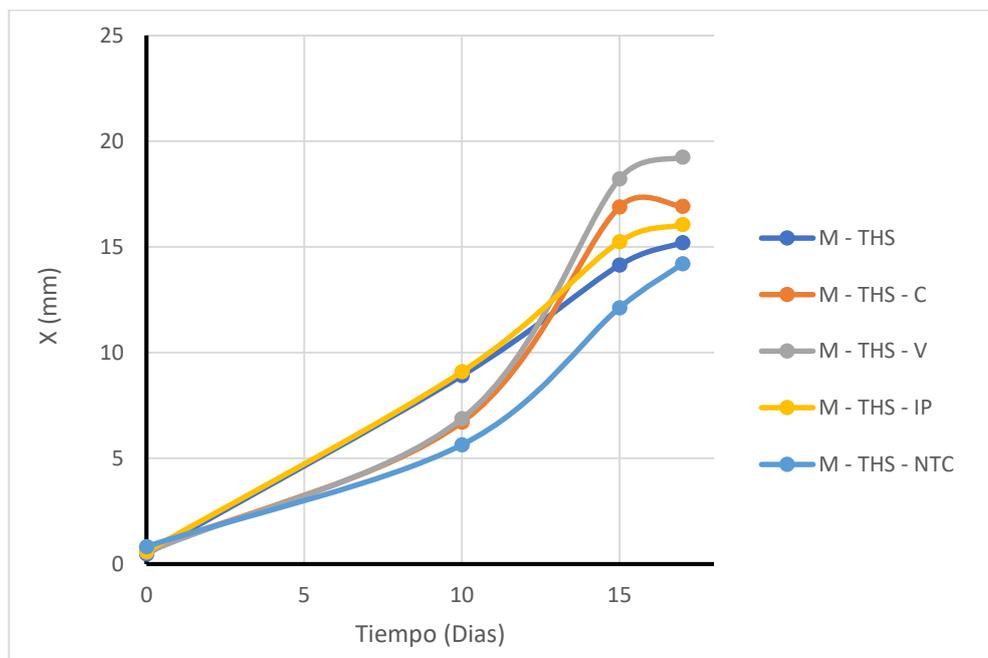
Muestra	Adiciones	Profundidad (mm)				k_c (mm/año ^{1/2})
		Control	Ambiente al 10% CO ₂			
		10 días	10 días	15 días	17 días	
2P-MB1	-----	0.72	8.94			53.83
2P-MB2	-----	0.67		17.36		85.57
2P-MB3	-----	0.58			17.44	80.76
2P-MB4	Carbono	0.63	14.82			89.45
2P-MB5	Carbono	0.68		15.78		77.77
2P-MB6	Carbono	0.46			18.88	87.46
2M-MB1	-----	0.47	8.91			53.75
2M-MB2	-----	0.70		14.13		69.62
2M-MB3	-----	0.52			15.2	70.39
2M-MB4	Carbono	0.61	6.7			40.31
2M-MB5	Carbono	0.72		16.88		83.19
2M-MB6	Carbono	0.67			16.91	78.29
2M-MB7	Vidrio	0.54	6.87			41.37
2M-MB8	Vidrio	0.76		18.21		89.75
2M-MB9	Vidrio	0.87			19.24	89.06
2M-MB10	IP	0.59	9.09			54.8
2M-MB11	IP	0.65		15.24		75.11
2M-MB12	IP	0.51			16.05	74.33

2M-MB13	NTC	0.82	5.63		33.65
2M-MB14	NTC	0.73		12.11	59.62
2M-MB15	NTC	0.89		14.19	65.62

Nota: carbonatación (mm) de morteros - Cemento Andino Tipo HS -Serie 2

Figura 23

Profundidad de carbonatación de morteros con aditivos



Nota: Profundidad de carbonatación de morteros con aditivos en cementos Andino tipo HS. Serie 2

En la figura 23 la muestra con adición de vidrio de cemento tipo HS presenta mayor profundidad de carbonatación y a su vez las muestras con adición de NTC es una de las que presenta menor profundidad de carbonatación.

Tabla 36

Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.
Profun. 10 Días	5	3.46	5.63	9.09	7.4400	0.67201	1.50266	2.258	-2.307	2.000	20.20%
Profun. 15 Días	5	6.10	12.11	18.21	15.3140	1.06095	2.37235	5.628	-0.750	2.000	15.49%
Profun. 17 Días	5	5.05	14.19	19.24	16.3180	0.85845	1.91955	3.685	0.755	2.000	11.76%

Nota: Estadística descriptiva de Profundidad de carbonatación (mm) de pastas, y morteros Cemento Andino Tipo HS Serie 2.

Tabla 37

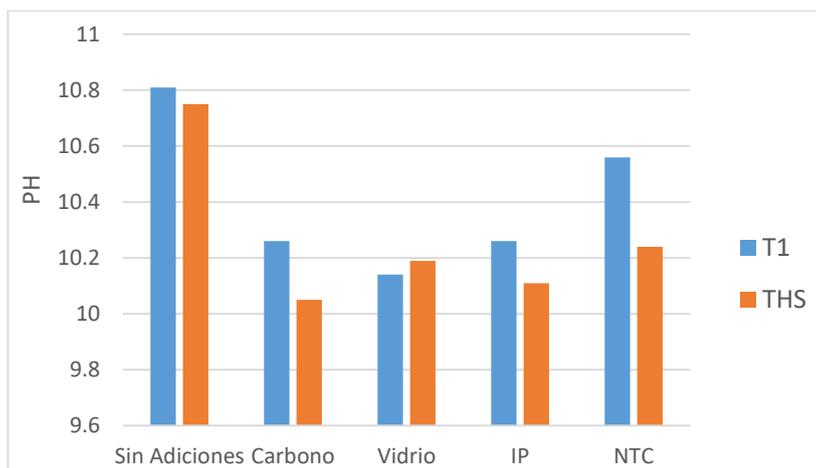
Variación de pH en proceso de carbonatación

Muestra	pH
M - T1 -	10.81
M - T1 - C	10.26
M - T1 - V	10.14
M - T1 - IP	10.26
M - T1 - NTC	10.56
M - THS -	10.75
M - THS - V	10.05
M - THS - C	10.19
M - THS - IP	10.11
M - THS - NTC	10.24

Nota: proceso de carbonatación de Mortero de cemento T1 y THS - Serie 2

Figura 24

Variación de pH en muestras carbonatadas



Nota: Muestras carbonatadas de Mortero - Cemento Andino Tipo I y Tipo HS – Serie 2

En la figura 24 podemos apreciar que las muestras con cemento tipo HS presentan menor pH que las muestras de cemento tipo I con sus respectivas adiciones.

Tabla 38

Estadística descriptiva Variación de pH en proceso de carbonatación

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Estad.		
pH - T1	5	0.67	10.14	10.81	10.4060	0.12254	0.27401	0.075	-0.656	2.000	2.63%
pH - THS	5	0.70	10.05	10.75	10.2680	0.12484	0.27914	0.078	3.713	2.000	2.72%

Nota: descriptiva Variación de pH en proceso de carbonatación de Mortero de cemento T1 y THS - Serie 2

4.1.1.5 Cálculo de los coeficientes de Carbonatación

Con los datos de la tabla 35 se hizo los cálculos de los coeficientes de carbonatación (kc), tomando el promedio de cada tipo de mezcla, (Tabla 39) usando la ecuación (25)

Tabla 39*Coefficientes de carbonatación en la cámara de aceleración*

Muestra	Espécimen	Kprom (mm/año ^{1/2}) ambiente control	k10 (mm/año ^{1/2}) ambiente al 10% CO ₂			Kprom
		Adiciones	10 días	10 días	15 días	
2P-MA1	-----	2.60	19.45	50.00	55.44	41.63
2P-MA4	Carbono	3.93	99.51	88.59	92.28	93.46
2M-MA1	-----	3.74	54.85	77.49	76.53	69.62
2M-MA4	Carbono	4.23	45.04	73.92	74.37	64.44
2M-MA7	Vidrio	3.80	69.28	83.54	82.79	78.54
2M-MA10	IP	2.42	41.56	71.10	68.37	60.34
2M-MA13	NTC	3.20	60.40	62.94	59.48	60.94
2P-MB1	-----	3.98	53.83	85.57	80.76	73.39
2P-MB4	Carbono	3.56	89.45	77.77	87.46	84.89
2M-MB1	-----	3.20	53.75	69.62	70.39	64.58
2M-MB4	Carbono	4.05	40.31	83.19	78.29	67.26
2M-MB7	Vidrio	4.35	41.37	89.75	89.06	73.39
2M-MB10	IP	3.50	54.80	75.11	74.33	68.08
2M-MB13	NTC	3.89	33.65	59.62	65.62	53.03

Nota: Coeficientes de carbonatación de los especímenes en la cámara de aceleración (mm/año

½) Serie 2.

Tabla 40*Coefficientes de carbonatación atmosférica*

Muestra	Adiciones	k _a (mm/año ^{1/2}) ambiente control	k _{a10} (mm/año ^{1/2}) ambiente al 10% CO ₂			K _{a prom} (mm/año ^{1/2}) ambiente acelerado
		K _{a 10 días}	K _{a 10 días}	K _{a 15 días}	K _{a 17 días}	K _{a prom}
2P-MA1	-----	2.60	1.23	3.15	3.49	2.62
2P-MA4	Carbono	3.93	6.27	5.58	5.87	5.89
2M-MA1	-----	3.74	3.45	4.82	4.83	4.38

2M-MA4	Carbono	4.23	2.84	4.66	4.68	4.05
2M-MA7	Vidrio	3.80	4.36	5.26	5.22	4.95
2M-MA10	IP	2.42	2.62	4.48	4.30	3.80
2M-MA13	NTC	3.20	3.80	3.96	3.75	3.84

2P-MB1	-	3.98	3.39	5.39	5.09	4.62
2P-MB4	Carbono	3.56	5.64	4.90	5.51	5.35

2M-MB1	-	3.20	3.39	4.39	4.43	3.97
2M-MB4	Carbono	4.05	2.54	5.24	4.93	4.24
2M-MB7	Vidrio	4.35	2.61	5.65	5.61	4.62
2M-MB10	IP	3.50	3.45	4.73	4.68	4.29
2M-MB13	NTC	3.89	3.76	4.13	5.59	2.12

Nota: Coeficientes de carbonatación atmosférica k_a (mm/año $^{1/2}$) Serie 2

Tabla 41

Coeficientes de carbonatación en la cámara de aceleración

Muestra	Espécimen	Kprom (mm/año $^{1/2}$) ambiente control		k $_{10}$ (mm/año $^{1/2}$) ambiente al 10% CO $_2$			
		Adiciones	10 días	10 días	15 días	17 días	Kprom
2P-MA1	-----		2.60	19.45	50.00	55.44	41.63
2P-MA4	Carbono		3.93	99.51	88.59	92.28	93.46
2M-MA1	-----		3.74	54.85	77.49	76.53	69.62
2M-MA4	Carbono		4.23	45.04	73.92	74.37	64.44
2M-MA7	Vidrio		3.80	69.28	83.54	82.79	78.54
2M-MA10	IP		2.42	41.56	71.10	68.37	60.34

2M-MA13	NTC	3.20	60.40	62.94	59.48	60.94
2P-MB1	-----	3.98	53.83	85.57	80.76	73.39
2P-MB4	Carbono	3.56	89.45	77.77	87.46	84.89
2M-MB1	-----	3.20	53.75	69.62	70.39	64.58
2M-MB4	Carbono	4.05	40.31	83.19	78.29	67.26
2M-MB7	Vidrio	4.35	41.37	89.75	89.06	73.39
2M-MB10	IP	3.50	54.80	75.11	74.33	68.08
2M-MB13	NTC	3.89	33.65	59.62	65.62	53.03

Nota: Coeficientes de carbonatación de los especímenes en la cámara de aceleración (mm/año^{1/2}) Serie 2.

Tabla 42

Coefficientes de carbonatación atmosférica

Muestra	Adiciones	k_a (mm/año ^{1/2})		k_{a10} (mm/año ^{1/2})		K_a prom (mm/año ^{1/2}) ambiente acelerado
		ambiente control		ambiente al 10% CO ₂		
		K_a 10 días	K_a 10 días	K_a 15 días	K_a 17 días	K_a prom
2P-MA1	----- -	2.60	1.23	3.15	3.49	2.62
2P-MA4	Carbono	3.93	6.27	5.58	5.87	5.89
2M-MA1	----- -	3.74	3.45	4.82	4.83	4.38
2M-MA4	Carbono	4.23	2.84	4.66	4.68	4.05
2M-MA7	Vidrio	3.80	4.36	5.26	5.22	4.95
2M-MA10	IP	2.42	2.62	4.48	4.30	3.80
2M-MA13	NTC	3.20	3.80	3.96	3.75	3.84

2P-MB1	-	3.98	3.39	5.39	5.09	4.62
2P-MB4	Carbono	3.56	5.64	4.90	5.51	5.35
2M-MB1	-	3.20	3.39	4.39	4.43	3.97
2M-MB4	Carbono	4.05	2.54	5.24	4.93	4.24
2M-MB7	Vidrio	4.35	2.61	5.65	5.61	4.62
2M-MB10	IP	3.50	3.45	4.73	4.68	4.29
2M-MB13	NTC	3.89	3.76	4.13	5.59	2.12

Nota: Coeficientes de carbonatación atmosférica ka (mm/año^{1/2}) Serie 2.

Tabla 43

Coeficientes de carbonatación en la cámara de aceleración

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Error	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)	
										Estad.	Estad.
K prom - T1	5	18.20	60.34	78.54	66.7760	3.37208	7.54019	56.854	0.555	2.000	11.29%
K prom - THS	5	20.36	53.03	73.39	65.2680	3.37701	7.55123	57.021	2.327	2.000	11.57%
Ka - T1	5	1.15	3.80	4.95	4.2040	0.21295	0.47616	0.227	0.643	2.000	11.33%
Ka - THS	5	2.50	2.12	4.62	3.8480	0.44418	0.99321	0.986	3.989	2.000	25.81%

Nota: Coeficientes de carbonatación de los especímenes en la cámara de aceleración (mm/año^{1/2}) Serie 2.

4.1.1.6 Ganancia de masa debida a la carbonatación acelerada

La ganancia de masa debida a la carbonatación acelerada por cada tipo de cemento para pastas y morteros (serie 2) se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 44

Masas de muestras carbonatadas. Serie 2

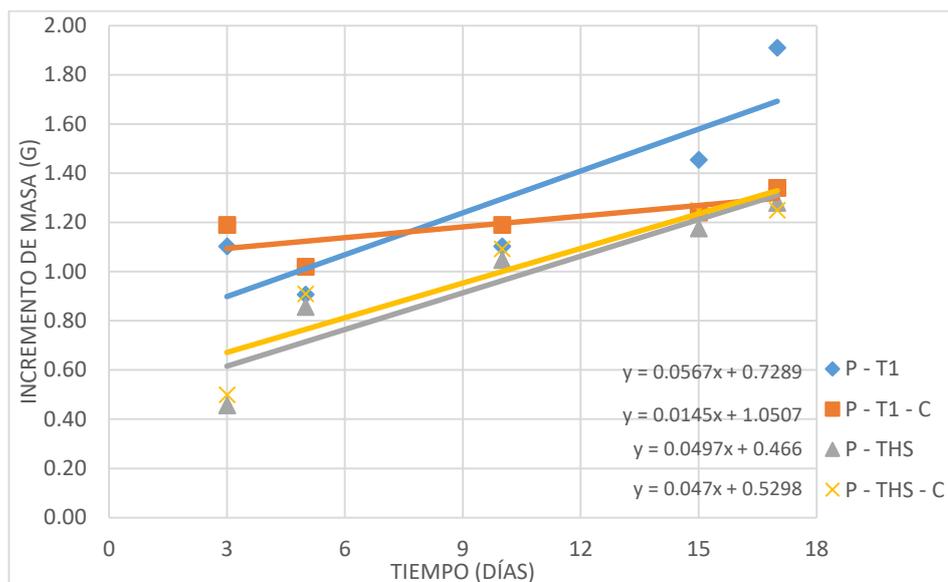
Código Muestra	Masa sin carbonatar (g)	Masa carbonatada 3 Días (g)	Masa carbonatada 5 Días (g)	Masa carbonatada 10 Días (g)	Masa carbonatada 15 Días (g)	Masa carbonatada 17 Días (g)	Masa carbonatada (g)
2P-MA1	278.24	278.76	279.14	279.28			1.04
2P-MA2	270.60	271.18	271.62	271.91	272.00		1.40
2P-MA3	275.08	275.51	275.88	276.04	276.59	276.99	1.91
2P-MA4	281.59	282.19	282.66	282.80			1.21
2P-MA5	282.09	282.60	283.04	283.22	283.27		1.18
2P-MA6	281.61	282.21	282.65	282.84	282.91	282.95	1.34
2M-MA1	274.53	277.28	278.95	279.54			5.01
2M-MA2	262.43	265.01	266.64	267.23	267.31		4.88
2M-MA3	270.79	273.66	275.21	275.79	276.00	276.80	6.01
2M-MA4	279.29	281.41	282.93	283.57			4.28
2M-MA5	278.74	280.97	282.87	283.67	283.98		5.24
2M-MA6	278.36	280.57	282.31	283.00	283.40	283.56	5.20
2M-MA7	278.72	282.08	283.83	284.95			6.23
2M-MA8	267.79	271.33	273.02	273.48	273.66		5.87
2M-MA9	263.42	266.45	268.02	268.49	268.73	268.84	5.42
2M-MA10	270.45	272.30	273.86	274.51			4.06
2M-MA11	268.90	270.66	272.52	273.12	273.20		4.30
2M-MA12	269.05	270.42	271.96	272.40	272.51	272.58	3.53
2M-MA13	280.44	281.26	283.04	283.50			3.06

2M- MA14	279.08	279.76	281.37	281.84	281.99		2.91
2M- MA15	280.65	280.70	282.42	282.87	282.95	283.02	2.37

Nota: Masas de las diferentes muestras carbonatas a los 3, 5, 10, 15, 17 días.

Figura 25

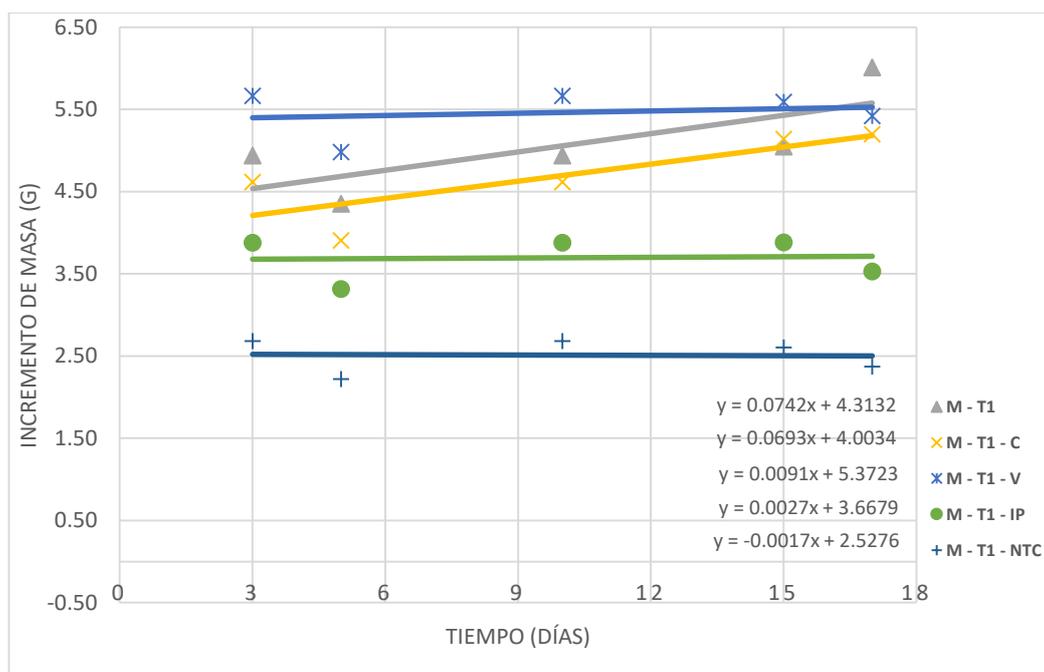
Incremento de masa de pastas de cemento T1 y tipo HS Vs tiempo



En la figura 25 se puede apreciar las muestras de cemento tipo HS presentan menor incremento de masa que las muestras de cemento tipo I.

Figura 26

Incremento de masa de morteros de cemento Tipo 1 Vs. tiempo



En la figura 26 se puede apreciar las muestras con adición de vidrio de cemento tipo I presentan el mayor incremento de masa y las muestras con adiciones de NTC presentan el menor incremento de masa.

Tabla 45

Estadística Descriptiva Masas de las diferentes muestras carbonatas

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Error	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	Desv. Error	coeficiente de variación (CV)
							Estad.				Estad.
Icrem. Masa	15	3.86	2.37	6.23	4.5580	0.30667	1.18772	1.411	-0.857	1.121	26.06%

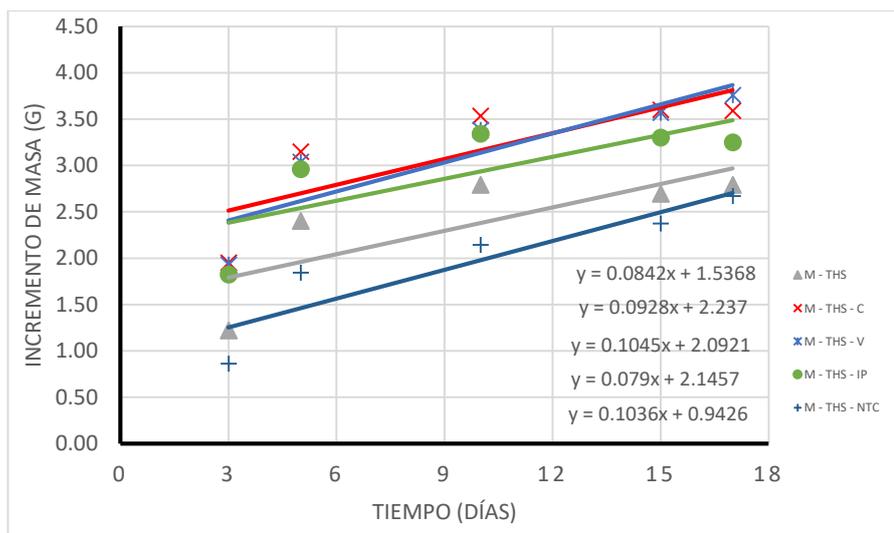
Nota: Serie 2

Tabla 46*Masas de las diferentes muestras carbonatas*

Código Muestra	Masa sin carbonatar (g)	Masa carbonatada 3 Días (g)	Masa carbonatada 5 Días (g)	Masa carbonatada 10 Días (g)	Masa carbonatada 15 Días (g)	Masa carbonatada 17 Días (g)	Masa carbonatada (g)
2P-MB1	274.88	275.31	275.69	275.90			1.02
2P-MB2	269.00	269.47	269.88	270.02	270.12		1.12
2P-MB3	272.57	273.04	273.45	273.67	273.80	273.85	1.28
2P-MB4	275.70	276.21	276.64	276.84			1.14
2P-MB5	275.85	276.37	276.75	276.94	277.17		1.32
2P-MB6	274.58	275.05	275.47	275.63	275.76	275.83	1.25
2M-MB1	278.63	280.02	281.30	281.70			3.07
2M-MB2	270.40	271.53	272.66	273.05	273.08		2.68
2M-MB3	271.96	273.10	274.23	274.61	274.67	274.75	2.79
2M-MB4	277.11	279.08	280.26	280.60			3.49
2M-MB5	278.10	280.05	281.28	281.69	281.74		3.64
2M-MB6	278.09	280.02	281.21	281.61	281.65	281.68	3.59
2M-MB7	259.07	260.88	261.91	262.20			3.13
2M-MB8	277.77	279.78	280.88	281.23	281.27		3.50
2M-MB9	274.89	276.86	278.06	278.45	278.53	278.65	3.76
2M-MB10	268.87	270.83	272.13	272.50			3.63
2M-MB11	269.49	271.38	272.48	272.79	272.90		3.41
2M-MB12	269.63	271.25	272.26	272.73	272.82	272.88	3.25
2M-MB13	274.40	275.09	275.91	276.19			1.79
2M-MB14	275.82	276.44	277.44	277.89	277.95		2.13
2M-MB15	275.52	276.79	277.92	278.09	278.14	278.19	2.67

Nota: Masas de las diferentes muestras carbonatas a los 3, 5, 10, 15, 17 días. (serie 2).

Figura 27*Incremento de masa de pastas y morteros de cemento HS Vs tiempo*



Nota: Masas de las diferentes muestras carbonatas a los 3, 5, 10, 15, 17 días.

En la figura 27 se puede apreciar las muestras con adición de vidrio de cemento tipo I presenta el mayor incremento de masa y las muestras con adiciones de NTC presenta el menor incremento de masa.

Tabla 47

Estadística Descriptiva Masas de las diferentes muestras carbonatas

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Estad.		
Icrem. Masa	15	1.97	1.79	3.76	3.1020	0.15111	0.58524	0.343	0.347	1.121	18.87%

Nota: Estadística Descriptiva Masas de las diferentes muestras carbonatas C.A. Tipo HS serie 2.

4.1.1.6 Cantidad de CO₂ absorbida Serie 2

Para determinar % CO₂ absorbida por las pastas y morteros elaborados con los cementos Andino tipo I y tipo HS, se ha elegido usar la metodología avanzada de la Norma Europea EN 16757, ecuación (34)

Tabla 48*Ganancia de CO₂ en carbonatación de cemento TI*

Muestra	Espécimen Adiciones	%CO ₂ absorb Ka 10 días	%CO ₂ absorb Ka 15 días	%CO ₂ absorb Ka 17 días
2P-MA1	-----	0.79	2.47	2.91
2P-MA4	Carbono	4.00	4.37	4.89
2M-MA1	-----	2.20	3.77	4.02
2M-MA4	Carbono	1.89	3.65	3.90
2M-MA7	Vidrio	2.79	4.12	4.35
2M-MA10	IP	1.67	3.51	3.58
2M-MA13	NTC	2.43	3.10	3.12

Nota: Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada de cemento andino tipo I a 10% de CO₂ (serie 2).

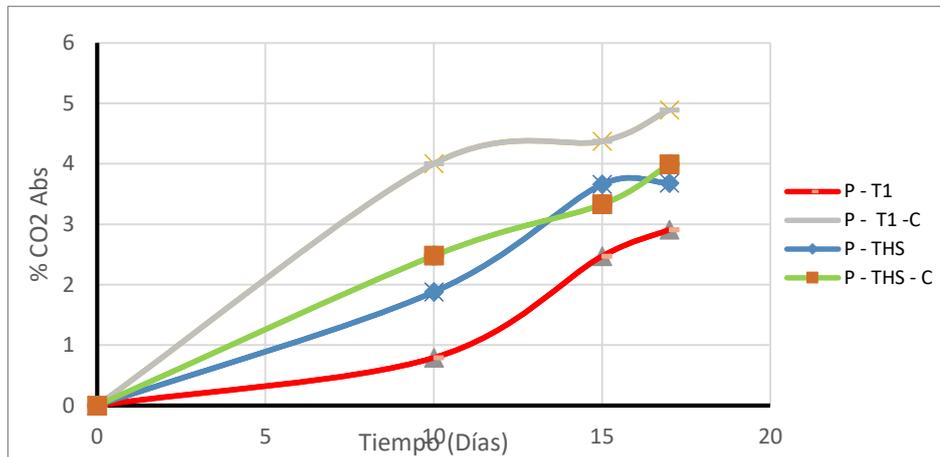
Tabla 49*Estadística descriptiva Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada*

%CO ₂ Abs	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
									Desv. Error	Desv. Error	
Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	
10 D	5	1.12	1.67	2.79	2.1960	0.19722	0.44100	0.194	- 0.967	2.000	20.08%
15 D	5	1.02	3.10	4.12	3.6300	0.16664	0.37263	0.139	0.892	2.000	10.27%
17 D	5	1.23	3.12	4.35	3.7940	0.20875	0.46678	0.218	0.078	2.000	12.30%

Nota: Estadística descriptiva Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada de cemento andino tipo I a 10% de CO₂ (serie 2).

Figura 28

Absorción de CO₂ (%) de pastas de cemento andino

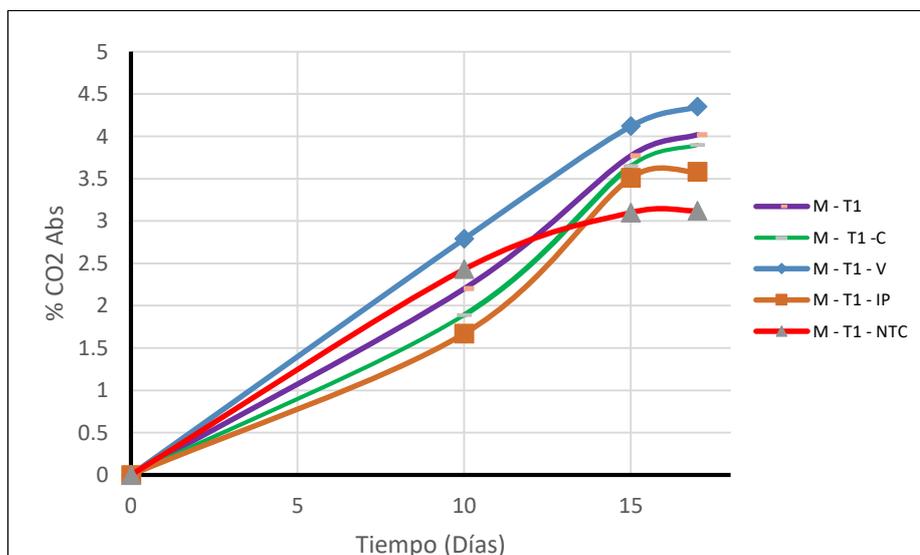


Nota: Absorción de CO₂ (%) de pastas de cemento andino tipo I y tipo HS con adición de carbón Vs tiempo.

En la figura 28 se aprecia que la pasta de cemento tipo HS con adición de carbón presenta menor porcentaje de absorción de CO₂ que las pastas de cemento tipo I con adición de carbón.

Figura 29

Absorción de CO₂ de morteros de cemento andino tipo I con adiciones

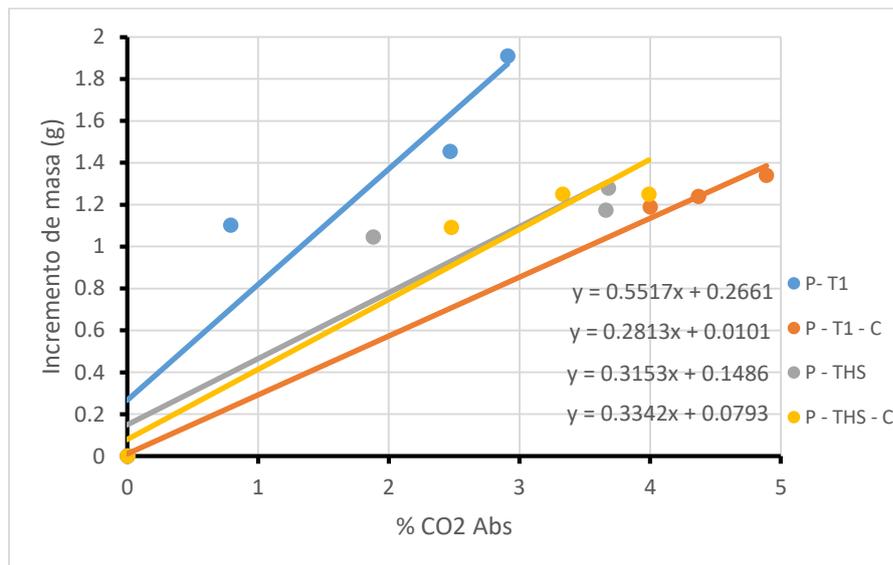


Nota: Absorción de CO₂ (%) de morteros de cemento andino tipo I con adiciones Vs tiempo

En la figura 29 se aprecia que la muestra con adición de vidrio de cemento tipo I presenta mayor porcentaje de absorción de CO₂ y la muestras con adición de NTC presenta uno de los menores porcentajes de absorción de CO₂.

Figura 30

Incremento de masa Vs Absorción de CO₂



Nota: Incremento de masa Vs Absorción de CO₂ (%) de pastas de cemento andino T1 y THS.

En la figura 30 se aprecia que las relaciones de cemento tipo HS son menores que las relaciones de cemento tipo I.

Figura 31

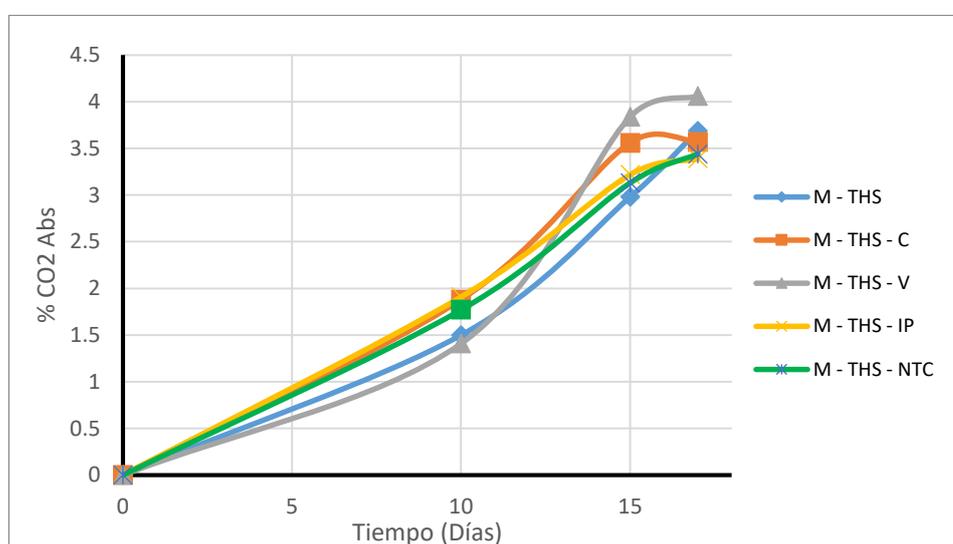
Incremento de masa Vs Absorción de CO₂

10 D	5	0.50	1.41	1.91	1.6940	0.10132	0.22656	0.051	-2.625	2.000	13.37%
15 D	5	0.86	2.98	3.84	3.3460	0.15594	0.34868	0.122	-1.064	2.000	10.42%
17 D	5	0.67	3.39	4.06	3.6300	0.11954	0.26730	0.071	1.509	2.000	7.36%

Nota: Estadística descriptiva Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada de cemento andino tipo HS a 10% de CO₂ (serie 2)

Figura 32

Absorción de CO₂ de morteros de cemento andino tipo HS con aditivos

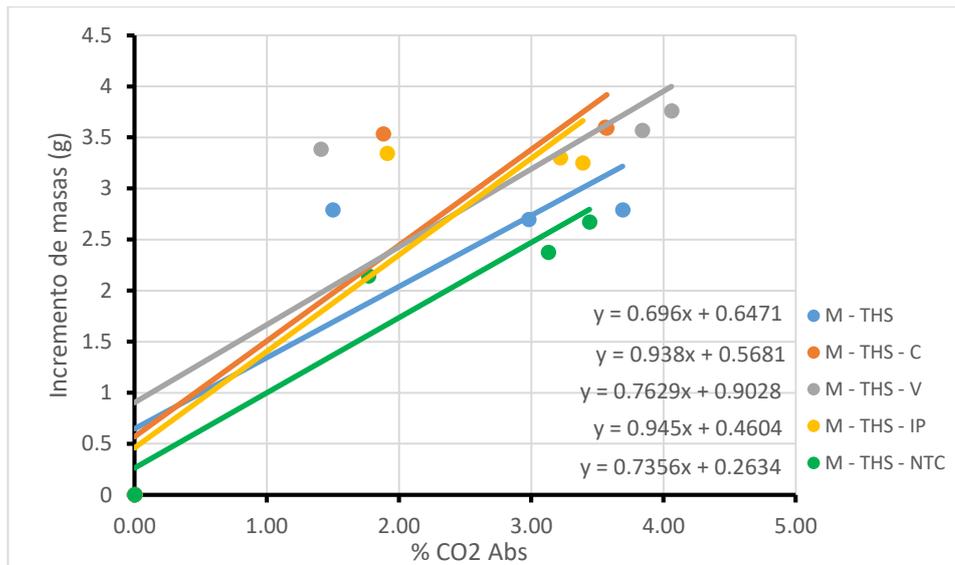


Nota: Absorción de CO₂ (%) de morteros de cemento andino tipo HS con adiciones Vs tiempo.

La figura 32 se aprecia que la muestra con adición de vidrio de cemento tipo HS presenta mayor porcentaje de absorción de CO₂ mientras que la muestra con adición de NTC presenta menor porcentaje de absorción de CO₂.

Figura 33

Incremento de masa Vs Absorción de CO₂ de morteros



Nota: Incremento de masa Vs Absorción de CO₂ (%) de morteros con adiciones de cemento andino THS

En la figura 33 la relación de la muestra con adición de vidrio de cemento tipo HS es mayor que la relación con adición de NTC.

4.1.1.7 Medida de Resistividad Eléctrica

Para determinar resistividad se usó la normal ASTM G57-06 para lo cual se preparó muestras de especímenes de la serie 1 y 2. Con las probetas preparadas se midió con el equipo PR-512 PRASEK PREMIUN, se muestra en tabla (49). De acuerdo al siguiente procedimiento:

Después de 10 días de secado las muestras se conectaron al equipo PR-512 PRASEK PREMIUN.

Se realizó la medida para muestras de pastas, morteros, concretos para cementos Andino tipo I y tipo HS con o sin aditivos. Antes de someter las probetas a carbonatación acelerada, luego después de cada etapa de carbonatación.

Con los resultados obtenidos y procesados de la tabla 49 se realizaron las gráficas para las diferentes muestras y sus aditivos.

Tabla 52*Resistividad de muestras de pastas y morteros*

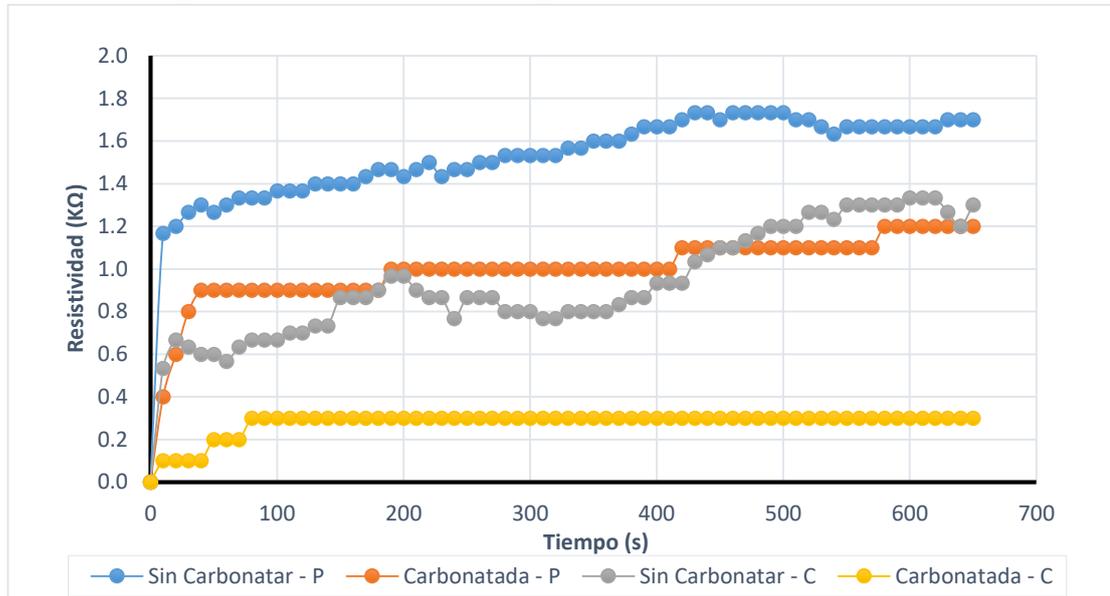
Cemento T1				Cemento THS			
Adiciones		Control (kΩ)	Carbonatado (kΩ)	Adiciones		Control (kΩ)	Carbonatado (kΩ)
Muestra		0 días	17 días	Muestra		0 días	17 días
2P-MA1	----- --	1.5	1.0	2P-MB1	----- --	0.6	0.3
2P-MA2	Carbono	0.9	0.3	2P-MB2	Carbono	2.3	0.4
2M-MA1	----- --	7.1	1.5	2M-MB1	----- --	9.8	3.4
2M-MA2	Carbono	8.5	1.1	2M-MB2	Carbono	2.5	0.3
2M-MA3	Vidrio	10.6	2.3	2M-MB3	Vidrio	7.2	0.6
2M-MA4	IP	2.7	0.3	2M-MB4	IP	4.2	2.4
2M-MA5	NTC	7.0	0.4	2M-MB5	NTC	3.6	0.3

Nota: Resistividad de muestras de pastas y morteros cemento Andino Tipo I y Tipo HS.

La resistividad de las muestras de pastas y morteros bajan después del proceso carbonatación en comparación con las muestras de control, como se muestra en tabla 49, variando estas significativamente para los adicionados con NTC, IP, Vidrio y Carbono.

Figura 34

Resistividad ($k\Omega$) de pastas de cemento andino tipo I

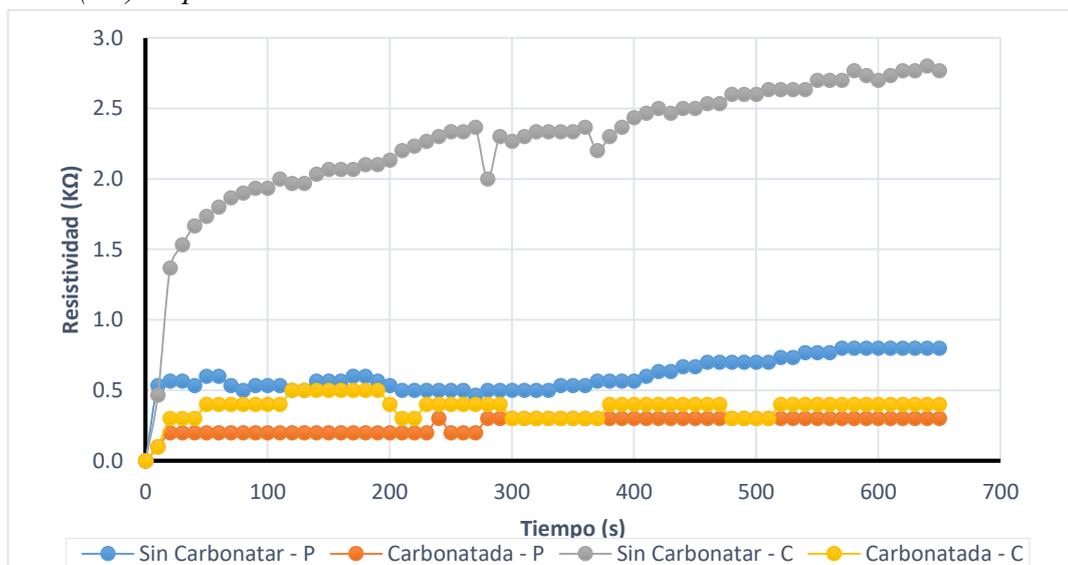


Nota: Resistividad ($k\Omega$) de pastas de cemento andino tipo I carbonatadas y sin carbonatar Vs tiempo

En la figura 34 se aprecia que la muestra con adición de carbono de cemento tipo I presenta menor resistividad luego de haber sido sometida a carbonatación.

Figura 35

Resistividad ($k\Omega$) de pastas de cemento andino

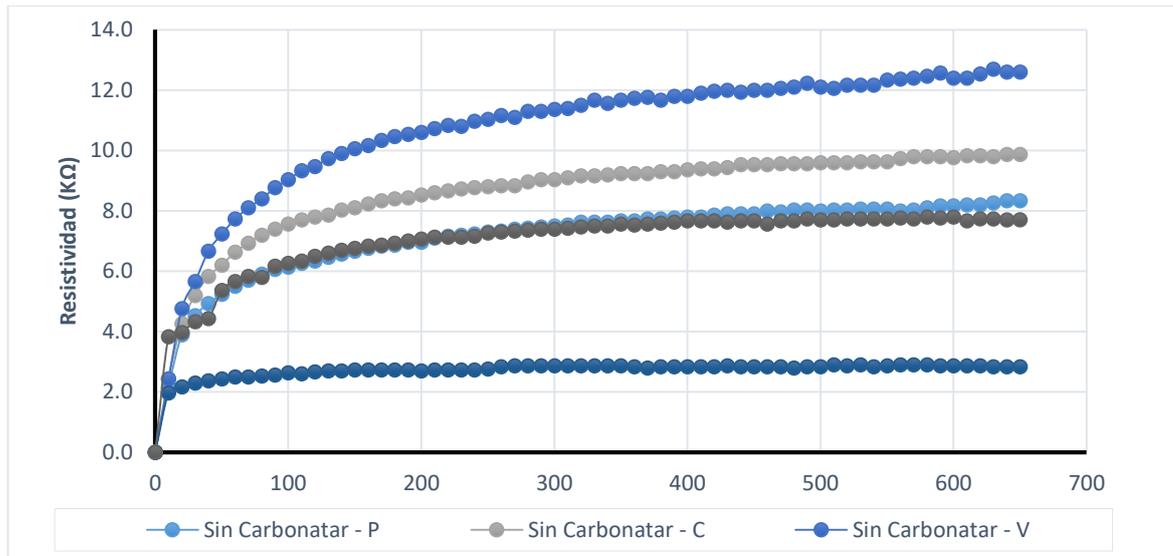


Nota: Resistividad ($k\Omega$) de pastas de cemento andino tipo HS carbonatadas y sin carbonatar Vs tiempo

En la figura 35 se aprecia que la muestras reducen su resistividad tras haber sido expuestas a carbonatación.

Figura 36

Resistividad ($k\Omega$) de morteros de cemento andino tipo I

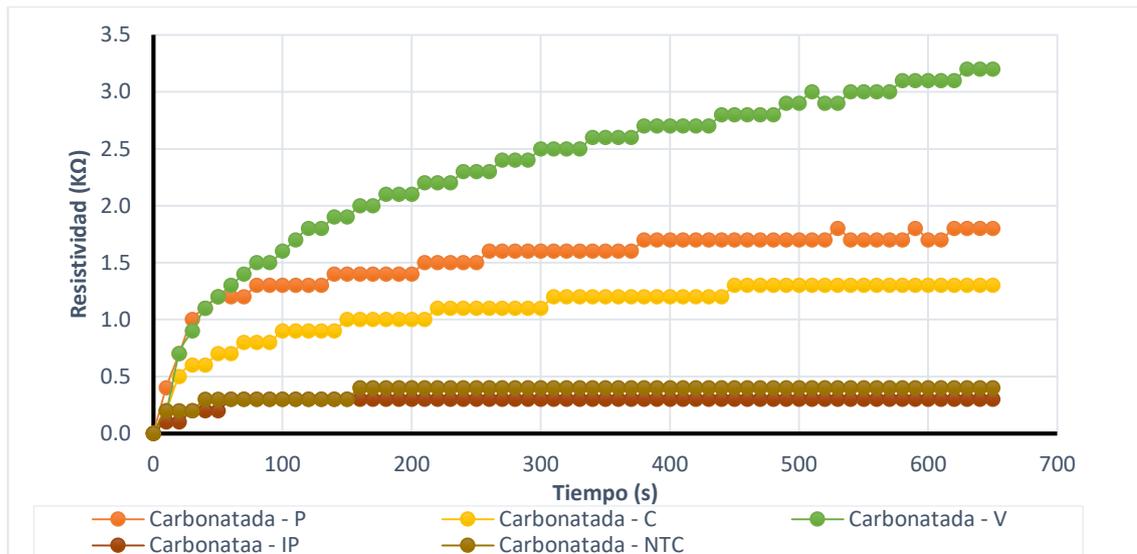


Nota: Resistividad ($k\Omega$) de morteros de cemento andino tipo I, con adiciones y sin carbonatar Vs tiempo

En la figura 36 se aprecia que la muestras sin carbonatar con adición de Vidrio de cemento tipo I presenta mayor resistividad y las muestras con adición de IP y NTC presentan menor resistividad.

Figura 37

Resistividad ($k\Omega$) de morteros de cemento andino tipo I

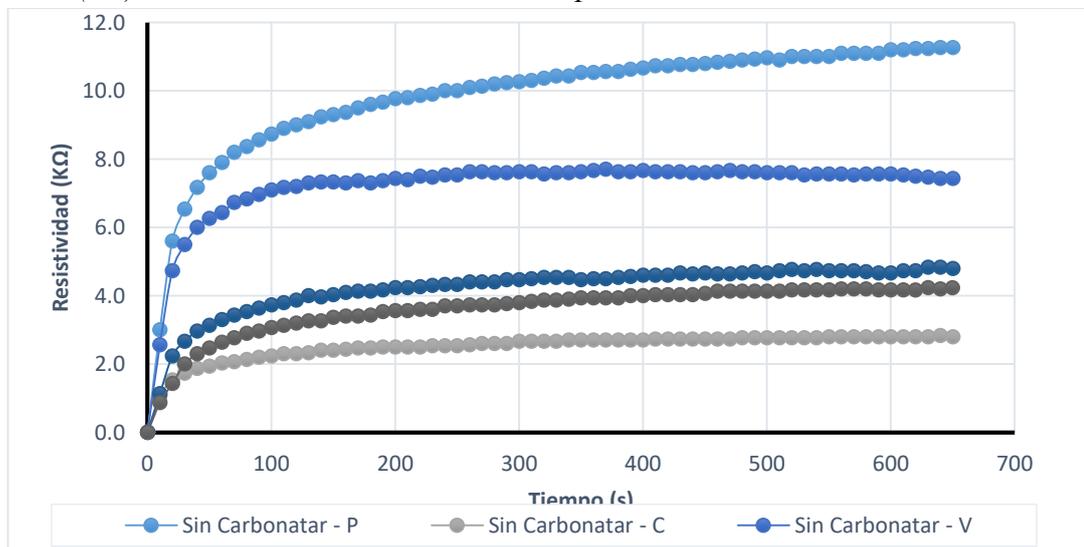


Nota: Resistividad ($k\Omega$) de morteros de cemento andino tipo I, carbonatadas con adiciones Vs tiempo

En la figura 37 se aprecia que las muestras carbonatadas con adición de Vidrio de cemento tipo I presentan mayor resistividad y las muestras con adición de IP y NTC presentan menor resistividad.

Figura 38

Resistividad ($k\Omega$) de morteros de cemento andino tipo HS

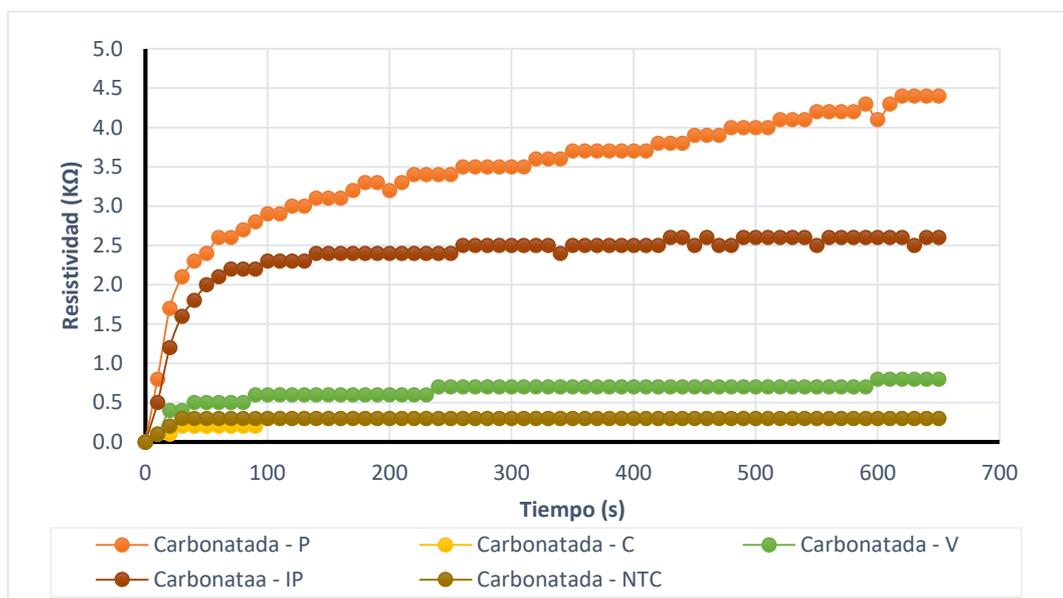


Nota: Resistividad ($k\Omega$) de morteros de cemento andino tipo HS, sin carbonatar con adiciones, Vs tiempo

En la figura 38 se aprecia que la muestras sin carbonatar con adición de Vidrio de cemento tipo HS presenta mayor resistividad en comparación de las muestras con adición de Carbono y NTC presenta menor resistividad.

Figura 39

Resistividad ($k\Omega$) de morteros de cemento andino tipo HS



Nota: Resistividad ($k\Omega$) de morteros de cemento andino tipo HS, carbonatadas con adiciones, Vs tiempo.

En la figura 39 se aprecia que las muestras carbonatadas con adición de IP de cemento tipo HS presentan mayor resistividad y las muestras con adición de Carbono y NTC presentan menor resistividad.

4.1.1.8 Resultados en muestras de Series estudiadas 3

En la serie 3, se trabajó con 126 muestras, conformada por 3 probetas por cada espécimen de pastas, morteros de cementos Andino tipo I y tipo HS, con y sin aditivos para medir los diferentes parámetros antes y después del proceso de carbonatación acelerada. Los intervalos de los tiempos en la cámara de carbonatación fueron de 5,10,15 días respectivamente, como se muestra en la tabla 53

Tabla 53

Profundidad de carbonatación Serie 3

Adiciones	Muestra	Control 10 días (mm)	Profundidad de Carbonatación X (mm)			Kc (mm/año ^{1/2})
			Ambiente al 10% CO ₂			
			5 Días	10 Días	15 Días	

----- -	3P-MA7	0.45	3.09			26.12
----- -	3P-MA8	0.41		5.03		30.29
----- -	3P-MA9	0.55			6.85	33.68
Carbono	3P-MA16	0.51	6.86			58.45
Carbono	3P-MA17	0.56		11.00		66.37
Carbono	3P-MA18	0.60			12.95	63.81
----- -	3M-MA7	0.65	3.02			25.20
----- -	3M-MA8	0.62		5.02		30.10
----- -	3M-MA9	0.56			6.80	33.43
Carbono	3M-MA16	0.65	4.84			40.98
Carbono	3M-MA17	0.62		7.27		43.76
Carbono	3M-MA18	0.67			9.46	46.54
Vidrio	3M-MA25	0.72	4.36			36.74
Vidrio	3M-MA26	0.55		8.01		48.28
Vidrio	3M-MA27	0.71			10.74	52.85
IP	3M-MA34	0.55	4.65			39.45
IP	3M-MA35	0.60		9.54		57.52
IP	3M-MA36	0.48			12.09	59.59
NTC	3M-MA43	0.51	3.46			29.24
NTC	3M-MA44	0.48		5.82		35.04
NTC	3M-MA45	0.56			7.50	36.89

Nota: Profundidad de carbonatación (mm) de pastas, y morteros. Cemento Andino. Serie 3.

Tabla 54

Estadística descriptiva de profundidad de carbonatación

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.
Profun. Carbon. 5D	5	1.82	3.02	4.84	4.0660	0.35270	0.78866	0.622	-2.137	2.000	19.40%
Profun. Carbon. 10D	5	4.52	5.02	9.54	7.1320	0.79907	1.78678	3.193	-1.000	2.000	25.05%

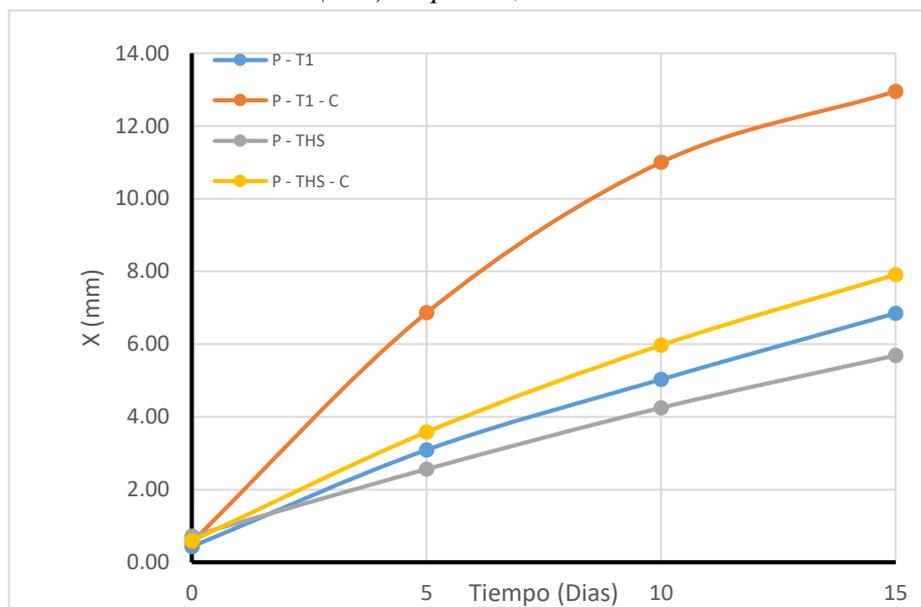
Profun. Carbon. 15D	5	5.29	6.80	12.09	9.3180	0.98417	2.20066	4.843	-1.911	2.000	23.62%
---------------------------	---	------	------	-------	--------	---------	---------	-------	--------	-------	--------

Nota: Estadística descriptiva de profundidad de carbonatación (mm) de pastas, y morteros.

Cemento Andino Tipo I - Serie 3

Figura 40

Profundidad de carbonatación (mm) de pastas, de Cemento Andino



En la figura 40 que la muestra con adición de carbono de cemento tipo I presenta la mayor profundidad de carbonatación, mientras que la muestra sin adición de cemento tipo HS presenta la menor profundidad de absorción.

Tabla 55

Profundidad de carbonatación cemento THS

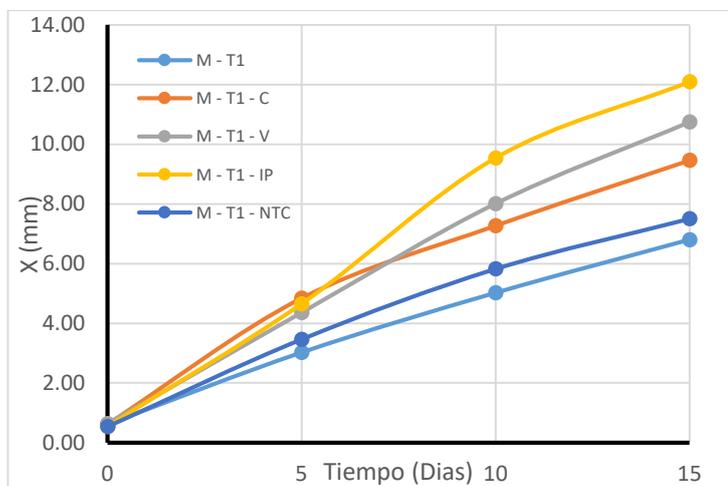
Adiciones	Muestra	X Control 10 días (mm)	Profundidad de Carbonatación X (mm) Ambiente al 10% CO ₂			K _c (mm/año ^{1/2})
			5 Días	10 Días	15 Días	
-	3P-MB7	0.72	2.56			20.99
-	3P-MB8	0.67		4.25		25.35
-	3P-MB9	0.58			5.69	27.92
Carbono	3P-MB16	0.63	3.58			30.11
Carbono	3P-MB17	0.68		5.97		35.83

Carbono	3P-MB18	0.46		7.91	38.95
-	3M-MB7	0.62	2.93		24.47
-	3M-MB8	0.67		6.11	36.69
-	3M-MB9	0.58		7.31	35.94
Carbono	3M-MB16	0.65	3.36		28.16
Carbono	3M-MB17	0.69		10.48	63.18
Carbono	3M-MB18	0.48		12.61	62.15
Vidrio	3M-MB25	0.72	6.01		50.98
Vidrio	3M-MB26	0.55		8.90	53.67
Vidrio	3M-MB27	0.63		11.92	58.71
IP	3M-MB34	0.55	3.40		28.68
IP	3M-MB35	0.60		6.43	38.68
IP	3M-MB36	0.48		8.63	42.50
NTC	3M-MB43	0.51	2.22		18.46
NTC	3M-MB44	0.48		4.83	29.04
NTC	3M-MB45	0.56		6.54	32.14

Nota: Profundidad de carbonatación (mm) de pastas, y morteros. Cemento Andino THS.

Figura 41

Profundidad de carbonatación (mm) de morteros de Cemento Andino



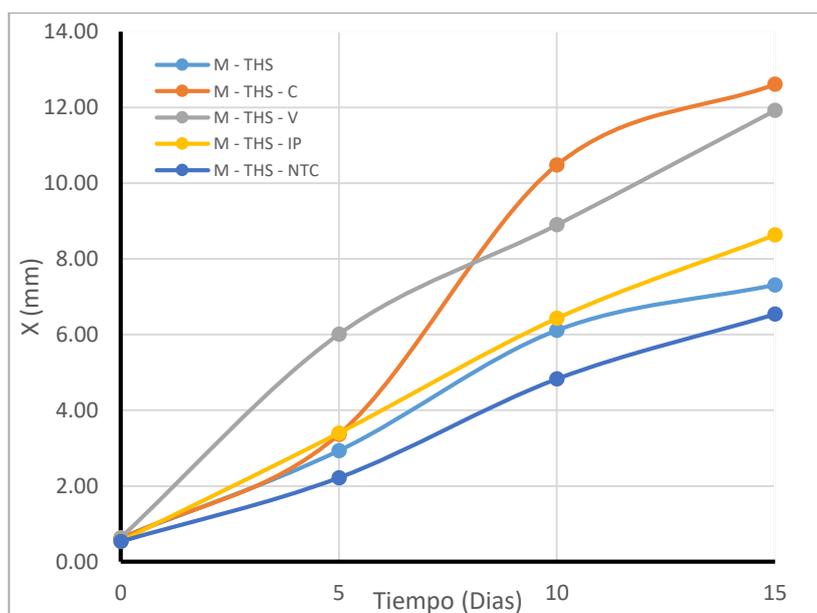
Nota: Profundidad de carbonatación (mm) de morteros de Cemento Andino tipo I con adiciones vs Tiempo Serie 3

En la figura 41 la muestra con adición de IP de cemento tipo I presenta mayor profundidad de carbonatación, mientras que la muestra con adición de NTC presenta la menor profundidad de carbonatación.

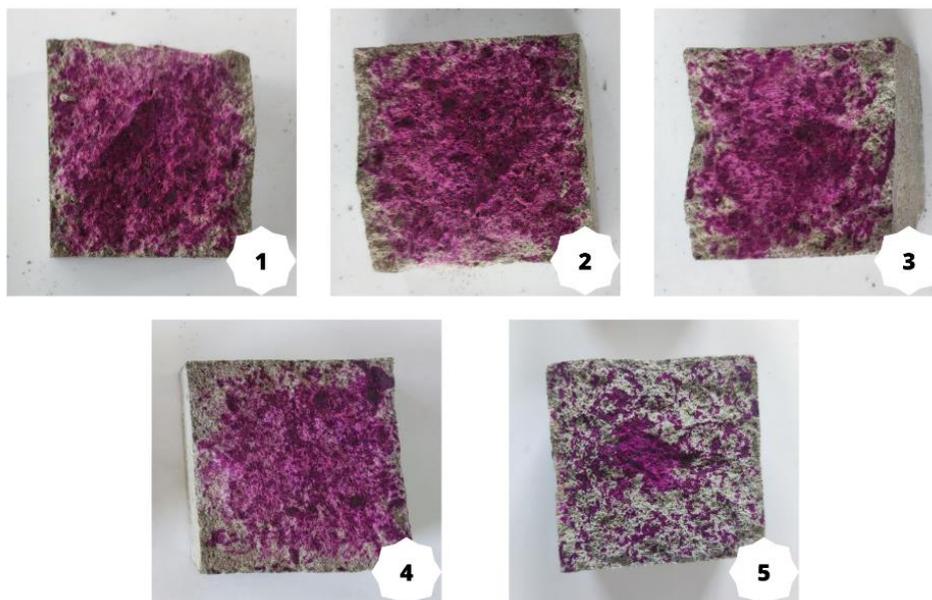
Tabla 56*Estadística descriptiva de profundidad de carbonatación*

Profun. Carbon	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
									Desv. Error	Desv. Error	
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	
5 D	5	3.79	2.22	6.01	3.5840	0.64256	1.43681	2.064	3.229	2.000	40.09%
10 D	5	5.65	4.83	10.48	7.3500	1.02308	2.28767	5.233	-1.375	2.000	31.12%
15 D	5	6.07	6.54	12.61	9.4020	1.22055	2.72924	7.449	-2.757	2.000	29.03%

Nota: Estadística descriptiva de profundidad de carbonatación (mm) de pastas, y morteros. Cemento Andino Tipo HS - Serie 3

Figura 42*Profundidad de carbonatación (mm) de morteros de Cemento tipo HS*

En la figura 42 se aprecia que las muestras con adición de carbono de cemento tipo HS presentan mayor profundidad de carbonatación, la muestra con adición de NTC presenta la menor profundidad de carbonatación.

Figura 43*Muestras carbonatadas – Serie 3*

Nota: Muestras carbonatadas – Serie 3. (1. NTC; 2. Sin adiciones; 3. Vidrio; 4. IP; 5. Carbono).

Tabla 57*Variación de PH en muestras carbonatadas*

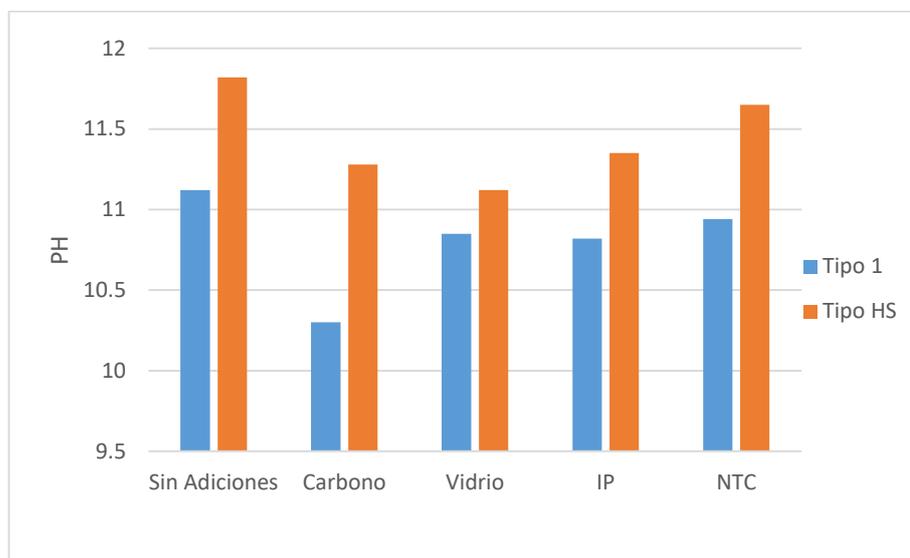
Muestra	PH
M - T1 -	11.12
M - T1 - V	10.30
M - T1 - C	10.85
M - T1 - IP	10.82
M - T1 - NTC	10.94
M - THS -	11.82
M - THS - C	11.28
M - THS - V	11.12
M - THS - IP	11.35
M - THS - NTC	11.65

Nota: Variación de PH en muestras carbonatadas de Mortero y concreto de cemento T1 y THS

- Serie 3

Figura 44

Variación de PH en muestras carbonatadas de Mortero Cemento



En la figura 44 se aprecia que la variación de PH de las muestras de cemento tipo I es menor que las muestras de cemento tipo HS.

4.1.1.9 Determinación del Coeficiente de Carbonatación de pastas y morteros

Para determinar el coeficiente de carbonatación k_c se usó la ecuación 25 (velocidad de carbonatación) tomando en cuenta la profundidad de carbonatación inicial x_0 en el acondicionamiento del ambiente del laboratorio y x profundidad de carbonatación en el tiempo t . Para determinar k_a se usó la ecuación 26.

Tabla 58

Estadística descriptiva variación de PH en muestras carbonatadas

	N	Rango		Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)	
		Estad.	Estad.							Estad.	Estad.
pH - T1	5	0.82	10.30	11.12	10.8060	0.13688	0.30607	0.094	2.768	2.000	2.83%
pH - THS	5	0.70	11.12	11.82	11.4440	0.12738	0.28483	0.081	-1.617	2.000	2.49%

Nota: Estadística descriptiva variación de PH en muestras carbonatadas de Mortero y concreto de cemento T1 y THS - Serie 3.

Tabla 59

Coefficiente de carbonatación (Kc) y Ka

Adiciones	Muestra	K _{prom} Ambiente Control	K ₁₀ ambiente al 10% mm/año ^{1/2}			Kc prom	Ka prom
			5 Días	10 Días	15 Días		
-----	3P-MA7	2.84	26.12	30.29	33.68	30.03	1.89
Carbono	3P-MA16	3.56	58.45	66.37	63.81	62.88	3.96
-----	3M-MA7	3.68	25.20	30.10	33.43	29.57	1.86
Carbono	3M-MA16	2.98	40.98	43.76	46.54	43.76	2.75
Vidrio	3M-MA25	3.99	36.74	48.28	52.85	45.96	2.89
IP	3M-MA34	3.32	39.45	57.52	59.59	52.18	3.29
NTC	3M-MA43	3.14	29.24	35.04	36.89	33.72	2.12

Nota: Coeficiente de carbonatación (Kc) y Ka, de pastas y morteros. Cemento Andino

Tabla 60

Estadística descriptiva coeficiente de carbonatación Kc

Kc	N	Rango		Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)	
		Estad.	Estad.							Estad.	Estad.
5 D	5	15.78	25.20	40.98	34.3220	3.04557	6.81010	46.377	-2.025	2.000	19.84%

10 D	5	27.42	30.10	57.52	42.9400	4.84273	10.82867	117.260	-0.993	2.000	25.22%
15 D	5	26.16	33.43	59.59	45.8600	4.86210	10.87200	118.200	-1.892	2.000	23.71%

Nota: Estadística descriptiva coeficiente de carbonatación Kc, de pastas y morteros. Cemento

Andino Tipo I serie 3

Tabla 61

Coefficiente de carbonatación (Kc) y (Ka)

Adiciones	Muestra	K _{prom} Control 10 días mm/año ^{1/2}	kc mm/año ^{1/2}			Kc prom	Ka prom
			5 Días	10 Días	15 Días		
-----	3P-MB7	3.93	20.99	25.35	27.92	24.75	1.56
Carbono	3P-MB16	3.56	30.11	35.83	38.95	34.96	2.20
-----	3M-MB7	3.74	24.47	36.69	35.94	32.37	2.04
Carbono	3M-MB16	3.68	28.16	63.18	62.15	51.16	3.22
Vidrio	3M-MB25	3.80	50.98	53.67	58.71	54.45	3.43
IP	3M-MB34	3.26	28.68	38.68	42.50	36.62	2.31
NTC	3M-MB43	3.14	18.46	29.04	32.14	26.55	1.67

Nota: Coeficiente de carbonatación (Kc) y (Ka) de pastas, y morteros de Cemento Andino, Tipo HS Serie 3

Tabla 62

Estadística descriptiva coeficiente de carbonatación Kc

Kc	N	Rang	Míni	Máxi	Media	Desv.	Varianz	Curtosis	coeficient		
		o	mo	mo		Desviaci				a	e de
		o	mo	mo		ón			variación		
		Est	Estad	Estad.	Estad.	Desv.	Estad.	Estad.	Desv.		
		ad.	d.	.	Estad.	Error	Estad.	Estad.	Error		
		Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.		
5 D	5	32.5 2	18.46	50.98	30.15 00	5.5178 3	12.3382 4	152.232	3.219	2.000	40.92%
10 D	5	34.1 4	29.04	63.18	44.25 20	6.1911 4	13.8438 1	191.651	- 1.398	2.000	31.28%
15 D	5	30.0 1	32.14	62.15	46.28 80	6.0311 9	13.4861 5	181.876	- 2.753	2.000	29.14%

Nota: Estadística descriptiva coeficiente de carbonatación Kc, de pastas y morteros. Cemento

Andino Tipo HS serie 3.

4.1.1.10 *Determinación de Incremento de masa pastas y morteros serie 3*

El incremento de masa en las muestras estudiadas es consecuencia del proceso de carbonatación en los tiempos establecidos, estas se obtuvieron midiendo las masas iniciales sin carbonatar, luego después de los diferentes tiempos de carbonatación como se muestran en las tablas 63 y 65.

Tabla 63

Ganancia de masa de pastas y morteros en carbonatación acelerada

Muestra	Masa sin carbonatar (g)	Masa carbonatada 5 Días (g)	Masa carbonatada 10 Días (g)	Masa carbonatada 15 Días (g)	Masa carbonatada Promedio (g)
3P-MA7	280.54	281.40			0.81
3P-MA8	279.76	280.83	281.03		1.18
3P-MA9	281.33	282.24	282.39	282.46	1.11
3P-MA16	278.54	279.38			0.86
3P-MA17	280.01	280.87	281.18		1.22
3P-MA18	279.82	280.70	280.96	281.00	1.17
3M-MA7	268.11	272.90			4.92
3M-MA8	272.96	277.52	277.36		4.87
3M-MA9	274.13	278.34	278.59	277.79	4.71
3M-MA16	270.27	276.12			5.77
3M-MA17	269.41	274.96	275.41		6.08
3M-MA18	274.46	280.11	280.58	280.43	6.01
3M-MA25	265.90	271.53			5.44
3M-MA26	267.52	273.20	273.82		6.29
3M-MA27	267.44	273.10	273.65	273.53	6.10
3M-MA34	266.39	270.76			4.16

3M-MA35	265.24	269.90	271.52		5.84
3M-MA36	266.58	271.18	272.86	273.09	6.02
3M-MA43	281.06	284.77			3.73
3M-MA44	280.30	284.13	285.45		5.08
3M-MA45	277.31	280.36	281.19	281.23	4.65

Nota: Ganancia de masa de pastas y morteros en carbonatación acelerada de cemento andino tipo I a 10% de CO₂ (serie 3).

Tabla 64

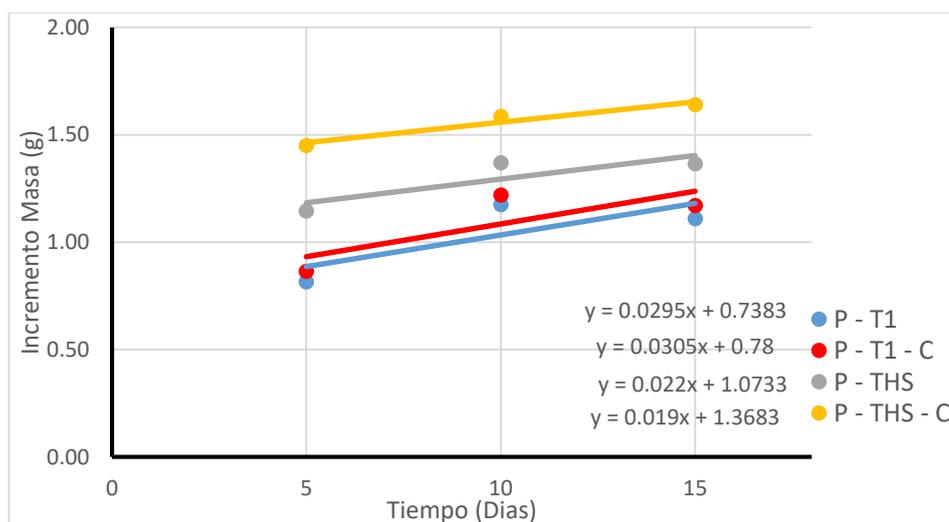
Estadística descriptiva de ganancia de masa

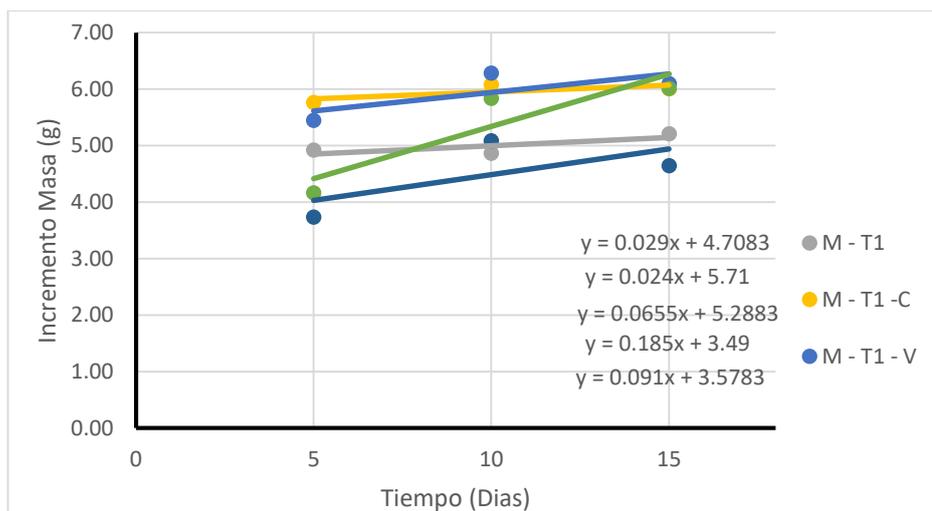
Increm. Masa	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Error	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	Desv. Error	Coficiente de variación (CV)
							Estad.				Estad.
5 D	5	2.04	3.73	5.77	4.8040	0.38205	0.85430	0.730	-2.046	2.000	17.78%
10 D	5	1.42	4.87	6.29	5.6320	0.27949	0.62496	0.391	-2.595	2.000	11.10%
15 D	5	1.45	4.65	6.10	5.4980	0.33445	0.74784	0.559	-3.296	2.000	13.60%

Nota: Estadística descriptiva de ganancia de masa de pastas y morteros en carbonatación acelerada de cemento andino tipo I serie 3.

Figura 45

Ganancia de masa de pastas (Tipo I y Tipo HS)





Nota: Ganancia de masa de pastas (Tipo I y Tipo HS) y morteros vs tiempo con y sin adición en cemento andino tipo I (serie 3).

En la figura 45 en el primero se puede apreciar que las muestras de pasta de cemento tipo HS presentan mayor incremento de masa que las muestras de pasta de cemento tipo I. En el segundo las muestras de mortero de cemento tipo I con adición de vidrio presentan mayor incremento de masa, mientras que las muestras con adición de NTC presentan menor incremento de masa.

Tabla 65

Ganancia de masa de pastas y morteros en carbonatación acelerada

Muestra	Masa sin carbonatar (g)	Masa carbonatada 5 Días (g)	Masa carbonatada 10 Días (g)	Masa carbonatada 15 Días (g)	Masa carbonatada Promedio (g)
3P-MB7	269.22	270.38			1.14
3P-MB8	269.83	270.91	271.15		1.37

3P-MB9	269.29	270.45	270.67	270.71	1.36
3P-MB16	265.61	267.09			1.45
3P-MB17	265.23	266.68	266.85		1.59
3P-MB18	264.39	265.7	266.00	266.03	1.64
3M-MB7	285.10	286.7			1.54
3M-MB8	284.86	286.35	286.76		1.96
3M-MB9	282.97	284.42	284.89	284.92	1.91
3M-MB16	289.85	291.41			1.53
3M-MB17	286.73	288.58	289.10		2.38
3M-MB18	286.27	288	288.58	288.92	2.94
3M-MB25	277.75	279.29			1.46
3M-MB26	276.48	278.09	278.39		1.76
3M-MB27	277.30	278.86	279.18	279.65	2.24
3M-MB34	277.05	277.74			1.09
3M-MB35	282.67	284.36	284.79		2.05
3M-MB36	275.20	276.93	277.33	277.97	2.74
3M-MB43	280.24	281.02			1.36
3M-MB44	281.05	281.35	282.56		2.04
3M-MB45	282.41	283.33	283.87	283.96	2.04

Nota: Ganancia de masa de pastas y morteros en carbonatación acelerada de cemento andino tipo HS a 10% de CO₂ (serie 3).

Tabla 66

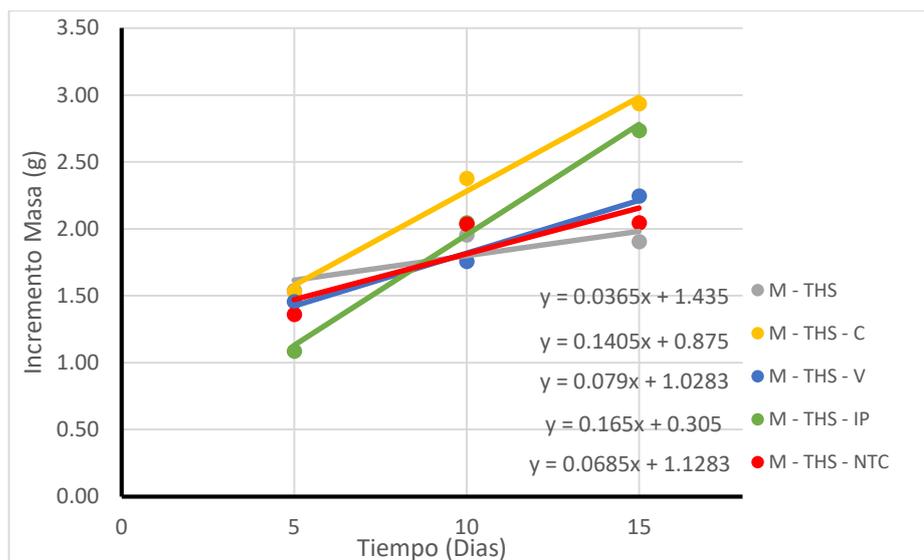
Estadística descriptiva de ganancia de masa en carbonatación

Increm. Masa	N	Rango		Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)	
		Estad.	Estad.							Estad.	Estad.
5 D	5	0.45	1.09	1.54	1.3960	0.08298	0.18555	0.034	2.058	2.000	13.29%
10 D	5	0.62	1.76	2.38	2.0380	0.10012	0.22387	0.050	1.798	2.000	10.99%
15 D	5	1.03	1.91	2.94	2.3740	0.19989	0.44697	0.200	-2.372	2.000	18.83%

Nota: Estadística descriptiva de ganancia de masa de pastas y morteros en carbonatación acelerada de cemento andino tipo HS serie 3

Figura 46

Ganancia de masa de morteros vs tiempo



Nota: Ganancia de masa de morteros vs tiempo con y sin adición en cemento andino tipo HS (serie 3).

En la figura 46, la muestra de mortero con adición de carbono de cemento tipo HS presenta mayor incremento de masa, mientras que las muestras con adición de NTC presentan una de los menores incrementos de masa.

4.1.1.11 Absorción de CO₂ Serie 3

Tabla 67

Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada

Muestra	Espécimen	%CO ₂ absorb	%CO ₂ absorb	%CO ₂ absorb
	Adiciones	Ka 5 días	Ka 10 días	Ka 15 días
-----	3P-MA7	0.85	1.21	1.48
Carbono	3P-MA16	1.79	2.53	3.10
-----	3M-MA7	0.84	1.19	1.46
Carbono	3M-MA16	1.24	1.76	2.15
Vidrio	3M-MA25	1.31	1.85	2.26
IP	3M-MA34	1.49	2.10	2.57
NTC	3M-MA43	0.96	1.35	1.66

Nota: Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada de pastas y morteros de cemento andino tipo T1 a 10% de CO₂. Serie 3.

Tabla 68

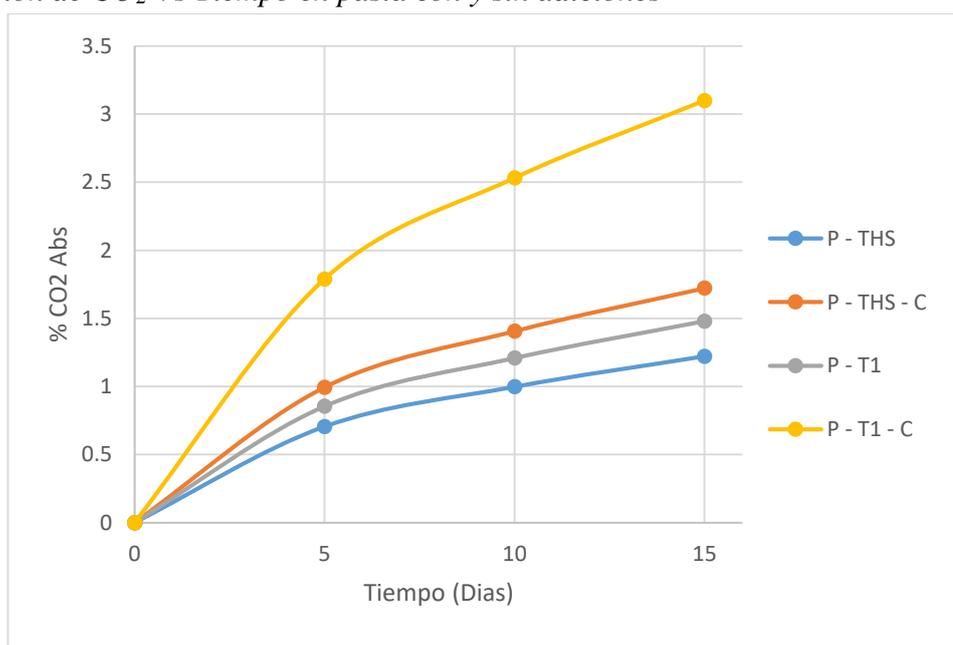
Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada

%CO ₂ Abs.	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
									Desv. Error	Desv. Error	
Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	
5 D	5	0.65	0.84	1.49	1.1680	0.11830	0.26452	0.070	-1.711	2.000	22.65%
10 D	5	0.91	1.19	2.10	1.6500	0.16676	0.37289	0.139	-1.818	2.000	22.60%
15 D	5	1.11	1.46	2.57	2.0200	0.20251	0.45282	0.205	-1.749	2.000	22.42%

Nota: Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada de pastas y morteros de cemento andino tipo T1 serie 3

Figura 47

Absorción de CO₂ Vs Tiempo en pasta con y sin adiciones

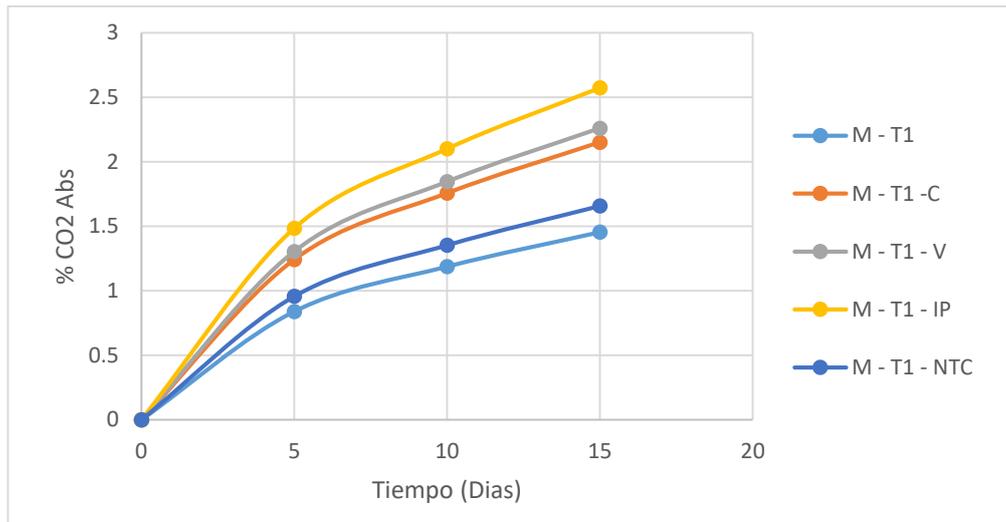


Nota: Absorción de CO₂ Vs Tiempo en pasta con y sin adiciones – Cemento Tipo I y Tipo HS.

En la figura 47 se aprecia que la muestra de pasta con adición de carbono de cemento tipo I presenta la mayor absorción de porcentaje de CO₂, mientras que la muestra sin adición de cemento tipo HS presenta el menor porcentaje de absorción de CO₂.

Figura 48

Absorción de CO₂ Vs Tiempo en morteros - serie 3

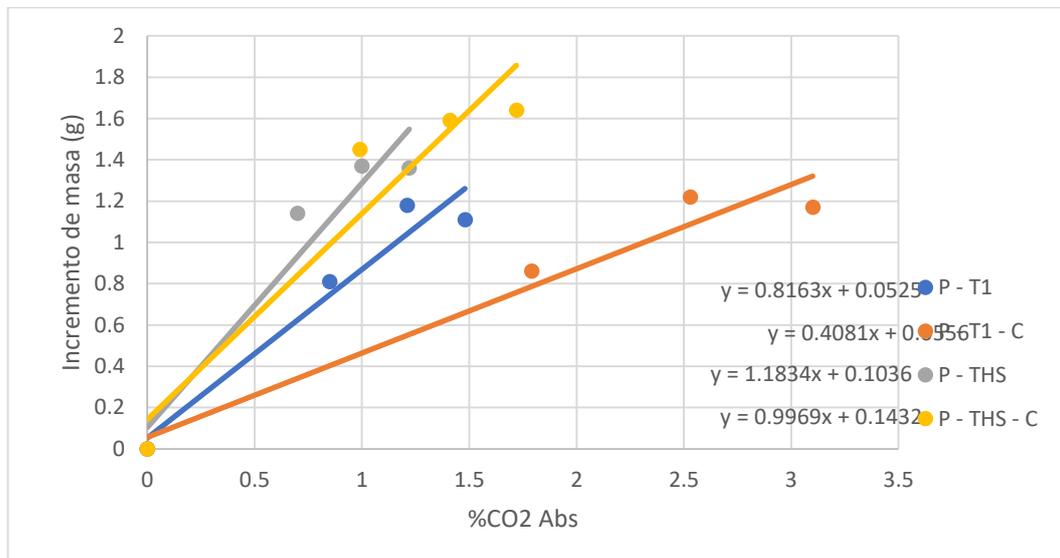


Nota: Absorción de CO₂ Vs Tiempo en morteros con adiciones Cemento Tipo I serie 3

En la figura 48 se aprecia que la muestra de mortero con adición de IP de cemento tipo I presenta la mayor absorción de porcentaje de CO₂, mientras que la muestra con adición de NTC presenta el menor porcentaje de absorción de CO₂.

Figura 49

Ganancia de masa de pastas vs % de absorción de CO₂

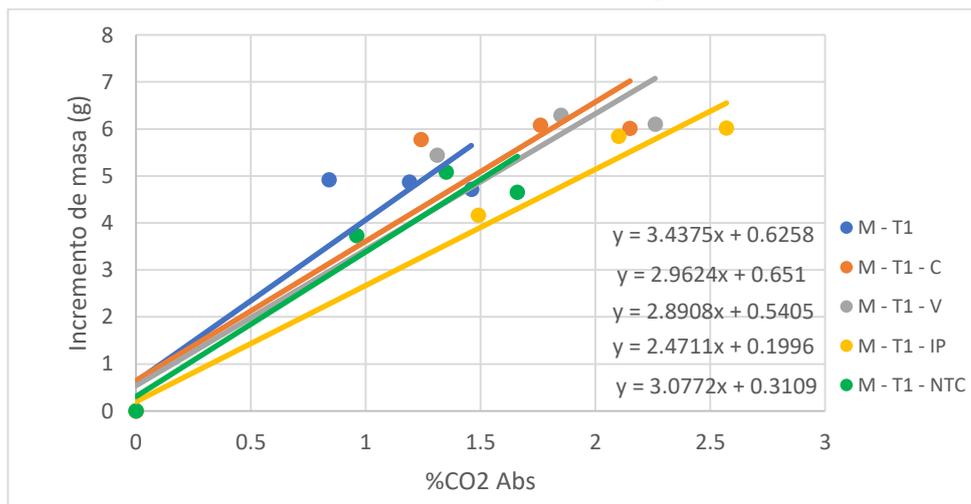


Nota: Ganancia de masa de pastas vs % de absorción de CO₂ con y sin adición de carbono en cemento andino tipo I y tipo HS (serie 3)

En la figura 49 se aprecia que la relación de muestra de pasta con adición de carbono de cemento tipo I es mayor que la relación de muestra de pasta con adición de carbono de cemento tipo HS.

Figura 50

Ganancia de masa de morteros vs % de absorción de CO₂ con aditivos



Nota: Ganancia de masa de morteros vs % de absorción de CO₂ con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante y NTC en cemento andino tipo I (serie 3).

En la figura 50 se aprecia que la relación de muestra de mortero con adición de IP de cemento tipo I es mayor que la relación de muestra con adición de carbono.

Tabla 69

Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada de cemento tipo HS

Muestra	Espécimen	%CO ₂ absorb	%CO ₂ absorb	%CO ₂ absorb
	Adiciones	K _a 5 días	K _a 10 días	K _a 15 días
-----	3P-MB7	0.70	1.00	1.22
Carbono	3P-MB16	0.99	1.41	1.72
-----	3M-MB7	0.92	1.30	1.60
Carbono	3M-MB16	1.45	2.06	2.52
Vidrio	3M-MB25	1.55	2.19	2.68
IP	3M-MB34	1.04	1.48	1.81
NTC	3M-MB43	0.75	1.07	1.31

Nota: Ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada de cemento andino tipo THS a 10% de CO₂

(serie 3).

Tabla 70

Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en carbonatación

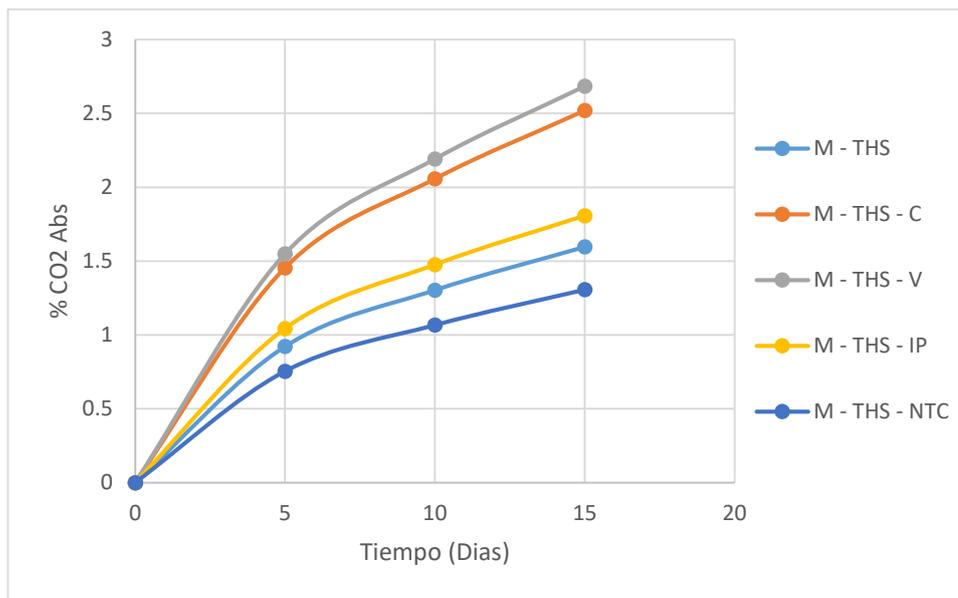
%CO ₂ Abs.	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.
5 D	5	0.80	0.75	1.55	1.1420	0.15406	0.34449	0.119	-2.420	2.000	30.17%
10 D	5	1.12	1.07	2.19	1.6200	0.21714	0.48554	0.236	-2.480	2.000	29.97%

15 D 5 1.37 1.31 2.68 1.9840 0.26493 0.59239 0.351 -2.456 2.000 29.86%

Nota: Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en carbonatación acelerada de pastas y morteros de cemento andino tipo THS serie 3

Figura 51

Absorción de CO₂ Vs Tiempo en morteros

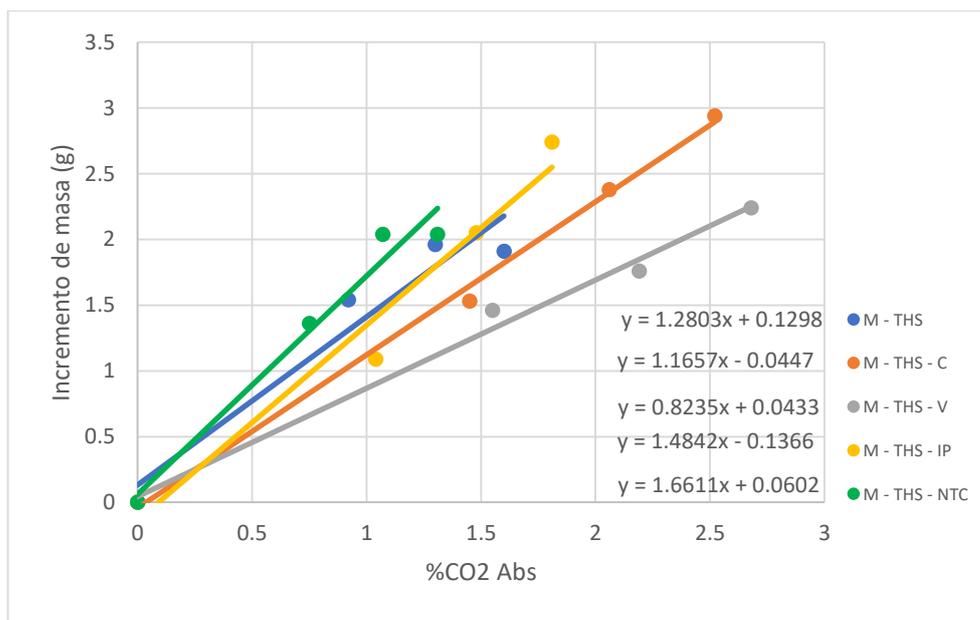


Nota: Absorción de CO₂ Vs Tiempo en morteros con adiciones – Cemento Tipo HS serie 3.

En la figura 51 se aprecia que la muestra de mortero con adición de vidrio de cemento tipo HS presenta la mayor absorción de porcentaje de CO₂, la muestra con adición de NTC presenta el menor porcentaje de absorción de CO₂.

Figura 52

Ganancia de masa de morteros vs % de absorción de CO₂ con aditivos



Nota: Ganancia de masa de morteros vs % de absorción de CO₂ con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante y NTC en cemento andino tipo HS (serie 3).

En la figura 52 se aprecia que la relación de muestra de mortero con adición de vidrio de cemento tipo HS es mayor que la relación de muestra con adición de NTC.

4.1.1.12 Medidas de resistencia mecánica a compresión

Las medidas de resistencia a la compresión de pastas, morteros de cementos Tipo I y Tipo HS. Serie 3 se realizaron en la Máquina ELE Internacional (Versa Tester), usando las Norma técnica peruana (NPT 334.051) en el Laboratorio de Ensayo de materiales de la FIC UNI, para muestras de geometría 5x5x5 cm de pastas y morteros de la serie 3 de cementos andino tipo I y tipo HS. Los resultados se muestran en las tablas 71, 72, 73 y 74.

Tabla 71

Resistencia a la Compresión (MPa) de pastas, y morteros Cemento

Adiciones	Muestra	Resistencia a la compresión	Resistencia a la compresión: Muestra Carbonatada (MPa)		
		M. Inicial (MPa)	5 Días	10 Días	15 Días
-----	3P-MA3	77.15			
-----	3P-MA4		74.47		

-----	3P-MA5		71.24	
-----	3P-MA6			68.42
Carbono	3P-MA12	70.03		
Carbono	3P-MA13		69.88	
Carbono	3P-MA14		66.18	
Carbono	3P-MA15			63.62
-----	3M-MA3	25.78		
-----	3M-MA4		24.78	
-----	3M-MA5		22.10	
-----	3M-MA6			21.14
Carbono	3M-MA12	24.73		
Carbono	3M-MA13		19.79	
Carbono	3M-MA14		17.42	
Carbono	3M-MA15			15.86
Vidrio	3M-MA21	21.06		
Vidrio	3M-MA22		20.77	
Vidrio	3M-MA23		18.17	
Vidrio	3M-MA24			17.53
IP	3M-MA30	24.44		
IP	3M-MA31		20.15	
IP	3M-MA32		18.63	
IP	3M-MA33			17.28
NTC	3M-MA39	25.51		
NTC	3M-MA40		23.59	
NTC	3M-MA41		21.23	
NTC	3M-MA42			19.58

Tabla 72*Resistencia a la Compresión (MPa)*

Muestra	Resistencia a la compresión M. Inicial (MPa)	Resistencia a la compresión: Muestra Carbonatada (MPa)			R ²
		5 Días	10 Días	15 Días	

-----	3P-MA3	77.15								
-----	3P-MA4		74.47	71.24	68.42	0.9996				
Carbono	3P-MA12	70.03								
Carbono	3P-MA13		69.88	66.18	63.62	0.544				
-----	3M-MA3	25.78								
-----	3M-MA4		24.78	22.10	21.14	0.9757				
Carbono	3M-MA12	24.73								
Carbono	3M-MA13		19.79	17.42	15.86	0.986				
Vidrio	3M-MA21	21.06								
Vidrio	3M-MA22		20.77	18.17	17.53	0.9917				
IP	3M-MA30	24.44								
IP	3M-MA31		20.15	18.63	17.28	0.851				
NTC	3M-MA39	25.51								
NTC	3M-MA40		23.59	21.23	19.58	0.965				

Nota: Resistencia a la Compresión (MPa) de pastas, Cemento Andino Tipo I Serie 3.

Tabla 73

Estadística descriptiva de resistencia a la Compresión (MPa)

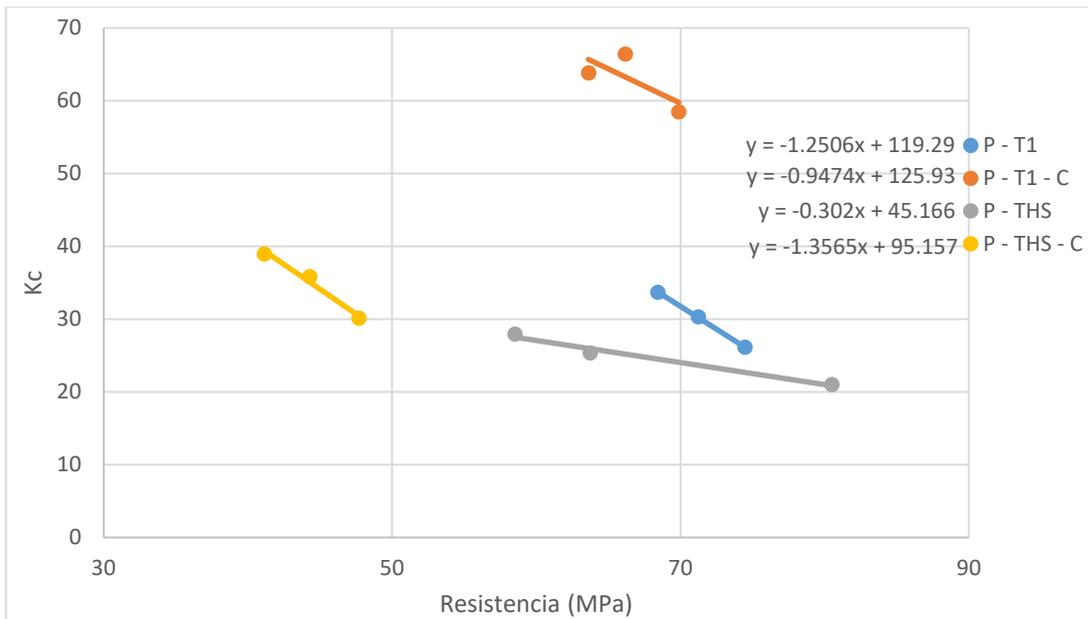
Res. Compre.	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Error	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)	
										Desv. Error	Desv. Error
5 D	5	4.99	19.79	24.78	21.8160	0.99767	2.23085	4.977	-2.305	2.000	10.23%
10 D	5	4.68	17.42	22.10	19.5100	0.91117	2.03744	4.151	-2.440	2.000	10.44%
15 D	5	5.28	15.86	21.14	18.3480	0.91345	2.04254	4.172	-0.667	2.000	11.13%

Nota: Estadística descriptiva de resistencia a la Compresión (MPa) de pastas, y morteros

Cemento Andino Tipo I Serie 3.

Figura 53

Recta de ajuste del coeficiente de carbonatación k_c vs la resistencia

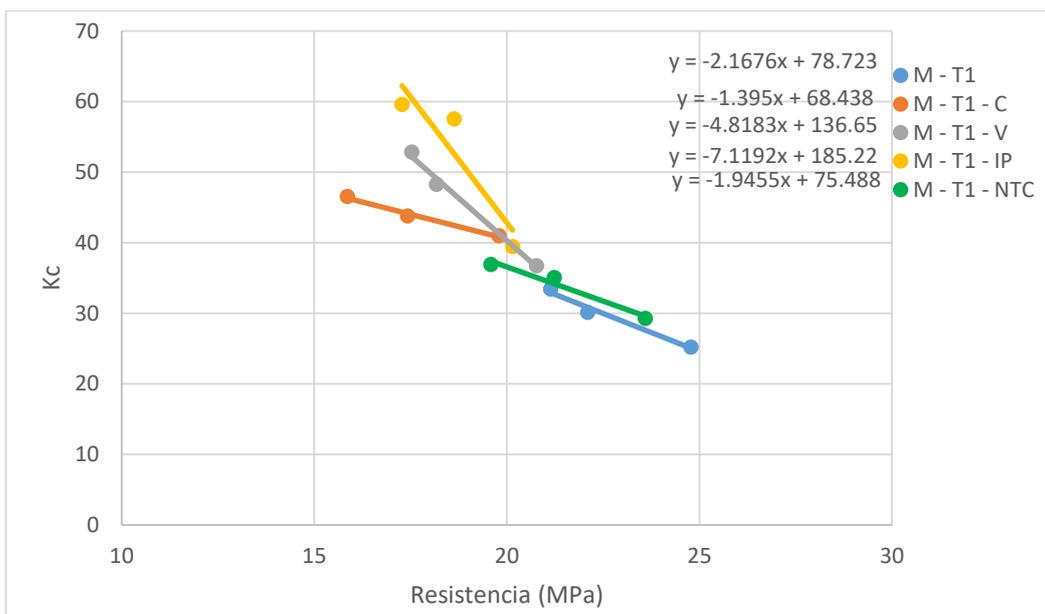


Nota: Recta de ajuste del coeficiente de carbonatación k_c vs la resistencia a la compresión R de pastas de cementos andino tipo I y tipo HS con y sin adición de carbono, vidrio, impermeabilizante y NTC.

En la figura 53 la relación de la muestra de pasta con adición de carbono de cemento tipo I es mayor, mientras que la relación de pasta sin adición de cemento tipo HS es menor.

Figura 54

Recta de ajuste del coeficiente de carbonatación k_c vs la resistencia



Nota: Recta de ajuste del coeficiente de carbonatación k_c vs la resistencia a la compresión R de morteros de cementos andino tipo I con y sin adición de carbono, vidrio, impermeabilizante y NTC

En la figura 54, la relación de la muestra de mortero de cemento tipo I con adición de IP tiene K_c mayor y R menor, mientras que en la muestra con adición de NTC K_c menor y R mayor.

Tabla 74

Resistencia a la Compresión (MPa) de pastas, y morteros Cemento

Adiciones	Muestra	Resistencia a la compresión M. Inicial (MPa)	Resistencia a la compresión: Muestra Carbonatada (MPa)		
			5 Días	10 Días	15 Días
-----	3P-MB3	83.37			
-----	3P-MB4		80.49		
-----	3P-MB5			63.75	
-----	3P-MB6				58.52
Carbono	3P-MB12	48.05			
Carbono	3P-MB13		47.69		
Carbono	3P-MB14			44.28	
Carbono	3P-MB15				41.15
-----	3M-MB3	30.07			
-----	3M-MB4		29.46		
-----	3M-MB5			28.99	
-----	3M-MB6				26.39
Carbono	3M-MB12	29.54			
Carbono	3M-MB13		28.89		
Carbono	3M-MB14			26.64	
Carbono	3M-MB15				24.06
Vidrio	3M-MB21	29.52			

Vidrio	3M-MB22		29.16		
Vidrio	3M-MB23			28.14	
Vidrio	3M-MB24				23.07
IP	3M-MB30	29.39			
IP	3M-MB31		28.76		
IP	3M-MB32			27.46	
IP	3M-MB33				24.13
NTC	3M-MB39	29.88			
NTC	3M-MB40		29.04		
NTC	3M-MB41			28.47	
NTC	3M-MB42				23.09

Nota: Resistencia a la Compresión (MPa) de pastas, Cemento Andino Tipo HS Serie 3.

Tabla 75

Resistencia a la Compresión (MPa) de pastas, y morteros Cemento

Adiciones	Muestra	Resistencia a la compresión M. Inicial (MPa)	Resistencia a la compresión: Muestra Carbonatada (MPa)			R ²
			5 Días	10 Días	15 Días	
-----	3P-MB3	83.37				
-----	3P-MB4		80.49	63.75	58.52	0.9789
Carbono	3P-MB12	48.05				
Carbono	3P-MB13		47.69	44.28	41.15	0.9796
-----	3M-MB3	30.07				
-----	3M-MB4		29.46	28.99	26.39	0.3295
Carbono	3M-MB12	29.54				
Carbono	3M-MB13		28.89	26.64	24.06	0.6915
Vidrio	3M-MB21	29.52				
Vidrio	3M-MB22		29.16	28.14	23.07	0.9274
IP	3M-MB30	29.39				
IP	3M-MB31		28.76	27.46	24.13	0.7697
NTC	3M-MB39	29.88				
NTC	3M-MB40		29.24	28.47	26.09	0.5429

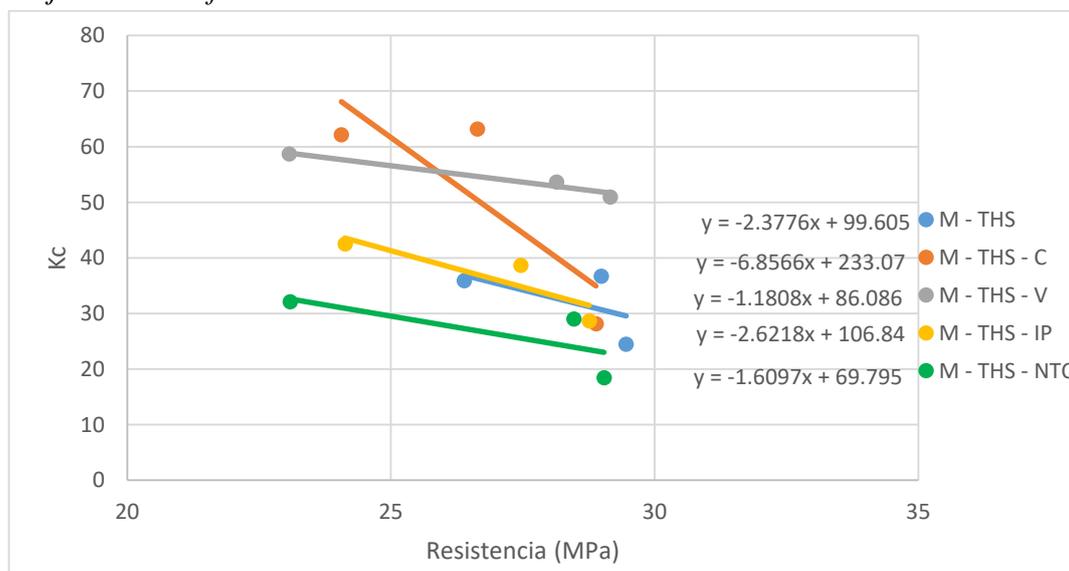
Nota: Resistencia a la Compresión promedio (MPa) de pastas y morteros, Cemento Tipo HS

Serie 3.

Tabla 76*Estadística descriptiva de resistencia a la Compresión (MPa)*

Res. Compre.	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
									Desv. Error	Desv. Error	
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	
5 D	5	0.70	28.76	29.46	29.1020	0.12500	0.27950	0.078	-1.343	2.000	0.96%
10 D	5	2.35	26.64	28.99	27.9400	0.40889	0.91430	0.836	-0.478	2.000	3.27%
15 D	5	3.32	23.07	26.39	24.7480	0.63906	1.42899	2.042	-2.361	2.000	5.77%

Nota: Estadística descriptiva de resistencia a la Compresión (MPa) de pastas, y morteros Cemento Andino Tipo HS Serie 3.

Figura 55*Recta de ajuste del coeficiente de carbonatación k_c vs la resistencia*

Nota: Recta de ajuste del coeficiente de carbonatación k_c vs la resistencia a la compresión R de morteros de cementos andino tipo HS con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, y NTC.

En la figura 55, la relación de la muestra de mortero de cemento tipo HS con adición de vidrio presenta mayor (k_c) y menor (R), mientras que la relación de muestra con adición de NTC presenta menor(k_c) mayor (R).

4.1.1.13 Resultados: Difracción de Rayos X (DRX)

En los difractogramas de los morteros de cemento tipo I y tipo HS se identifican los picos que corresponden a las intensidades de la difracción para cada posición del Angulo o 2θ para la portlandita (P) y la calcita (C) y cuarzo (Q)

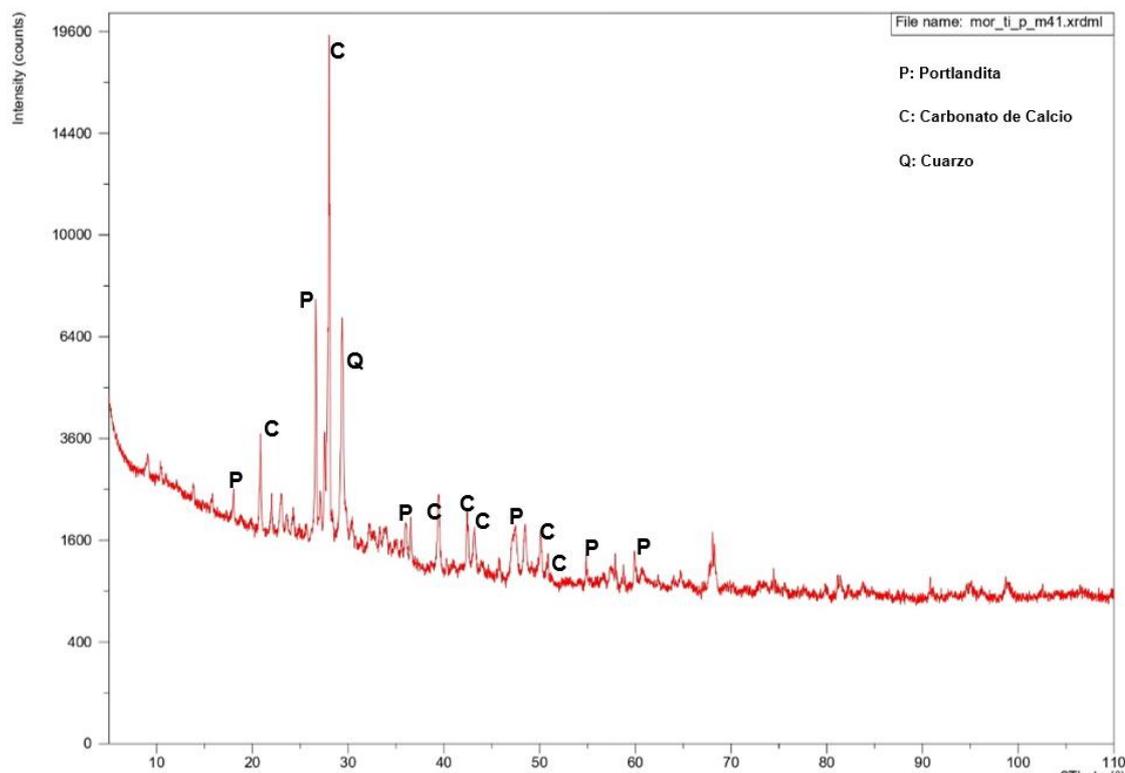
Tabla 77

Fichas de patrones normalizados para el análisis de DRX

Posición Angular $2\theta_{hkl}$; d(Å)	Portlandita (P) Ficha N.º 4-733, distancia interplanar $d_{(hkl)}$; Å(Int.)	Posición Angular $2\theta_{hkl}$; d(Å)	Calcita (C) Ficha N.º 5-586, distancia interplanar $d_{(hkl)}$; Å(Int.)
18.18°; 4.88Å	$d_{1(001)} = 4.90 \text{ Å} (74)$	29.28°; 3.04Å	$d_{1(104)} = 3.035 \text{ Å} (100)$
28.40°; 3.14Å	$d_{2(100)} = 3.112 \text{ Å} (23)$	39.52°; 2.278Å	$d_{2(113)} = 2.85 \text{ Å} (18)$
34.18°; 2.621Å	$d_{3(101)} = 2.629 \text{ Å} (100)$	43.18°; 2.093Å	$d_{3(202)} = 2.095 \text{ Å} (18)$
47.24°; 1.922Å	$d_{4(102)} = 1.927 \text{ Å} (42)$	47.48°; 1.912Å	$d_{4(108)} = 1.913 \text{ Å} (17)$
50.96°; 1.791Å	$d_{5(110)} = 1.796 \text{ Å} (36)$	48.48°; 1.876Å	$d_{5(116)} = 1.875 \text{ Å} (17)$

Figura 56

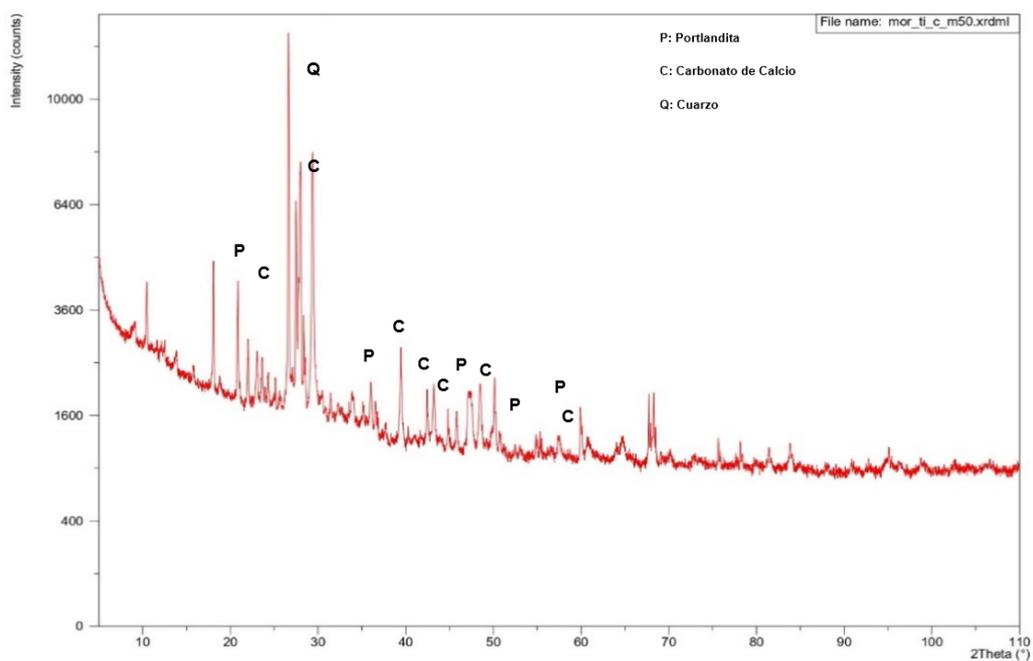
Difractogramas de Mortero Tipo I sin adiciones



En esta grafica se ha identificado los picos más representativos de los compuestos cristalinos, en base a los patrones de comparación de la tabla (36) se encontró que el pico más alto corresponde al CaCO_3 para el ángulo 39.52° ; y para la portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para el ángulo $28,40^\circ$.

Figura 57

Difractogramas de Mortero Tipo I con carbono



En la figura 57 se observa el tamaño del pico de la calcita (CaCO_3) disminuyó, al igual que la de la portlandita (Ca(OH)_2) para los picos representativos.

Figura 58

Difractogramas de Mortero Tipo I con vidrio

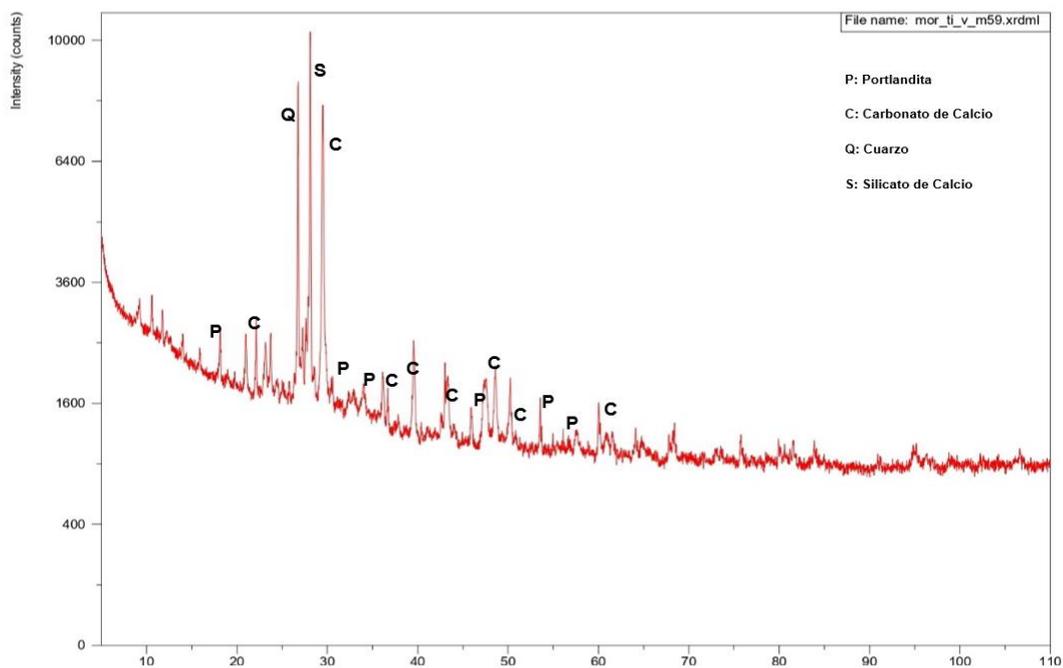
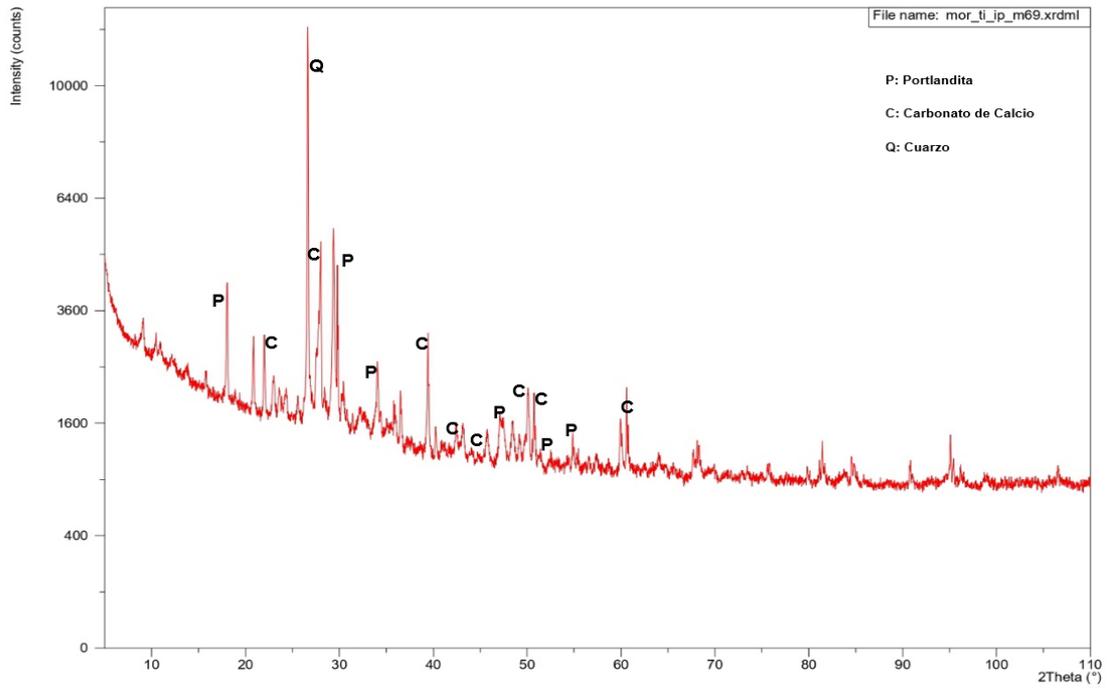


Figura 59

Difractogramas de Mortero Tipo I con Impermeabilizante

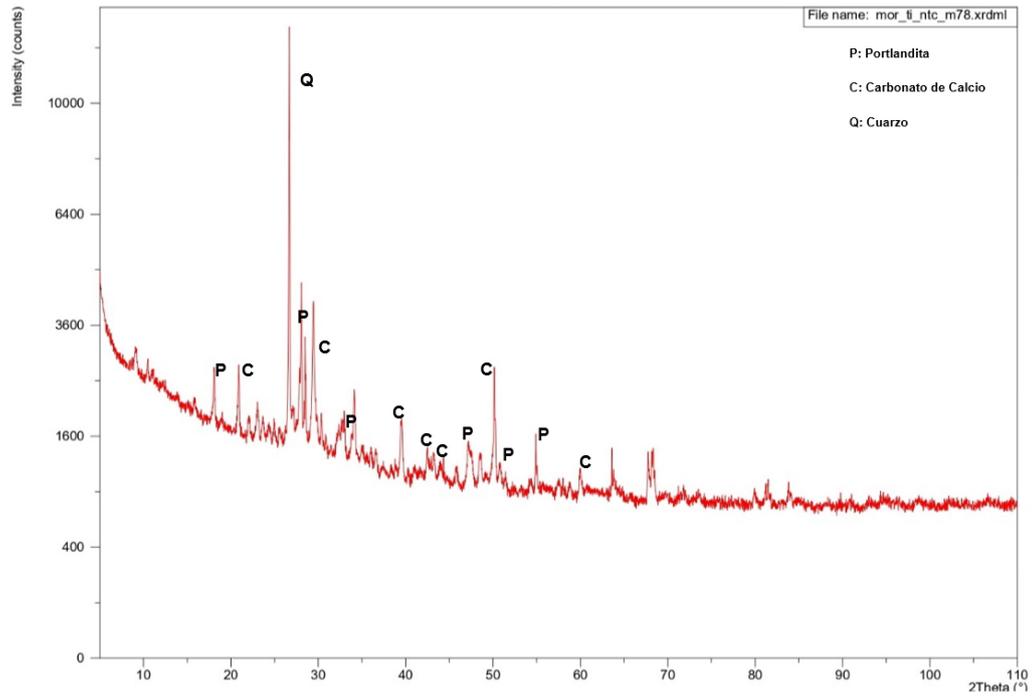


En la Figura 58 se muestra que el pico más alto corresponde al silicato de calcio (Ca_3SiO_5) debido a que el aditivo es el vidrio y este aporta la sílice (SiO_2), el tamaño del pico más alto de CaCO_3 se mantiene y de la portlandita disminuye.

En la figura 59 se observa el pico más grande es de cuarzo luego le sigue la portlandita y la caliza.

Figura 60

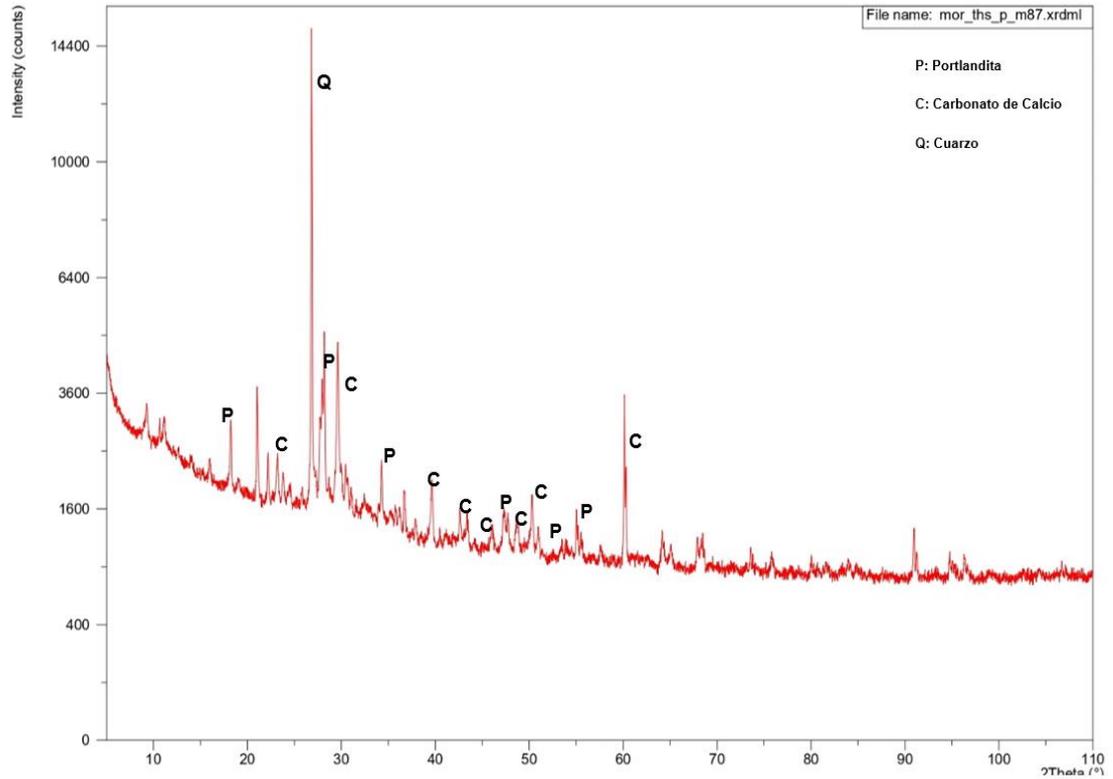
Difractogramas de Mortero Tipo I con Nanotubo de carbono



En la figura 60 se muestra difractogramas en las que el pico más grande es el de cuarzo, le sigue la portlandita y la calcita.

Figura 61

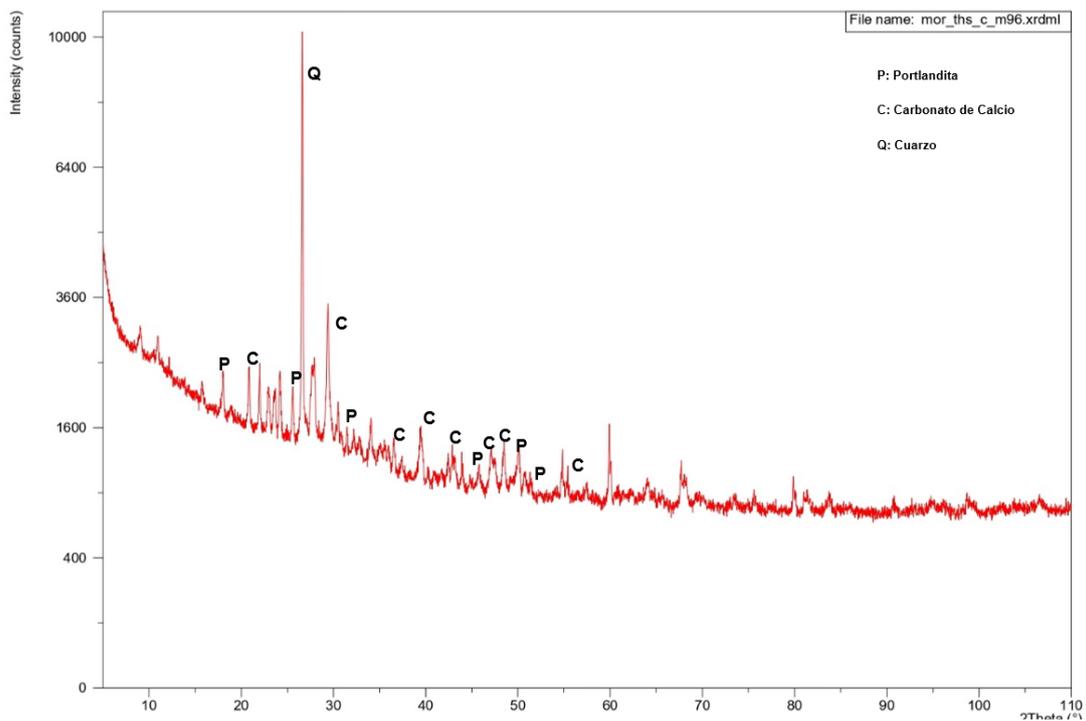
Diffractogramas de Mortero Tipo HS sin aditivos



Para realizar el análisis de DRX del mortero carbonatado de cemento tipo HS sin aditivos se ha analizado las fichas patrón para identificar las fases cristalinas presentes en el cemento tipo HS (Q, P, C), después de comparar los ángulos de los picos más representativos se puede observar que el pico más grande es del cuarzo (Q), mientras para portlandita (P) y la calcita (C) son menores y presentan tamaños similares.

Figura 62

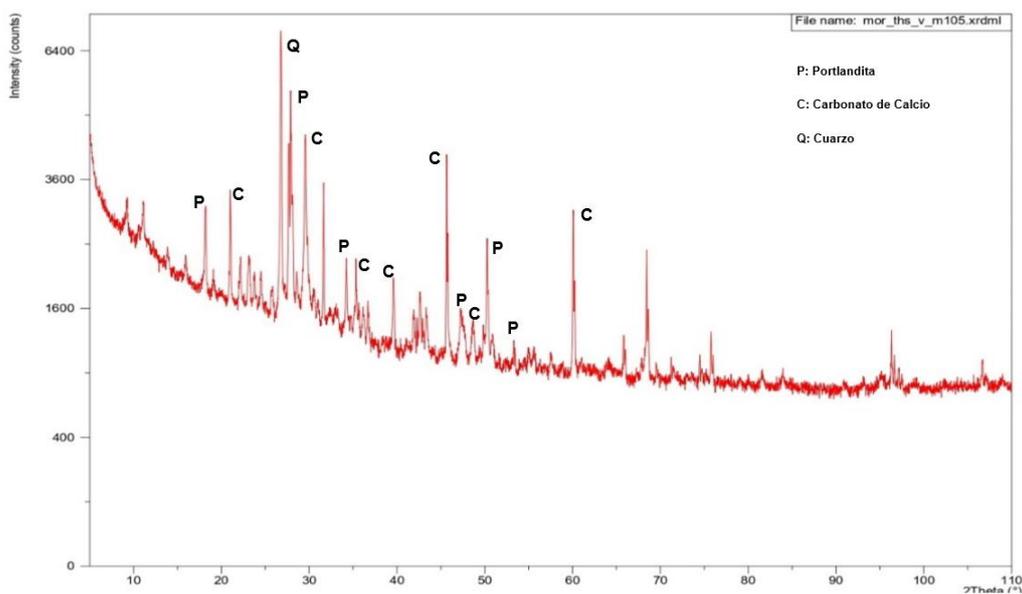
Difractogramas de Mortero Tipo HS con carbono



En la figura 62 se muestra que el cuarzo (Q) es el pico más grande respecto al pico de calcita (C) y la portlandita (P).

Figura 63

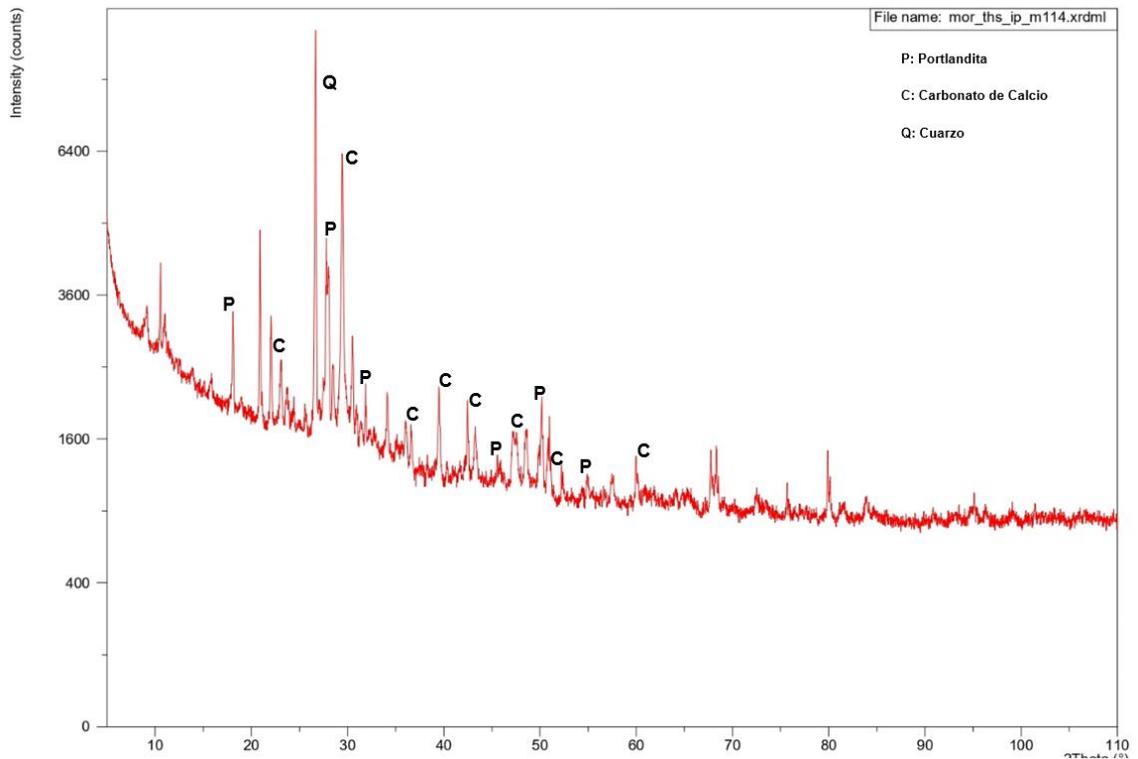
Difractogramas de Mortero Tipo HS con vidrio



En la figura 63 se muestra que la calcita (C) genera picos de mayor intensidad (tamaño) que las de portlandita (P).

Figura 64

Difractogramas de Mortero Tipo HS con impermeabilizante



En la figura 64 se puede observar una disminución del tamaño de los picos de portlandita(P) frente a los picos de la calcita (C) y manteniendo el pico más alto para el cuarzo (Q).

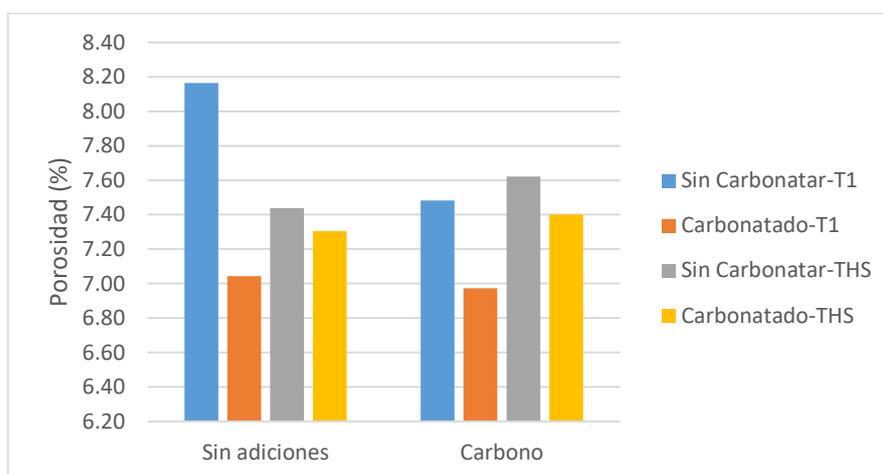
Figura 65

Difractogramas de Mortero Tipo HS con Nanotubo de carbono

3P-MA9	--	2.32	2.13	8.17	2.17	2.02	7.04
3P-MA18	Carbono	2.28	2.11	7.48	2.11	1.96	6.97
3M-MA9	--	2.30	2.10	8.79	2.12	1.95	8.40
3M-MA18	Carbono	2.22	2.06	7.30	2.05	1.91	6.66
3M-MA27	Vidrio	2.20	2.03	7.70	2.21	2.06	6.69
3M-MA36	Ip	2.18	2.00	8.42	1.98	1.85	6.95
3M-MA45	NTC	2.32	2.12	8.75	2.13	1.96	8.11

Figura 66

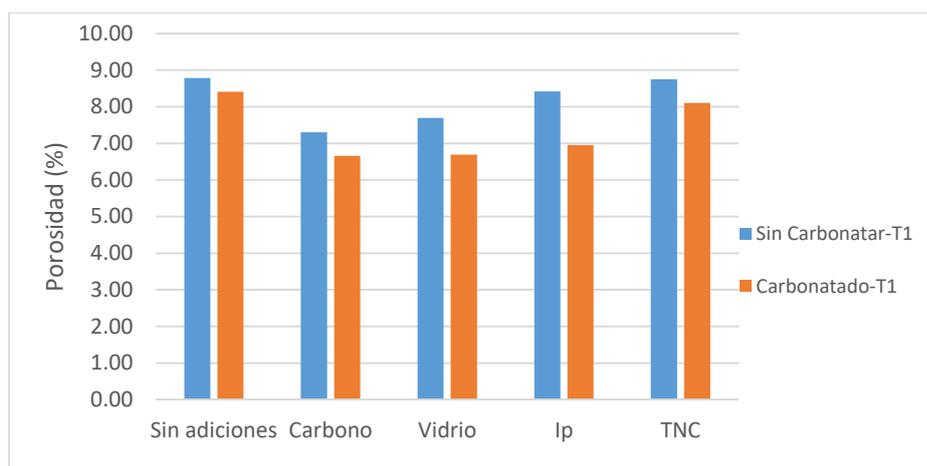
Porosidad de Pastas de cementos andino tipo I y tipo HS con aditivos



Nota: Porosidad de Pastas de cementos andino tipo I y THS con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, NTC.

Figura 67

Porosidad de Mortero de cementos andino tipo I



Nota: Porosidad de Pastas de cementos andino tipo I con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, NTC.

En la figura 67 se muestra la variación de porosidad de muestras de morteros cemento tipo I observándose que los morteros, con adición de NTC presentan mayor porcentaje de porosidad frente al impermeabilizante, vidrio y carbono; pero menor porosidad frente al mortero sin adiciones.

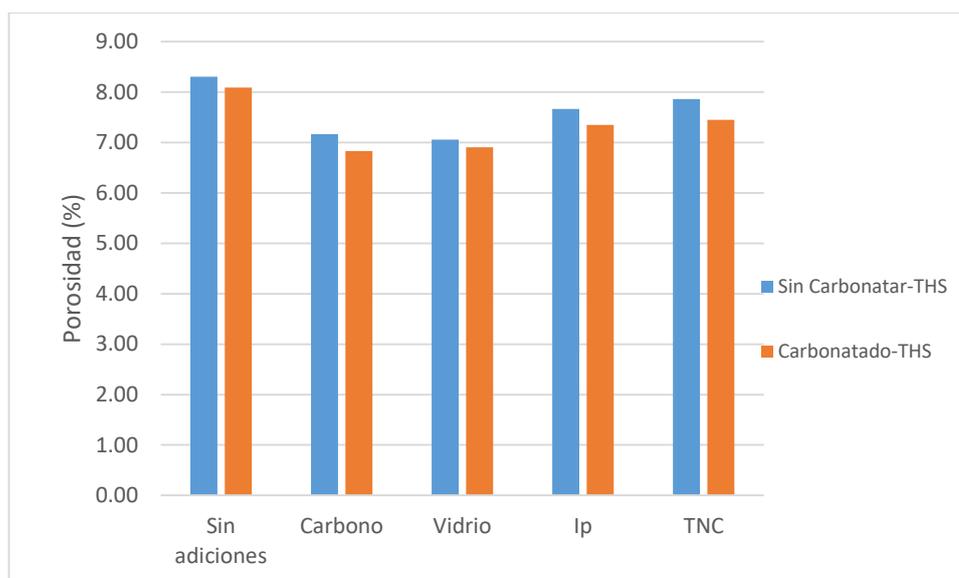
Tabla 79

Tabla de porosidad de pastas y morteros del cemento Tipo HS

Muestra	Adiciones	Antes de Carbonatar			Después de carbonatar		
		Densidad Aparente (g/cm ³)	Densidad Relativa (g/cm ³)	Porosidad (%)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Densidad Relativa (g/cm ³)	Porosidad (%)
3P-MB9	--	2.19	2.03	7.44	2.00	1.85	7.30
3P-MB18	Carbono	2.18	2.01	7.62	2.00	1.85	7.40
3M-MB9	--	2.33	2.14	8.31	2.14	1.97	8.09
3M-MB18	Carbono	2.31	2.15	7.17	2.11	1.97	6.83
3M-MB27	Vidrio	2.27	2.11	7.06	2.08	1.94	6.90
3M-MB36	IP	2.28	2.10	7.67	2.10	1.95	7.35
3M-MB45	NTC	2.33	2.15	7.86	2.15	1.99	7.45

Figura 68

Porosidad de Mortero de cementos andino tipo HS con aditivos



Nota: Porosidad de Mortero de cementos andino tipo THS con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, NTC

En la figura 68 se muestra que la porosidad de muestras de NTC tiene mayor porcentaje de porosidad frente a las otras adiciones siendo estos porcentajes mayores que los del cemento Tipo I.

4.1.1.14 Resultados en muestras de Serie 4 estudiadas

Los Datos experimentales de profundidad de carbonatación de la serie 4 se obtuvieron de la misma manera que de las series anteriormente estudiadas y se muestran en las tablas 80 y 81 respectivamente.

Tabla 80

Profundidad de carbonatación Serie 4

Muestra	Adiciones	Profundidad de Carbonatación 3% - X (mm)	Profundidad de Carbonatación 4% - X (mm)	Profundidad de Carbonatación 5% - X (mm)
4M-MA1	-----	1.74		
4M-MA2	-----	1.66		
4M-MA3	-----		2.90	
4M-MA4	-----		2.79	

4M-MA5	-----		2.83	
4M-MA6	-----			4.08
4M-MA7	-----			4.01
4M-MA8	-----			4.04
4M-MA9	Carbono	1.67		
4M-MA10	Carbono	1.99		
4M-MA11	Carbono		4.51	
4M-MA12	Carbono		4.57	
4M-MA13	Carbono		4.68	
4M-MA14	Carbono			5.19
4M-MA15	Carbono			5.20
4M-MA16	Carbono			5.22
4M-MA17	Vidrio	2.33		
4M-MA18	Vidrio	2.41		
4M-MA19	Vidrio		3.51	
4M-MA20	Vidrio		3.53	
4M-MA21	Vidrio		3.67	
4M-MA22	Vidrio			4.46
4M-MA23	Vidrio			4.57
4M-MA24	Vidrio			4.46
4M-MA25	IP	1.87		
4M-MA26	IP	2.22		
4M-MA27	IP		3.31	
4M-MA28	IP		3.40	
4M-MA29	IP		3.22	
4M-MA30	IP			3.95
4M-MA31	IP			4.42
4M-MA32	IP			4.68
4M-MA33	NTC	-----	-----	-----
4M-MA34	NTC	1.65		
4M-MA35	NTC	1.54		
4M-MA36	NTC		2.42	
4M-MA37	NTC		2.25	
4M-MA38	NTC			2.93
4M-MA39	NTC			3.00
4M-MA40	NTC			2.91

Nota: Profundidad de carbonatación (mm) morteros Cemento Andino Tipo I Serie 4

Tabla 81

Promedio de profundidad de carbonatación

Muestra	Profundidad de Carbonatación	Profundidad de Carbonatación	Profundidad de Carbonatación
	3%CO ₂ X* (mm)	4%CO ₂ X* (mm)	5%CO ₂ X* (mm)
M - T1	1.70	2.84	4.04
M - T1 - C	1.83	4.59	5.20
M - T1 - V	2.37	3.57	4.49

M - T1 - IP	2.05	3.31	4.35
M - T1 - NTC	1.59	2.33	2.95

Nota: Promedio de profundidad de carbonatación (mm) morteros Cemento Andino Tipo I Serie 4 en ambientes al 3%, 4%, y 5% de CO₂.

Tabla 82

Estadística descriptiva profundidad de carbonatación

Profun. Carbo.	N	Rango		Mínimo		Máximo		Media		Desv. Desviación		Varianza		Curtosis		coeficiente de variación (CV)	
		Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	
CO ₂ 3%	5	0.78	1.59	2.37	1.9080	0.13858	0.30987	0.096	-0.123	2.000	16.24%						
CO ₂ 4%	5	2.26	2.33	4.59	3.3280	0.37985	0.84936	0.721	0.619	2.000	25.52%						
CO ₂ 5%	5	2.25	2.95	5.20	4.2060	0.36705	0.82075	0.674	1.566	2.000	19.51%						

Nota: Estadística descriptiva profundidad de carbonatación (mm) morteros Cemento Andino

Tipo I Serie 4 en ambientes al 3%, 4%, y 5% de CO₂.

Figura 69

Histogramas de las profundidades de carbonatación

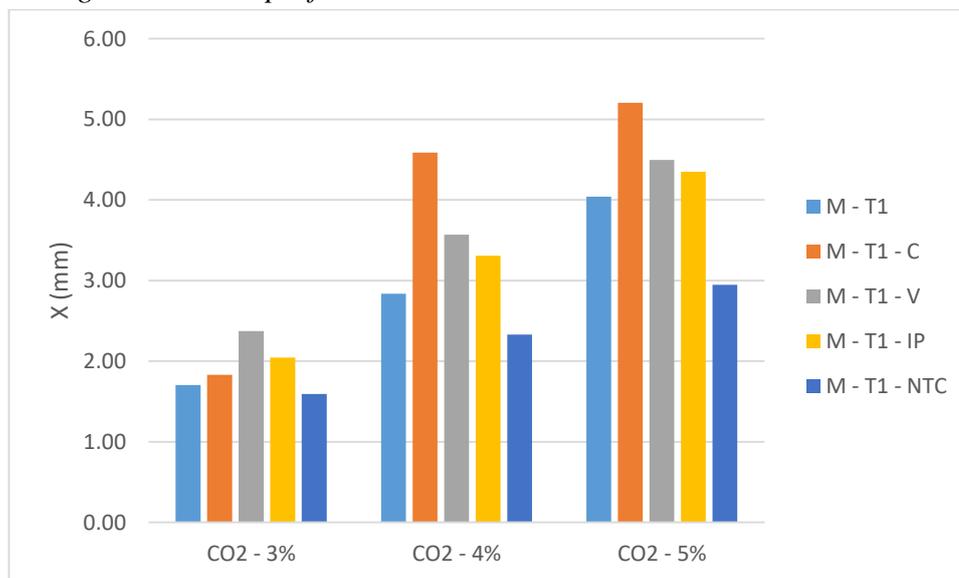
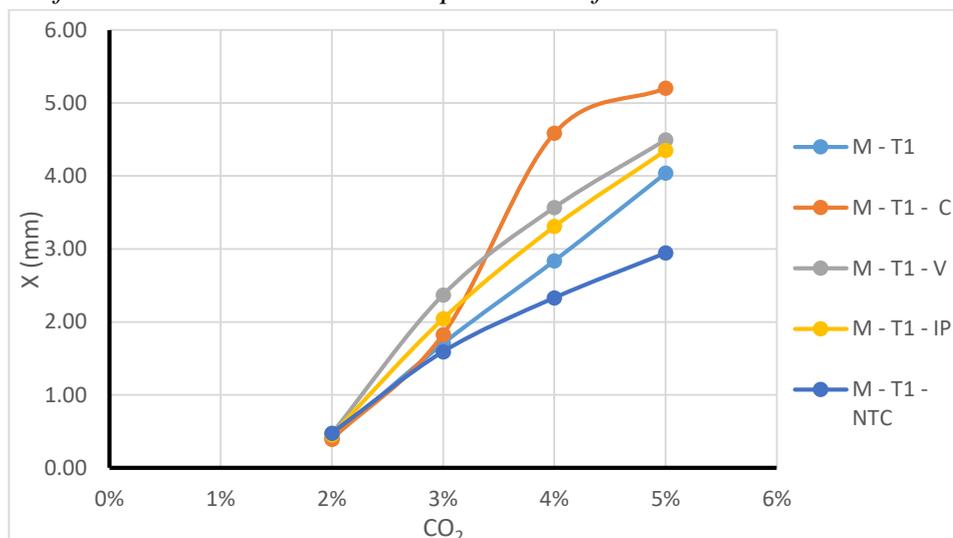


Figura 70

Profundidad de carbonatación expuestos a diferentes % de CO₂



Nota: Histogramas de las profundidades de carbonatación de morteros de cements andino tipo I con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, NTC, sometidos a exposición acelerada a 3%, 4% y 5% de CO₂.

En las figuras 69 y 70 se observa muestras de mortero de cemento tipo I presentan profundidades de carbonatación para muestras expuestas a ambientes de CO₂ de 3%-5% mostrándonos la tendencia parabólica de las curvas de carbonatación para las muestras con sus respectivas adiciones.

Tabla 83

Profundidad de carbonatación

Muestra	Adiciones	Profundidad de Carbonatación 3%CO ₂ - X (mm)	Profundidad de Carbonatación 4%CO ₂ - X (mm)	Profundidad de Carbonatación 5%CO ₂ - X (mm)
4M-MB1	-----	-----	-----	-----
4M-MB2	-----	1.99		
4M-MB3	-----	2.28		
4M-MB4	-----		3.08	
4M-MB5	-----		3.05	
4M-MB6	-----			3.44
4M-MB7	-----			3.42
4M-MB8	-----			3.44
4M-MB9	Carbono	-----	-----	-----
4M-MB10	Carbono	2.35		
4M-MB11	Carbono	2.46		
4M-MB12	Carbono		3.17	
4M-MB13	Carbono		3.16	

4M-MB14	Carbono			4.02
4M-MB15	Carbono			4.05
4M-MB16	Carbono			4.19
4M-MB17	Vidrio	-----	-----	-----
4M-MB18	Vidrio	1.99		
4M-MB19	Vidrio	2.04		
4M-MB20	Vidrio		2.96	
4M-MB21	Vidrio		2.95	
4M-MB22	Vidrio			4.38
4M-MB23	Vidrio			4.32
4M-MB24	Vidrio			4.27
4M-MB25	IP	-----	-----	-----
4M-MB26	IP	2.51		
4M-MB27	IP	2.11		
4M-MB28	IP		3.15	
4M-MB29	IP			3.63
4M-MB30	IP			3.63
4M-MB31	IP			3.62
4M-MB32	IP			3.59
4M-MB33	NTC	-----	-----	-----
4M-MB34	NTC	1.48		
4M-MB35	NTC	1.45		
4M-MB36	NTC		2.34	
4M-MB37	NTC		2.39	
4M-MB38	NTC			2.95
4M-MB39	NTC			2.85
4M-MB40	NTC			2.92

Nota: Histogramas de las profundidades de carbonatación de morteros de cementos andino tipo I con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, NTC, sometidos a exposición acelerada a 3%, 4% y 5% de CO₂.

Tabla 84

Promedio de profundidad de carbonatación

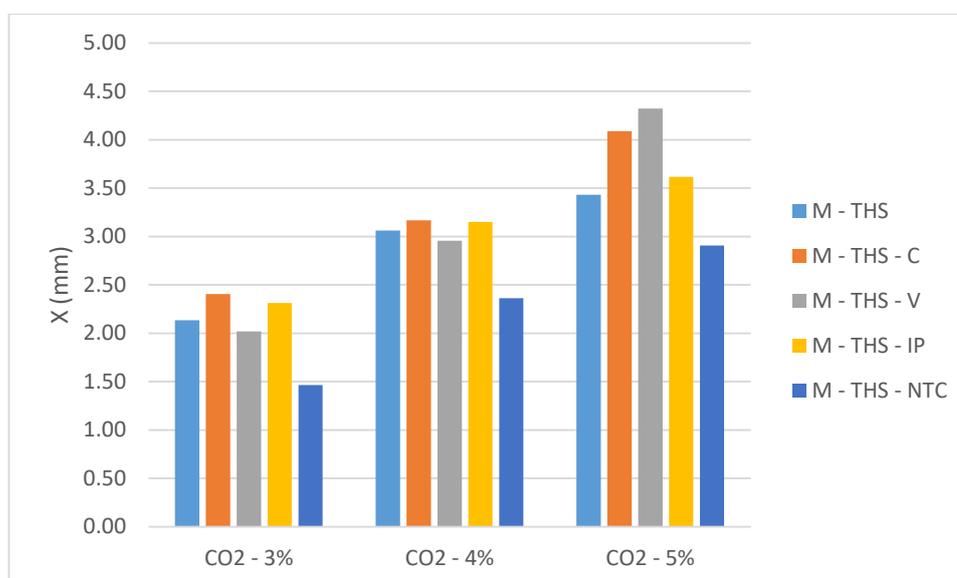
Muestra	Profundidad	Profundidad	Profundidad
	de Carbonatación 3%CO ₂ X* (mm)	de Carbonatación 4%CO ₂ X* (mm)	de Carbonatación 5%CO ₂ X* (mm)
M - T1	2.13	3.06	3.43
M - T1 - C	2.41	3.17	4.09
M - T1 - V	2.02	2.96	4.32
M - T1 - IP	2.31	3.15	3.62
M - T1 -	1.46	2.36	2.91
NTC			

Nota: Promedio de profundidad de carbonatación (mm) morteros. Cemento Andino Tipo HS Serie 4 en ambientes al 3%, 4%, y 5% de CO₂.

Tabla 85*Estadística descriptiva profundidad de carbonatación*

Profun. Carbo.	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.
CO ₂ 3%	5	0.95	1.46	2.41	2.0660	0.16603	0.37125	0.138	2.030	2.000	17.97%
CO ₂ 4%	5	0.81	2.36	3.17	2.9400	0.14970	0.33474	0.112	3.760	2.000	11.39%
CO ₂ 5%	5	1.41	2.91	4.32	3.6740	0.24865	0.55599	0.309	-0.827	2.000	15.13%

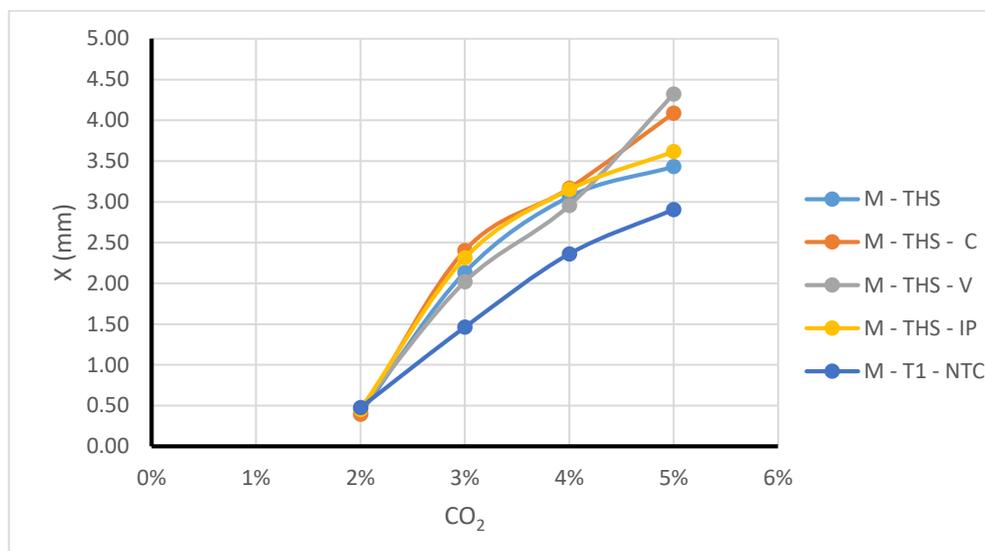
Nota: Estadística descriptiva profundidad de carbonatación (mm) morteros Cemento Andino Tipo HS Serie 4 en ambientes al 3%, 4%, y 5% de CO₂.

Figura 71*Histogramas de las profundidades de carbonatación*

Nota. Histogramas de las profundidades de carbonatación de morteros de cementos andino tipo HS, con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, NTC, sometidos a exposición acelerada de carbonatación a 3%, 4% y 5% de CO₂.

Figura 72

Profundidad de carbonatación expuestos a diferentes % de CO₂



En la figura 72 la muestra de morteros de cemento tipo HS presenta menores profundidades de carbonatación que los de cemento T1.

Figura 73

Muestras carbonatadas – Serie 4



Nota: Muestras carbonatadas – Serie 4. (1. Sin Adición; 2. Carbono; 3. Vidrio; 4. IP; 5. NTC).

Tabla 86

Variación de pH en proceso de carbonatación - Serie 4

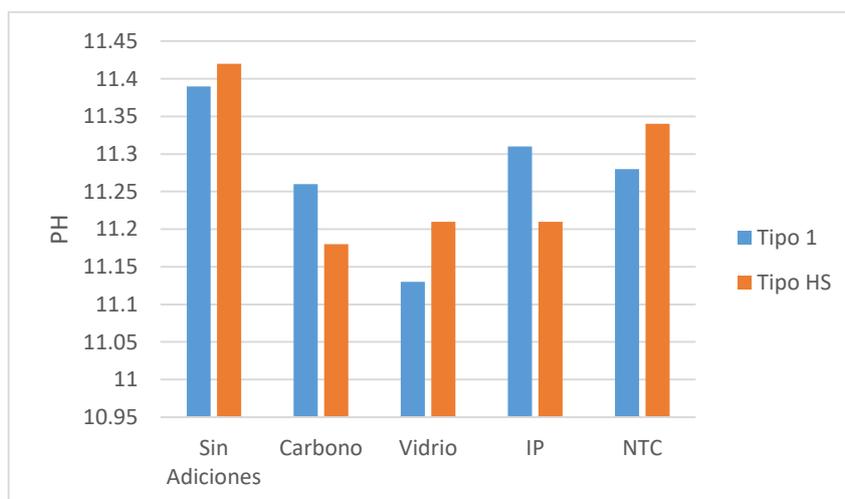
Muestra	pH
---------	----

M - T1 -	11.13
M - T1 - C	11.51
M - T1 - V	11.39
M - T1 - IP	11.42
M - T1 - NTC	11.28
M - THS -	11.20
M - THS - V	11.08
M - THS - C	11.21
M - THS - IP	11.21
M - THS - NTC	11.89

Nota: Variación de pH en proceso de carbonatación de Mortero de cemento T1 y THS. Serie 4.

Figura 74

Variación de pH en muestras carbonatadas



Nota: Variación de pH en muestras carbonatadas de Mortero - Cemento Andino Tipo I y Tipo HS – Serie 4

El Histograma de variación de pH de cemento Tipo I y Tipo HS con sus respectivas adiciones muestra que Tipo I tiene mayores valores de pH frente a cementos tipo HS.

Tabla 87

Estadística descriptiva de variación de pH en proceso de carbonatación

Muestra	pH
M - T1 -	11.13
M - T1 - C	11.51

M - T1 - V	11.39
M - T1 - IP	11.42
M - T1 - NTC	11.28
M - THS -	11.20
M - THS - V	11.08
M - THS - C	11.21
M - THS - IP	11.21
M - THS - NTC	11.89

Nota: Estadística descriptiva de variación de pH en proceso de carbonatación de Mortero de cemento T1 y THS - Serie 4.

4.1.1.15 *Ganancia de Masa de morteros. Serie 4*

La Tabla 88 muestra la ganancia de masa de morteros de carbonatación acelerada de cemento andino tipo I a 3%, 4%, y 5% de CO₂ serie 4.

Tabla 88

Ganancia de masa de morteros de carbonatación acelerada

Muestra	Adiciones	Masa sin carbonatar (g)	Masa (g) carbonatada 3% CO ₂	Masa (g) carbonatada 4% CO ₂ (g)	Masa (g) carbonatada 5%CO ₂	Incremento de masa (g)
4M-MA1	-----	22.94	23.27	-----	-----	0.33
4M-MA2	-----	22.98	23.13	-----	-----	0.15
4M-MA3	-----	23.04	23.34	23.49	-----	0.45
4M-MA4	-----	23.07	23.21	23.24	-----	0.17
4M-MA5	-----	23.33	23.51	23.56	-----	0.23
4M-MA6	-----	22.90	23.07	23.14	23.17	0.27
4M-MA7	-----	23.80	24.11	24.22	24.30	0.50
4M-MA8	-----	22.63	22.97	23.08	23.10	0.47
4M-MA9	Carbono	22.54	22.75	-----	-----	0.21
4M-MA10	Carbono	21.94	22.30	-----	-----	0.36
4M-MA11	Carbono	21.97	22.31	22.37	-----	0.40
4M-MA12	Carbono	22.79	22.94	22.99	-----	0.20
4M-MA13	Carbono	22.45	22.63	22.66	-----	0.21
4M-MA14	Carbono	22.86	23.16	23.29	23.31	0.45
4M-MA15	Carbono	23.04	23.39	23.43	23.47	0.43
4M-MA16	Carbono	23.11	23.33	23.37	23.41	0.30
4M-MA17	Vidrio	22.86	23.09	-----	-----	0.23
4M-MA18	Vidrio	22.96	23.34	-----	-----	0.38
4M-MA19	Vidrio	22.12	22.49	22.56	-----	0.44
4M-MA20	Vidrio	23.35	23.55	23.63	-----	0.28
4M-MA21	Vidrio	23.14	23.31	23.40	-----	0.26
4M-MA22	Vidrio	22.98	23.16	23.21	23.24	0.26
4M-MA23	Vidrio	22.06	22.42	22.51	22.55	0.49
4M-MA24	Vidrio	22.71	23.07	23.13	23.17	0.46
4M-MA25	IP	24.05	24.32	-----	-----	0.27

4M-MA26	IP	23.51	23.79	-----	-----	0.28
4M-MA27	IP	22.50	22.64	22.74	-----	0.24
4M-MA28	IP	23.30	23.61	23.74	-----	0.44
4M-MA29	IP	23.38	23.63	23.73	-----	0.35
4M-MA30	IP	24.11	24.27	24.36	24.39	0.28
4M-MA31	IP	22.71	23.03	23.13	23.18	0.47
4M-MA32	IP	22.99	23.38	23.52	23.66	0.67
4M-MA33	NTC	23.18	-----	-----	-----	
4M-MA34	NTC	21.69	21.89	-----	-----	0.20
4M-MA35	NTC	23.06	23.33	-----	-----	0.27
4M-MA36	NTC	23.02	23.21	23.22	-----	0.20
4M-MA37	NTC	22.53	22.71	22.72	-----	0.19
4M-MA38	NTC	22.17	22.52	22.51	22.53	0.36
4M-MA39	NTC	22.96	23.21	23.22	23.23	0.27
4M-MA40	NTC	22.57	22.98	22.97	22.98	0.41

Tabla 89

Promedio de incremento de masa (g) en morteros de Cemento

Muestra	Masa carbonatada	Masa carbonatada	Masa carbonatada
	3%CO ₂	4% CO ₂	5%CO ₂
	(g)	(g)	(g)
M - T1	0.24	0.28	0.41
M - T1 - C	0.29	0.27	0.39
M - T1 - V	0.31	0.33	0.40
M - T1 - IP	0.27	0.34	0.47
M - T1 - NTC	0.23	0.19	0.35

Nota: Promedio de incremento de masa (g) en morteros Cemento Andino Tipo I Serie 4 en ambientes al 3%, 4%, y 5% de CO₂.

Tabla 90

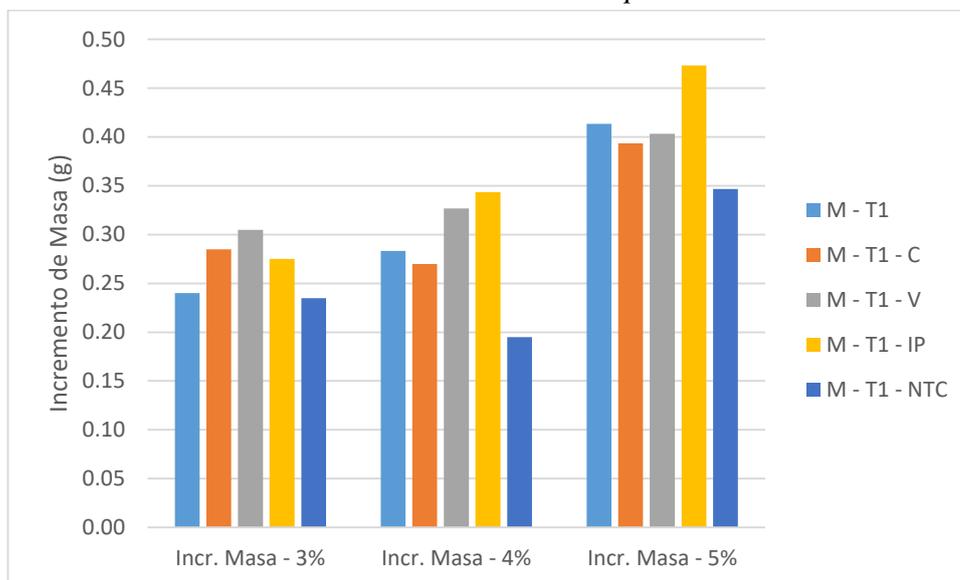
Estadística descriptiva de ganancia de masa en carbonatación

Increm. Masa	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
									Desv. Error	Desv. Error	
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	
CO ₂ 3%	5	0.08	0.23	0.31	0.2680	0.01497	0.03347	0.001	-1.975	2.000	12.49%
CO ₂ 4%	5	0.15	0.19	0.34	0.2820	0.02672	0.05975	0.004	0.659	2.000	21.19%
CO ₂ 5%	5	0.12	0.35	0.47	0.4040	0.01939	0.04336	0.002	1.732	2.000	10.73%

Nota: Estadística descriptiva de ganancia de masa de morteros de carbonatación acelerada de cemento andino tipo I a 3%, 4%, y 5% de CO₂ serie 4.

Figura 75

Incremento de masa de morteros de cements andino tipo I



Nota: Incremento de masa de morteros de cements andino tipo I con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, NTC, sometidos a exposición acelerada de carbonatación a 3%, 4% y 5% de CO₂.

El histograma de la de la figura 75 nos muestra el incremento de masa del cemento tipo I con sus respectivas adiciones observándose que el menor incremento de masa se da en la muestra con aditivo de TNC al 5% de ambiente de CO₂.

La Tabla 91 muestra la ganancia de masa de morteros en carbonatación acelerada de cemento andino tipo HS a 3%, 4%, y 5% de CO₂. Serie 4.

Tabla 91

Ganancia de masa de morteros en carbonatación, cemento Tipo HS

Muestra	Adiciones	Masa sin carbonatar (g)	Masa (g) carbonatada 3%CO ₂	Masa (g) carbonatada 4%CO ₂	Masa (g) carbonatada 5%CO ₂	Incremento de masa (g)
4M-MB1	-----	24.27	-----	-----	-----	
4M-MB2	-----	24.61	24.79	-----	-----	0.18
4M-MB3	-----	24.25	24.59	-----	-----	0.34
4M-MB4	-----	23.25	23.46	23.50	-----	0.25
4M-MB5	-----	23.86	24.12	24.14	-----	0.28
4M-MB6	-----	23.22	23.55	23.58	23.61	0.39
4M-MB7	-----	24.04	24.18	24.20	24.25	0.21
4M-MB8	-----	24.37	24.61	24.62	24.67	0.30
4M-MB9	Carbono	24.00	-----	-----	-----	
4M-MB10	Carbono	23.40	23.63	-----	-----	0.23
4M-MB11	Carbono	22.97	23.22	-----	-----	0.25
4M-MB12	Carbono	24.12	24.35	24.34	-----	0.22
4M-MB13	Carbono	23.64	23.84	23.87	-----	0.23
4M-MB14	Carbono	23.91	24.16	24.17	24.25	0.34
4M-MB15	Carbono	25.07	25.41	25.43	25.46	0.39
4M-MB16	Carbono	24.39	24.70	24.73	24.76	0.37
4M-MB17	Vidrio	23.78	-----	-----	-----	
4M-MB18	Vidrio	24.21	24.40	-----	-----	0.19
4M-MB19	Vidrio	23.43	23.70	-----	-----	0.27
4M-MB20	Vidrio	24.08	24.35	24.42	-----	0.34
4M-MB21	Vidrio	23.94	24.24	24.29	-----	0.35
4M-MB22	Vidrio	24.07	24.30	24.32	24.33	0.26
4M-MB23	Vidrio	24.01	24.25	24.26	24.28	0.27
4M-MB24	Vidrio	23.91	24.10	24.11	24.14	0.23
4M-MB25	IP	22.87	-----	-----	-----	
4M-MB26	IP	25.38	25.63	-----	-----	0.25
4M-MB27	IP	25.24	25.58	-----	-----	0.34
4M-MB28	IP	26.10	26.32	26.33	-----	0.23
4M-MB29	IP	23.98	24.25	24.28	24.35	0.37
4M-MB30	IP	23.35	23.68	23.73	23.79	0.44
4M-MB31	IP	23.86	24.04	24.06	24.14	0.28
4M-MB32	IP	23.91	24.12	24.14	24.15	0.24
4M-MB33	NTC	23.58	-----	-----	-----	
4M-MB34	NTC	22.55	22.78	-----	-----	0.23
4M-MB35	NTC	24.20	24.42	-----	-----	0.22
4M-MB36	NTC	22.26	22.48	22.48	-----	0.22
4M-MB37	NTC	23.84	24.02	24.03	-----	0.19
4M-MB38	NTC	24.75	24.93	24.94	24.98	0.23
4M-MB39	NTC	24.36	24.56	24.57	24.60	0.24
4M-MB40	NTC	23.33	23.50	23.45	23.49	0.16

Tabla 92*Promedio de ganancia de masa (g) de morteros Cemento THS*

Muestra	Masa carbonatada	Masa carbonatada	Masa carbonatada
	3%CO ₂ (g)	4%CO ₂ (g)	5% CO ₂ (g)
M - T1	0.31	0.27	0.30
M - T1 - C	0.24	0.23	0.37
M - T1 - V	0.23	0.35	0.25
M - T1 - IP	0.30	0.23	0.33
M - T1 - NTC	0.32	0.21	0.21

Nota: Promedio de ganancia de masa (g) de morteros Cemento Andino Tipo HS Serie 4 en ambientes al 3%, 4%, y 5% de CO₂.

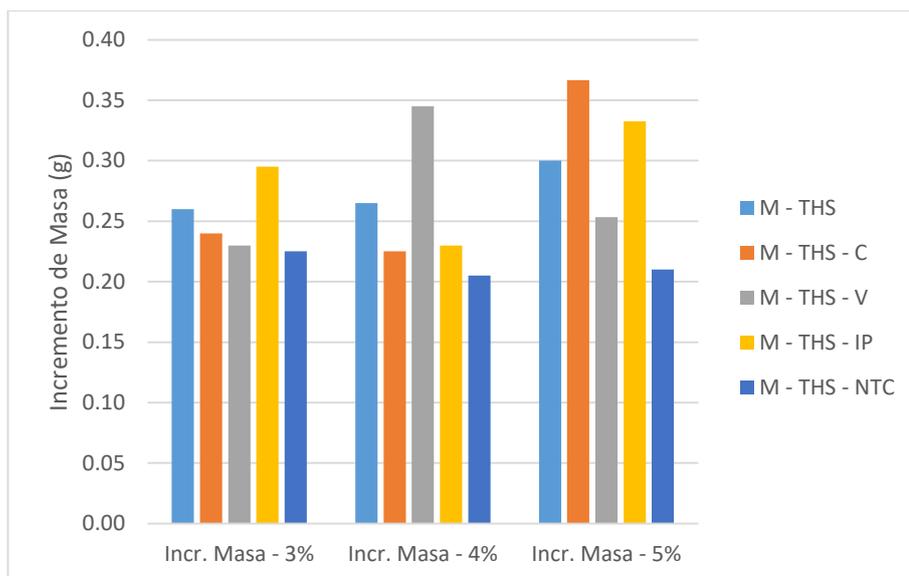
Tabla 93*Estadística descriptiva de ganancia de masa por carbonatación*

Incrém. Masa	N	Rango		Mínimo		Máximo		Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)
		Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.					
CO ₂ 3%	5	0.07	0.23	0.30	0.2520	0.01319	0.02950	0.001	1.581	2.000	11.70%	
CO ₂ 4%	5	0.14	0.21	0.35	0.2580	0.02498	0.05586	0.003	2.041	2.000	21.65%	
CO ₂ 5%	5	0.16	0.21	0.37	0.2920	0.02835	0.06340	0.004	1.237	2.000	21.71%	

Nota: Estadística descriptiva de ganancia de masa de morteros de carbonatación acelerada de cemento andino tipo HS a 3%, 4%, y 5% de CO₂ serie 4.

En la figura 74 se logra apreciar que la muestra con adición de NTC presenta el menor incremento de masa para cemento tipo HS a una concentración de 5% de CO₂.

Figura 76*Incremento de masa de morteros de cementos andino tipo HS*



Nota: Incremento de masa de morteros de cementos andino tipo HS con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, NTC, sometidos a exposición acelerada de carbonatación a 3%, 4% y 5% de CO₂.

4.1.1.16 Cálculos de CO₂ absorbido

Los cálculos de CO₂ absorbidos por morteros de cemento andino tipo I y tipo HS, Serie 4 se calcularon con la ecuación 28, cuyos resultados se muestran en la Tablas 94, 95, 96.

Tabla 94

Ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas de cemento andino tipo I

Muestra	Concentración de CO ₂ (%)	Profundidad de Carbonatación (mm)	kc mm/año ^{1/2}	ka mm/año ^{1/2}	% CO ₂ Abs
M - T1	3%	1.70	18.12	1.14	0.0040
	4%	2.84	21.91	1.38	0.0068
	5%	4.04	25.63	1.61	0.0097

M - T1 - C	3%	1.83	19.75	1.24	0.0043
	4%	4.59	35.67	2.25	0.0111
	5%	5.20	33.02	2.08	0.0125
M - T1 - V	3%	2.37	25.60	1.61	0.0056
	4%	3.57	27.64	1.74	0.0086
	5%	4.49	28.44	1.79	0.0108
M - T1 - IP	3%	2.05	22.14	1.40	0.0049
	4%	3.31	25.60	1.61	0.0079
	5%	4.35	27.49	1.73	0.0104
M - T1 - NTC	3%	1.59	16.65	1.05	0.0036
	4%	2.33	17.71	1.12	0.0055
	5%	2.95	18.60	1.17	0.0071

Nota: Ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas de morteros de cemento andino tipo I; sometidos a ambientes de 3%, 4%, y 5% de CO₂. Serie 4.

*Ka coeficiente de carbonatación atmosférica

Tabla 95

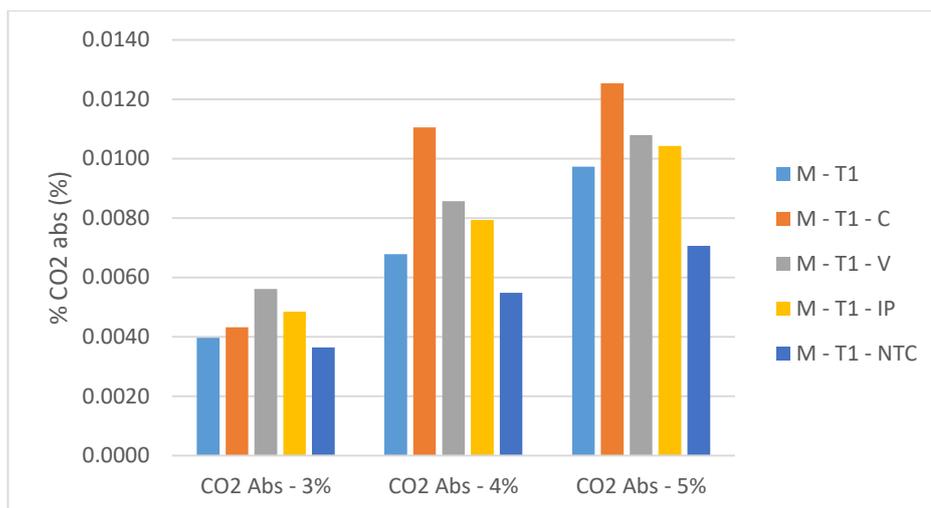
Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas

% CO ₂ Abs	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
									Desv. Error	Estad.	
	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Estad.	Desv. Error	Estad.	
3%	5	0.00	0.00	0.01	0.0045	0.00035	0.00079	0.000	-0.584	2.000	17.53%
4%	5	0.01	0.01	0.01	0.0080	0.00094	0.00210	0.000	0.628	2.000	26.34%
5%	5	0.01	0.01	0.01	0.0101	0.00088	0.00197	0.000	1.528	2.000	19.49%

Nota: Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas de morteros de cemento andino tipo I; sometidos a ambientes de 3%, 4%, y 5% de CO₂. Serie 4.

Figura 77

Absorción de CO₂ (%) de morteros de cementos andino tipo I



Nota: Absorción de CO₂ (%) de morteros de cements andino tipo I con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, NTC, sometidos a exposición acelerada de carbonatación a 3%, 4% y 5% de CO₂.

En la figura 77 se logra apreciar que dentro de las muestras con cemento Tipo I la muestra con adición de NTC presenta un menor porcentaje absorción de CO₂ y un mayor porcentaje de absorción en las muestras con adición carbono expuestas a una concentración de 5% de CO₂.

Tabla 96

Ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas

Muestra	Concentración de CO ₂	Profundidad de Carbonatación	kc mm/año ^{1/2}	ka mm/año ^{1/2}	% CO ₂ Abs
M - THS	3%	2.13	23.01	1.45	0.0050
	4%	3.06	23.68	1.49	0.0073
	5%	3.43	21.74	1.37	0.0082
M - THS - C	3%	2.41	26.19	1.65	0.0057
	4%	3.17	24.55	1.55	0.0076
	5%	4.09	25.88	1.63	0.0098
M - THS - V	3%	2.02	21.60	1.36	0.0047
	4%	2.96	22.81	1.44	0.0071
	5%	4.32	27.35	1.72	0.0104
M - THS - IP	3%	2.31	25.15	1.58	0.0055
	4%	3.15	24.35	1.53	0.0075
	5%	3.62	22.77	1.43	0.0086
M - THS - NTC	3%	1.46	15.13	0.95	0.0033
	4%	2.36	17.95	1.13	0.0056
	5%	2.91	18.34	1.16	0.0070

Ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas de morteros de cemento andino tipo HS; sometidos a ambientes de 3%, 4%, y 5% de CO₂. Serie 4.

Tabla 97

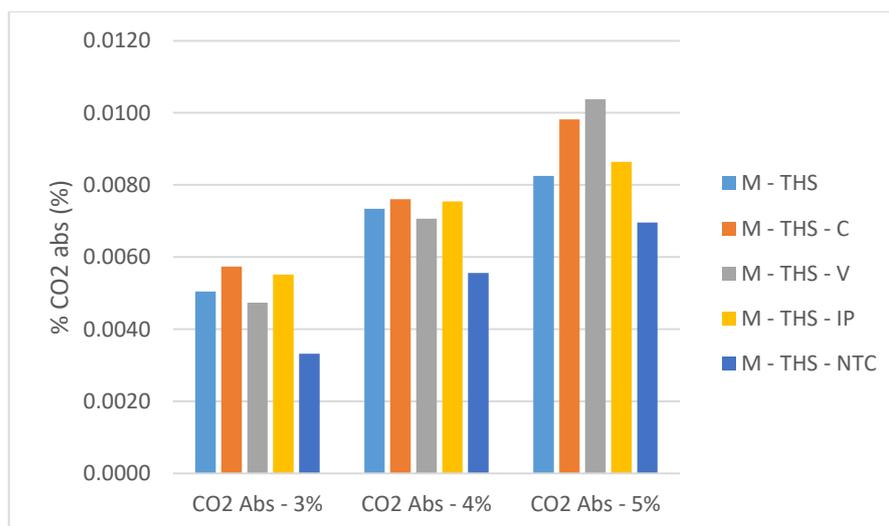
Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas

CO ₂ Abs	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Varianza	Curtosis	coeficiente de variación (CV)		
									Estad.	Estad.	
3%	5	0.00	0.00	0.01	0.0048	0.00042	0.00095	0.000	1.862	2.000	19.58%
4%	5	0.00	0.01	0.01	0.0070	0.00037	0.00082	0.000	3.908	2.000	11.63%
5%	5	0.00	0.01	0.01	0.0088	0.00060	0.00134	0.000	- 0.985	2.000	15.25%

Nota: Estadística descriptiva de ganancia de CO₂ en muestras carbonatadas de morteros de cemento andino tipo HS; sometidos a ambientes de 3%, 4%, y 5% de CO₂. Serie 4.

Figura 78

Absorción de CO₂ de morteros de cemento andino tipo HS



Nota: Absorción de CO₂ (%) de morteros de cements andino tipo HS con adición de carbono, vidrio, impermeabilizante, NTC, sometidos a exposición acelerada de carbonatación a 3%, 4% y 5% de CO₂.

En la figura 78 se aprecia que las muestra con adición de NTC de cemento tipo HS el cual presenta la menor absorción de porcentaje de CO₂ en comparación a la muestra con adición de vidrio que presenta mayor porcentaje de absorción, en muestras expuestas a una concentración de 5% de CO₂.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADO

La discusión de los resultados de la presente investigación se ha ordenado en función de los resultados obtenidos en las cuatro series de muestras elaboradas de cementos tipo I y tipo HS, de acuerdo con su geometría y las relaciones con las variables estudiadas.

5.1 Profundidad de carbonatación acelerada y cambio de pH.

En este apartado se discuten los resultados obtenidos referente a la profundidad de carbonatación y cambio de pH, determinación de la velocidad de carbonatación k_c y k_a , que están relacionadas con la profundidad de carbonatación, en morteros y concretos, de cada serie.

El modelo basado en la ecuación de Fick , $x = k \sqrt{t}$ describe adecuadamente en la mayoría de los casos la predicción del avance de carbonatación y cambio de pH, si se dispone de datos experimentales.

5.1.1 Profundidad de carbonatación y coeficiente de carbonatación

La medición del grado de carbonatación acelerada en los cementos tipo I y tipo H S para las diferentes muestras de morteros y concretos para todas las series (1,2,3 y 4) se han utilizado el indicador de la fenolftaleína, y luego medido la profundidad con un vernier digital, como muestran los siguientes resultados:

En la serie 1 la tabla 15 evidencia los parámetros estadísticos que la mínima profundidad de 1,52 mm corresponde al concreto 1 con adición de NTC y el máximo de 5.55 mm corresponde al concreto 1 con adición de carbono, con probetas de cemento tipo I. Similar resultado se obtiene para probetas de cemento Tipo HS (tabla 17), la mínima profundidad 2,65 mm se obtiene para la muestra de concreto 1 con adición de NTC y la máxima profundidad de 4,58 mm con adición de carbono; estos resultados se obtienen debido a que probetas con mayor relación a/c presentan mayor porosidad y por consiguiente mayor profundidad de carbonatación como en concreto 1 relación a/c =0,60. El coeficiente de variación es de 35,87

% este estadístico nos muestra que los datos leídos corresponde a un nivel de variabilidad media que corresponden a muestras con diferentes aditivos.

En la serie 2 y 3 las muestras tienen una geometría de 5x5x5 cm y sometidas al 10% de CO₂, las figuras 21 y 22 muestran para el cemento tipo I como para cementos tipo HS la máxima profundidad tiene las muestras con adición de vidrio (17,88cm y 19,24cm) y la mínima profundidad las muestras con adición de NTC (12,85 mm y 14,19 mm), esto se debe a que el vidrio aporta sílice (SiO₂) a la composición del cemento y en la hidratación e hidrólisis del concreto este reacciona con las fases hidratadas produciendo mayor cantidad de calcita. Según la estadística descriptiva el coeficiente de variación promedio es de 15,82 % para cementos TI y de 14,44% para T HS los datos leídos corresponden a un nivel de moderada variabilidad para muestras con diferentes aditivos.

En la serie 4 las muestras tienen una geometría cilíndrica de 1 x 5 cm, sometidas a 3,4,5 % de CO₂, para un mismo periodo de tiempo. Las profundidades de carbonatación tienen las mismas tendencias que las series 2 y 3, siendo el coeficiente de variación de un nivel de moderada variabilidad, datos regularmente heterogéneos.

5.1.2 Coeficiente de carbonatación

El Coeficiente de carbonatación k_c se calculó con la ecuación (25) usando los datos de la tabla 12 y 14, tomando en cuenta a x_0 como la carbonatación inicial y con un valor de cero.

$$k_c = \sqrt{(x^2 - x_0^2)/t} \quad (25)$$

Para la conversión de los coeficientes de carbonatación acelerada en cámaras de 10% de exposición de CO₂ a coeficientes de carbonatación atmosférica (k_a) se usó la ecuación (26) (Moreno, 1999).

$$\frac{k_1}{k_2} = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (26)$$

Se conoce que la concentración atmosférica del CO₂ es en promedio 0.035 %, sin embargo, en el ambiente del laboratorio donde se ha acondicionado las muestras de control se

tomó un promedio siendo esta de 0.040% la concentración atmosférica. Los resultados de conversión se muestran en la tabla 20.

Una vez determinadas las profundidades de carbonatación de las muestras de las series 1,2,3,4 se calcularon los coeficientes de carbonatación k_c y su conversión a k_a ; en ambiente acelerado de 5 a 10% de CO_2 , para especímenes de cementos tipo I mayor K_c (33,43 mm/año^{1/2}) para concreto 1 aditivo de carbono y menor coeficiente de carbonatación para la muestra con aditivo NTC (8,87 mm/ año^{1/2}) esto se debe a que el concreto tiene una relación a/c de 0,60 aumentando la cantidad de agua en el mortero generando un aumento en la porosidad del concreto. Se puede indicar para todas las series estudiadas se comprueba que a mayores profundidades le corresponde mayores velocidades de carbonatación. Igualmente se puede atribuir que cuando las HR son altas la velocidad de carbonatación aumenta como ocurrió en la cámara de carbonatación donde la HR vario entre 85-90%.

Haciendo u análisis para las series 2,3,4, se observó que muestras con adiciones de carbono en los diferentes morteros de los dos tipos de cemento presentan un mayor coeficiente de carbonatación, mientras las muestras con NTC presentan menores coeficientes de carbonatación como se indican en las respectivas tablas.

Analizando las estadísticas descriptivas para tablas anteriormente indicadas se tiene el orden de menor a mayor velocidad de carbonatación de las muestras con adiciones minerales tanto para el cemento tipo I y tipo HS y estas son: NTC, Impermeabilizante P, vidrio, carbono; por lo que mejor desempeño presento el NTC como aditivo en las diferentes muestras carbonatadas.

5.1.3 Profundidad de carbonatación y cambios de pH

Las muestras de los morteros y concreto de los cementos tipo I y tipo HS con sus respectivos aditivos se realizaron las pruebas de pH antes y después de la exposición a la carbonatación acelerada medidos en un equipo PC-700 – OAKLN de pH; usando el método de

la Norma Técnica Peruana 339.073, cuyos resultados se muestran en las tablas (16, 17, 33, 53 y 83) para las series 1,2,3,4.

Las muestras de control mostraron valores de pH comprendidos entre 12,90 y 13,4 que corresponde al pH de la solución de hidróxido de calcio saturado.

En la serie 1 para muestras de cemento tipo I y tipo HS según datos estadísticos el pH mínimo es de 11,80 y 11,63; el máximo 12,16 y 12,84 con un coeficiente de variación < 5%, presentando un nivel de variabilidad baja con datos muy homogéneos

En la serie 2,3,4 las variaciones de pH están entre 10,80 y 11,89 después del proceso de carbonatación de las muestras de morteros, estos valores comparados con las muestras de control han disminuido entre 16,28% y 9,51%. Según la bibliografía debería estar por debajo de pH=9; probablemente se deba a la preparación de la muestra carbonatadas al ser raspadas se mezclaron con material de zonas no carbonatadas.

5.1.4 Cálculo de CO₂ absorbido

En la actualidad hay muchos modelos empíricos para calcular el CO₂ absorbido, para esta investigación se ha optado por una ecuación (28) que involucra variables como la velocidad de carbonatación en función al tiempo, dosificación del concreto, cantidad máxima de CO₂ absorbido, grado de carbonatación y la cantidad de CaO reactivo que contiene el Clinker. (Anejo BB Norma Europea EN 16757) Cuyos resultados se encuentran en las tablas de muestras de las series 1,2,3 y 4.

$$\text{CO}_2 \text{ (absorbido)} = (k\text{CO}_2 \sqrt{t}/1000) \times \text{CO}_2 \text{ max} \times C \times \text{GC} \quad (28)$$

$$\text{CO}_2 \text{ max} = (\text{CaO reactivo} / 100) \times \text{Conglomerante} \times (\text{MCO}_2/\text{M CaO}) \quad (29)$$

C = masa de cemento por m³ de concreto (kg/m³)

GC = grado de carbonatación

La aplicación de estas ecuaciones se realizó para cada una de las muestras de morteros y concreto de cementos tipo I y tipo HS con sus respectivas adiciones de las series 1,2,3,4.

Uno de los factores más resaltantes en los cálculos fue el tiempo de exposición, tanto la profundidad como la cantidad de CO₂ absorbida varía con el tiempo; el contenido de cemento y el grado de carbonatación se consideran fijas en cada muestra.

Cabe mencionar que los cálculos de profundidad, absorción de CO₂, están basadas en medidas experimentales realizadas especialmente para esta investigación.

Con los datos obtenidos en las tablas (48 y 50; 67 y 69; 94 y 96) se realizaron un modelo de ajuste estadístico de distribución normal.

5.1.4.1 Modelo de Ajuste para la absorción de CO₂. Para estudiar una población a través de métodos estadísticos, el interés se centra generalmente en una sola característica de la muestra que puede ser una variable continua o discreta.

La distribución normal es un modelo teórico desarrollado por el matemático Abraham de Moivre (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).

Con los datos obtenidos de % de absorción de CO₂ en las tablas (48 y 50; 67 y 69; 94 y 96) se realizaron las pruebas de ajuste a una distribución normal para las diferentes muestras de las series estudiadas usando el paquete estadístico Minitab versión 19.2

Para aceptar las fórmulas de regresión lineal se verificaron los criterios de aceptación: Normalidad, Aleatoriedad y Homocedasticidad, los mismos que se cumplieron.

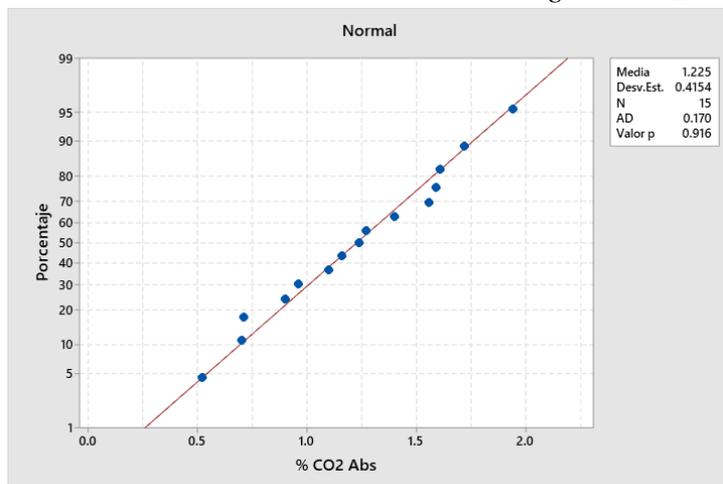
El análisis de regresión es importante porque constituye un modelo para la predicción de datos, su nivel de predicción se mide con el coeficiente R. A continuación, se muestran los

pasos a seguir para establecer su aceptabilidad usando la prueba de normalidad de Anderson-Darling.

Serie 1. Prueba de ajuste a una distribución normal: absorción CO₂ cemento tipo I

Figura 79

Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂



Nota: Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido de morteros, concreto 1 y 2 de serie 1 cemento tipo I. Paquete estadístico Minitab versión 19.2

El p-valor es mayor que 0.05, por tanto, los datos son normales, en el análisis se correlacionan el porcentaje de absorción y la profundidad de carbonatación.

Ecuación de regresión.

$$C = 0.051 + 0.33589 X$$

Donde:

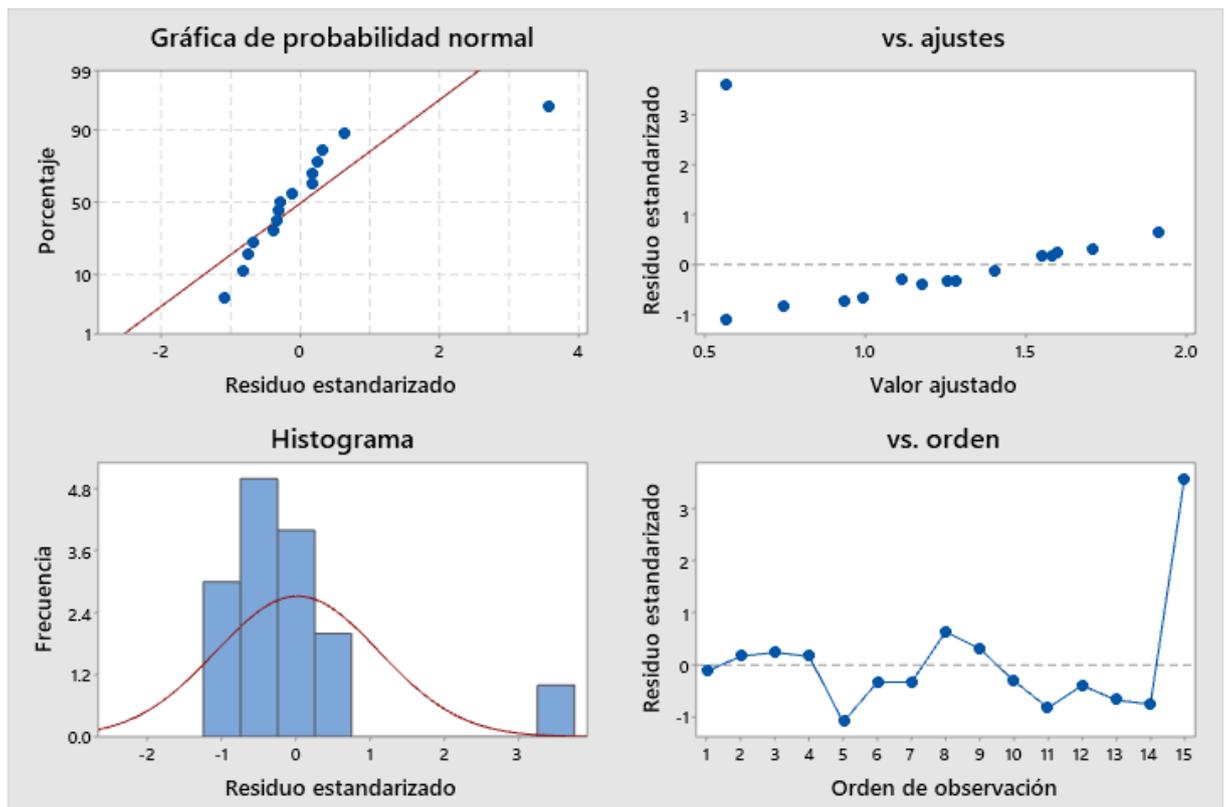
C: %CO₂ Abs.

X: profundidad de carbonatación.

Tabla 98*Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.044	98.94%	98.86%	98.20%

Nota: Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 1 cemento tipo I

Figura 80*Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 1*

Nota: Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 1 de morteros, concreto 1 y 2 cemento tipo I. Paquete estadístico Minitab versión 19.2

En la figura 80 (grafica 4 en 1) se observa: 1) La probabilidad normal.2)

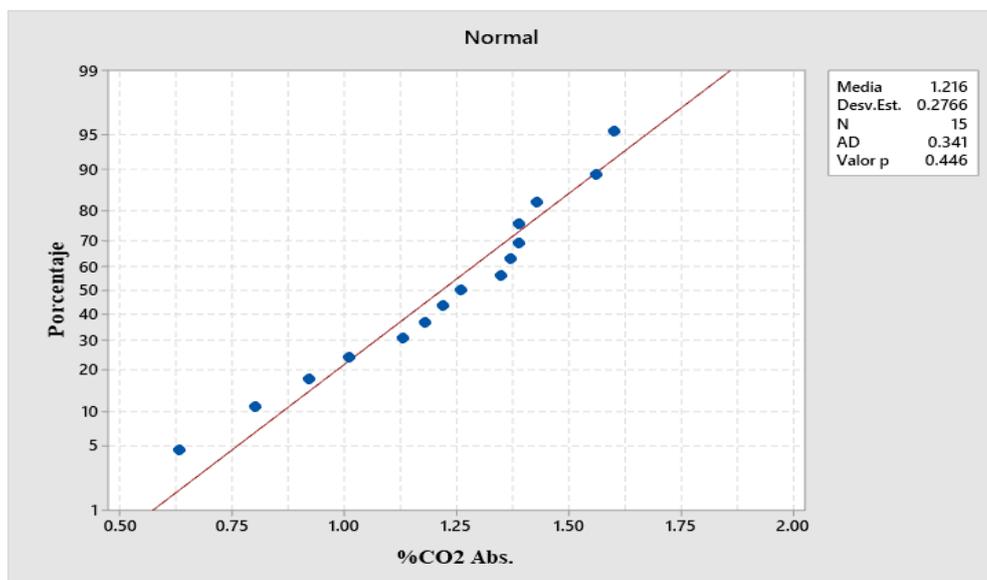
homocedasticidad de la varianza de los datos 3) Histograma de residuales, 4) Residuos de contra orden.

Serie 1. Prueba de ajuste a una distribución normal: absorción de CO₂ cemento tipo

HS

Figura 81

Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido



Nota: Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido de morteros, concreto 1 y 2 de serie 1 cemento tipo HS. Paquete estadístico Minitab versión 19.2

El p-valor es mayor que 0.05, por lo que los datos son normales, en el análisis se correlacionan el porcentaje de absorción y la profundidad de carbonatación. No se colocó la variable del tiempo debido a que solo es un periodo de 10 días

Ecuación de regresión

$$C = -0.410 + 0.4393 X$$

Donde:

C: %CO₂ Abs.

X: profundidad de carbonatación.

Tabla 99

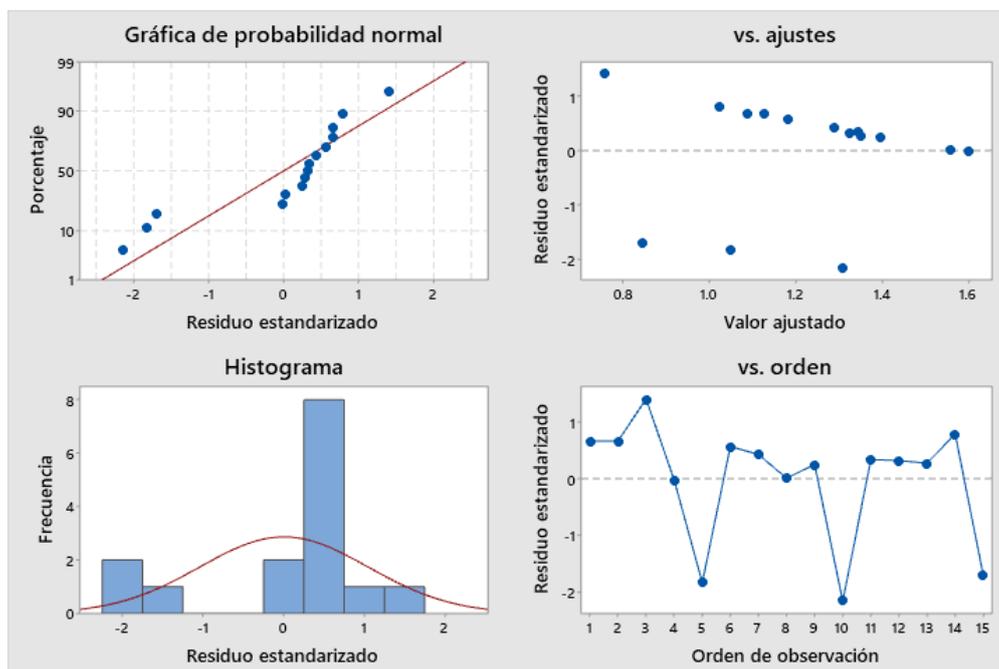
Modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 1

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.144	74.95%	73.02%	65.00%

Nota: Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 1 cemento tipo HS

Figura 82

Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 1



Nota: Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 1 de morteros, concreto 1 y 2 cemento tipo HS. Paquete estadístico Minitab versión 19.2

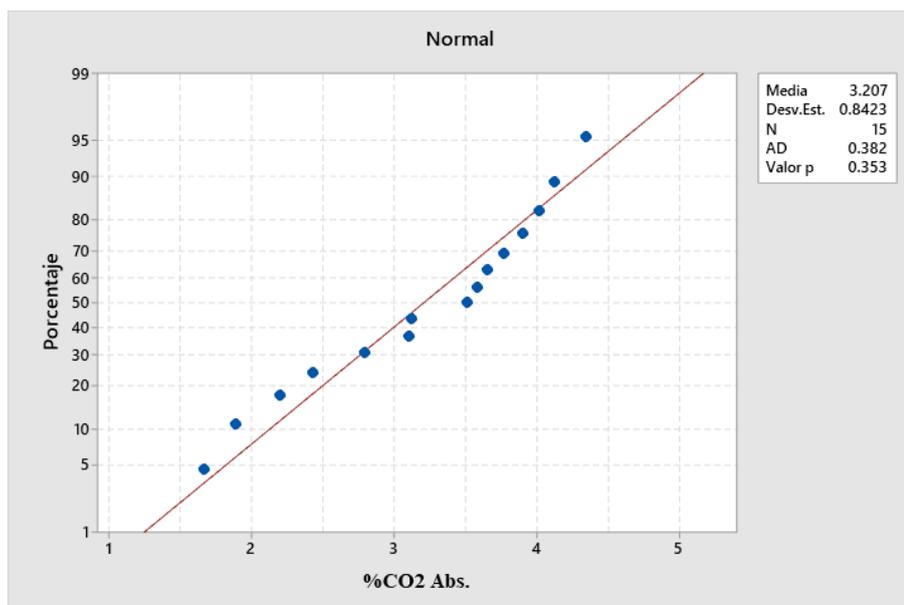
En la figura 82 se observa la aleatoriedad de los datos en la cuarta gráfica y la homocedasticidad en la segunda gráfica.

En general se observa buena correlación de los resultados (98.86% y 73.02%) del R-cuadrado ajustado lo que indica que la profundidad de carbonatación es la variable que mejor explica el porcentaje de carbonatación de las muestras de cemento, es decir a mayor profundidad de carbonatación, mayor porcentaje de absorción de CO₂ y es suficiente establecer una relación lineal entre ambas variables debido a los valores de Rcuadrado-ajustado (coeficiente de correlación).

Serie 2. Prueba de ajuste a una distribución normal de absorción de CO₂ cemento tipo I

Figura 83

Prueba de normalidad Anderson – Darling al CO₂ absorbido



Nota: Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido de morteros de serie 2 cemento tipo I. Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

El p-valor es mayor que 0.05, por lo tanto, los datos son normales, en el análisis se correlacionan el porcentaje de absorción, la profundidad de carbonatación y el tiempo de carbonatación. Se analizó con dos variables (tiempo y profundidad de carbonatación) para el ANOVA.

Ecuación de regresión

$$C = -1.3648 + 0.11161 T + 0.04506X$$

Donde:

C: %CO₂ Abs.

X: profundidad de carbonatación.

T: tiempo de carbonatación.

Tabla 100

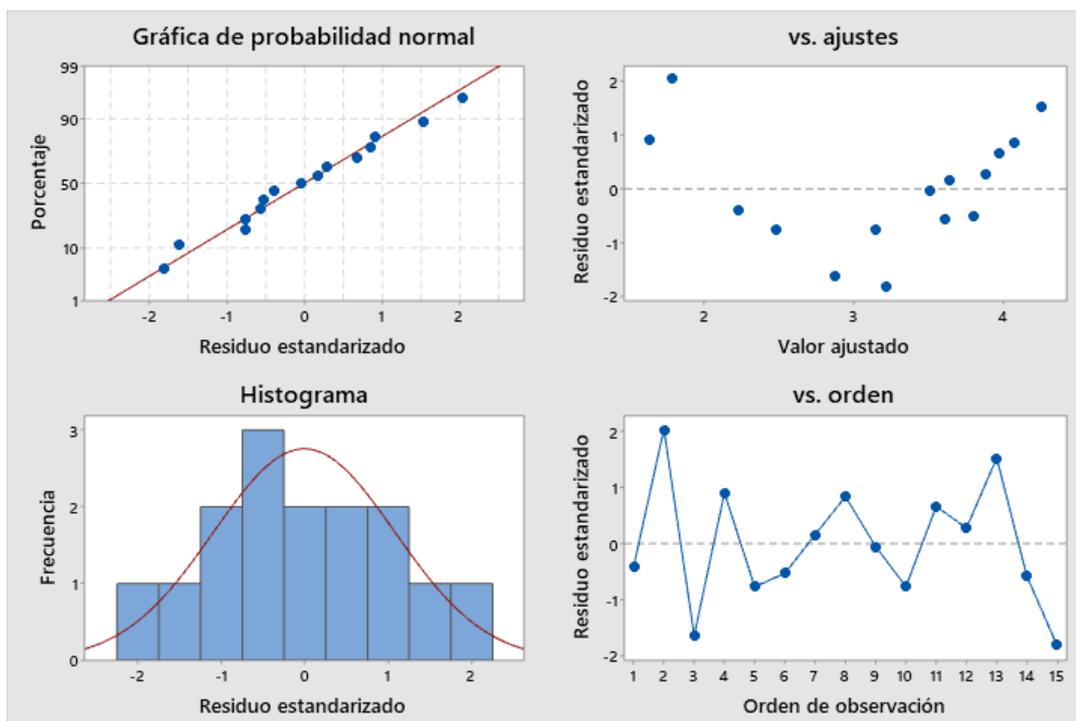
Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.063	99.52%	99.44%	99.08%

Nota: Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 2 cemento tipo I

Figura 84

Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 2



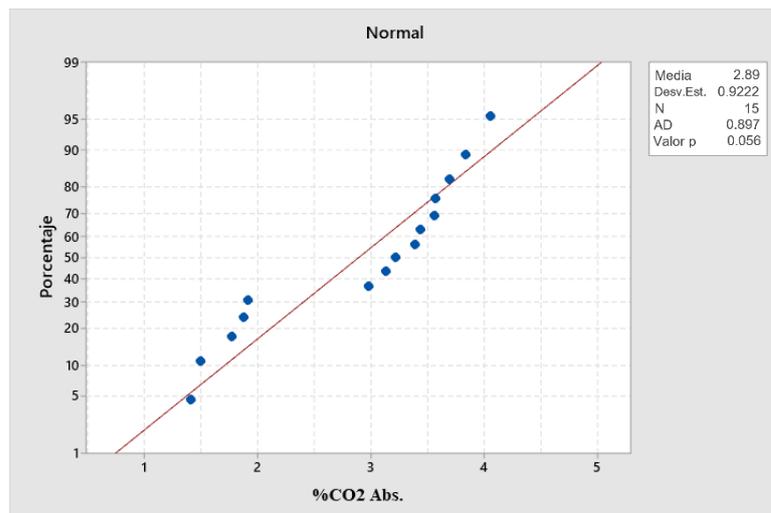
Nota: Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 2 de morteros cemento tipo I. Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

En la figura 84 se observa la aleatoriedad de los datos en la cuarta gráfica y la homocedasticidad en la segunda gráfica.

Serie 2. Prueba de ajuste a una distribución normal de absorción de CO₂ cemento tipo HS

Figura 85

Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido



Nota: Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido de morteros de serie 2 cemento tipo HS. Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

El p-valor es mayor que 0.05, por lo tanto, los datos son normales, en el análisis se correlacionan el porcentaje de absorción, la profundidad de carbonatación y el tiempo de carbonatación.

Se analizó con dos variables (tiempo y profundidad de carbonatación) se puede incluir una tercera variable, pero los valores se vuelven $p > 0.05$ en el ANOVA.

Ecuación de regresión

$$C = -1.108 + 0.1920 T + 0.02007 X$$

Donde:

C: %CO₂ Abs.

X: profundidad de carbonatación.

T: tiempo de carbonatación.

Tabla 101

Modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 2 cemento

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
---	---------	-----------------------	-------------------

0.228

94.75%

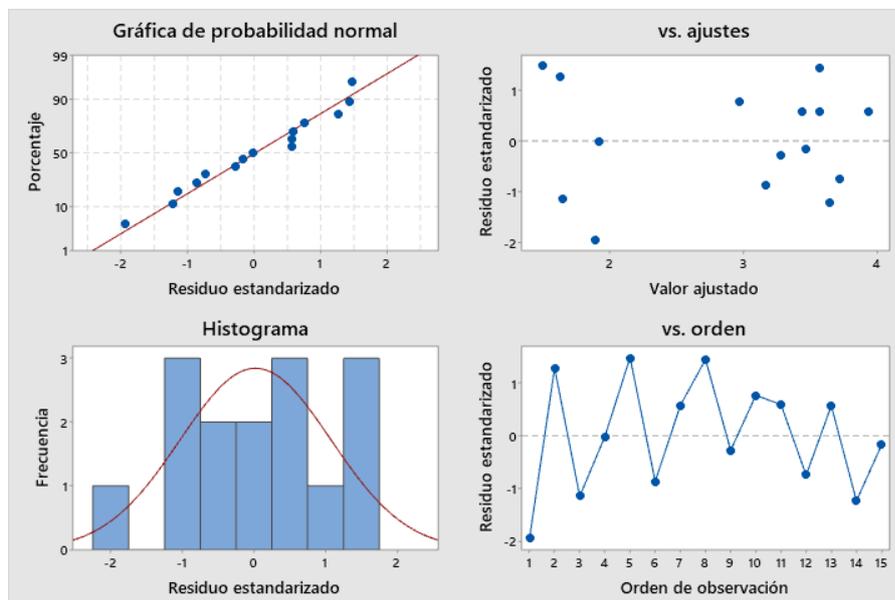
93.88%

91.13%

Nota: Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 2 cemento tipo HS

Figura 86

Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 2



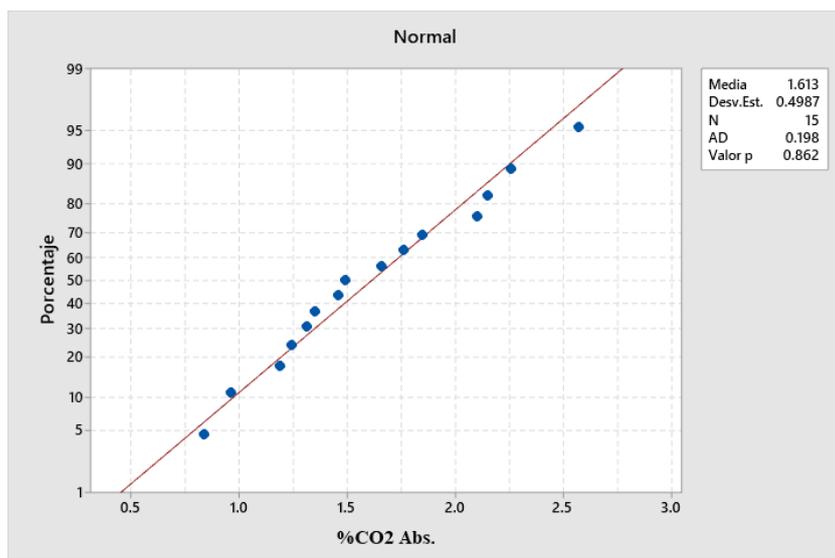
Nota: Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 2 de morteros cemento tipo HS Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

En la figura 86, se observó la homocedasticidad en la segunda gráfica y de los residuos de contraorden de los datos en la cuarta gráfica.

Serie 3. Prueba de ajuste a una distribución normal cemento tipo I para Abs %CO₂.

Figura 87

Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido



Nota: Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido de morteros de serie 3 cemento tipo I. Nota: Paquete estadístico Minitab versión 19.2

El p-valor es mayor que 0.05, los datos son normales, en el análisis se correlacionan el porcentaje de absorción, la profundidad de carbonatación y el tiempo de carbonatación.

Se analizó con dos variables (tiempo y profundidad de carbonatación) se puede incluir una tercera variable, pero los valores se vuelven $p > 0.05$ en el ANOVA. Entonces tiene una distribución normal.

Ecuación de regresión

$$C = 0.4267 - 0.0254 T + 0.2105 X$$

Donde:

C: %CO₂ Abs.

X: profundidad de carbonatación.

T: tiempo de carbonatación.

Tabla 102

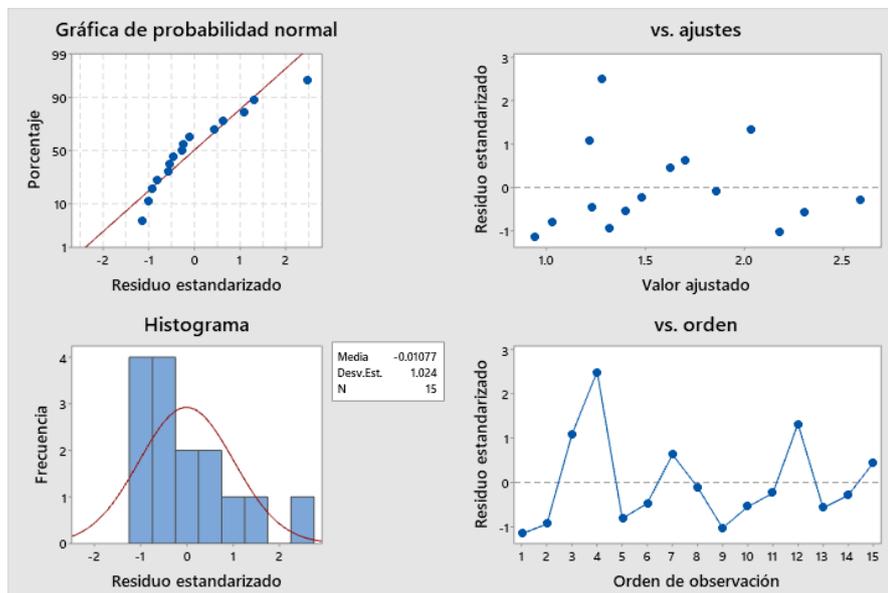
Modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 3 cemento

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.093	97.02%	96.52%	95.53%

Nota: Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 3 cemento tipo I

Figura 88

Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 3



Nota: Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 3 de morteros cemento tipo I. Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

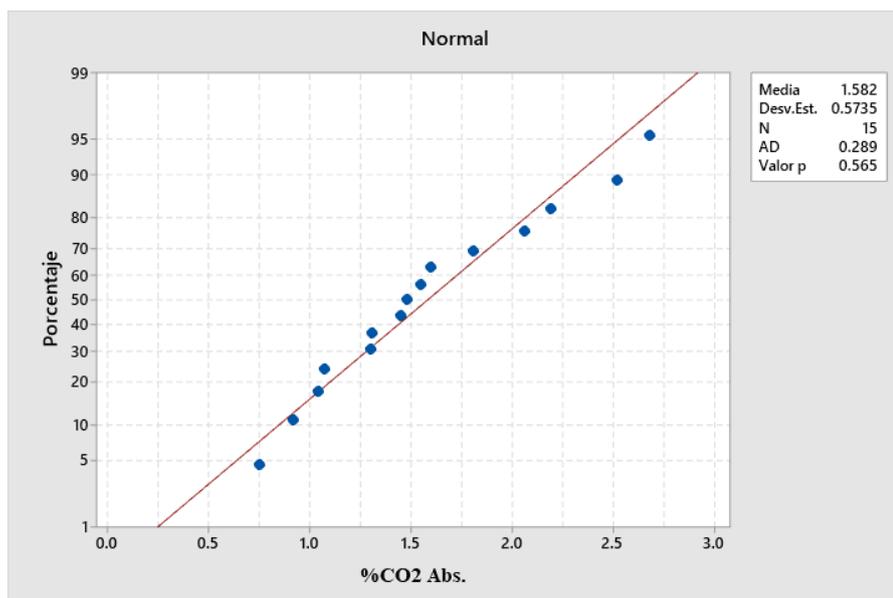
En la figura 88 se observa la aleatoriedad de los datos en la cuarta gráfica y la homocedasticidad en la segunda gráfica, en el ANOVA

En general se observa muy buena correlación de los resultados (93.88% y 96.52%) del R-ajustado lo que indica que la profundidad de carbonatación y el tiempo de carbonatación son las variables que explican el porcentaje de carbonatación de las muestras de cemento, es decir a mayor profundidad de carbonatación, mayor porcentaje de absorción de CO₂ y es suficiente establecer una relación lineal entre las tres variables debido a los altos valores de Rcuadrado-ajustado (coeficiente de correlación)

Serie 3. Prueba de ajuste a una distribución normal cemento tipo HS para Abs %CO₂.

Figura 89

Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂



Nota: Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido de morteros de serie 3 cemento tipo HS. Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

El p-valor es mayor que 0.05, los datos son normales, en el análisis se correlacionan el porcentaje de absorción, la profundidad de carbonatación y el tiempo de carbonatación.

Se analizó con dos variables (tiempo y profundidad de carbonatación) se puede incluir una tercera variable, pero los valores se vuelven $p > 0.05$ en el ANOVA.

Ecuación de regresión

$$C = 0.548 - 0.0322 T + 0.2001 X$$

Donde:

C: %CO₂ Abs.

X: profundidad de carbonatación.

T: tiempo de carbonatación.

Tabla 103

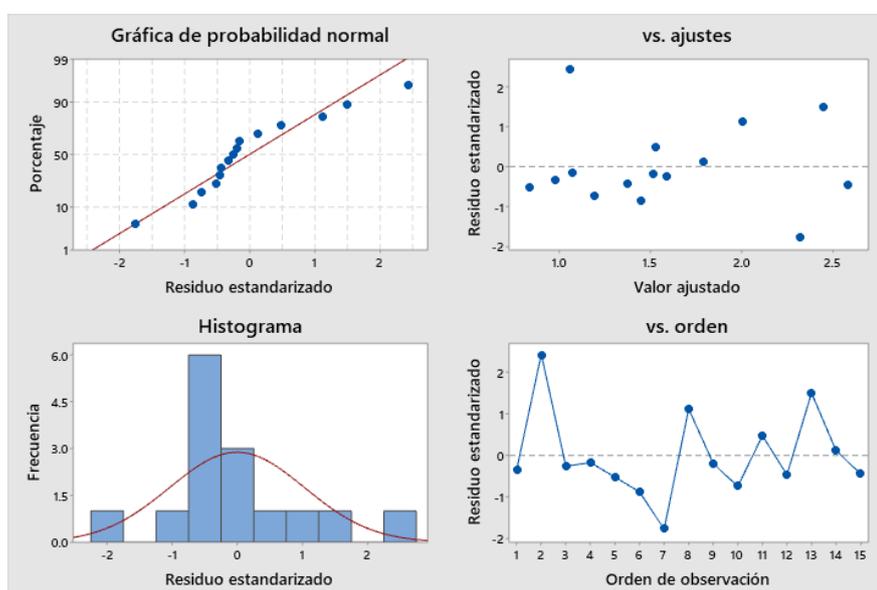
Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.176	91.91%	90.57%	87.15%

Nota: Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 3 cemento tipo HS.

Figura 90

Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 3



Fuente: Grafica de Residuales: Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 3 de morteros cemento tipo HS. Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

En la figura 90 se observa la aleatoriedad de los datos en la cuarta gráfica y la homocedasticidad en la segunda gráfica.

Se puede verificar en estas gráficas que se cumplen los criterios de aceptabilidad, lo que justifica un análisis de regresión lineal.

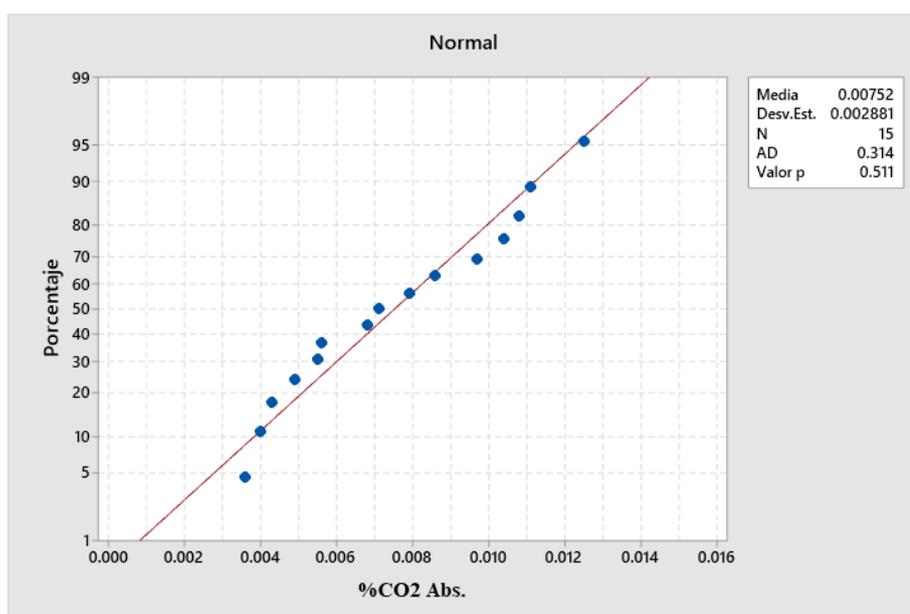
En general se observan correlaciones: aceptable (67.28%) , buena (75.59%) y muy buena (90.57%) de los resultados de R cuadrado-ajustado, lo que indica que la profundidad de

carbonatación y el tiempo de carbonatación son variables que explican el porcentaje de carbonatación de las muestras de cemento, es decir a mayor profundidad de carbonatación, mayor porcentaje de absorción de CO₂ y es suficiente establecer una relación lineal entre las tres variables debido a los valores de R cuadrado-ajustado (coeficiente de correlación) obtenidos.

Serie 4. Prueba de ajuste a una distribución normal cemento tipo I para Abs %CO₂.

Figura 91

Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido



Nota: Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido de morteros de serie 4 cemento tipo I. Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

El p-valor es mayor que 0.05, por consiguiente, los datos son normales, en el análisis se correlacionan el porcentaje de absorción, la profundidad de carbonatación y el tiempo de carbonatación.

Se analizó con dos variables (tiempo y profundidad de carbonatación) se puede incluir una tercera variable, pero los valores se vuelven $p > 0.05$ en el ANOVA.

Ecuación de regresión

$$C = -0.000179 - 0.000001 T + 0.002447X$$

Donde:

C: %CO₂ Abs.

X: profundidad de carbonatación.

T: tiempo de carbonatación.

Tabla 104

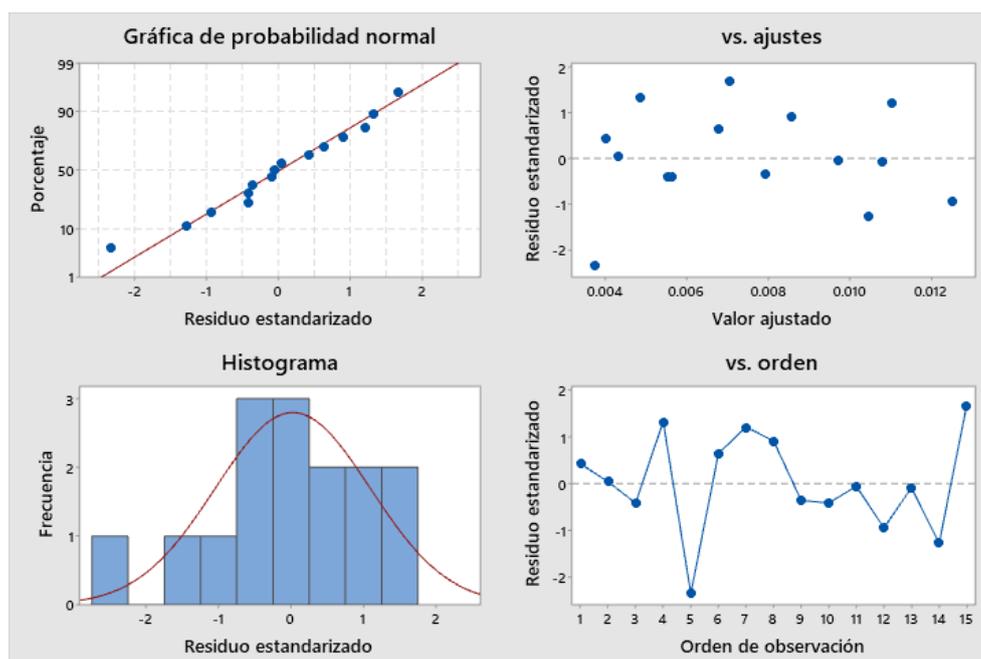
Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0000525	99.97%	99.97%	99.95%

Nota. Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 4 cemento tipo I.

Figura 92

Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 4



Nota: Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 4 de morteros cemento tipo I

Fuente: Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

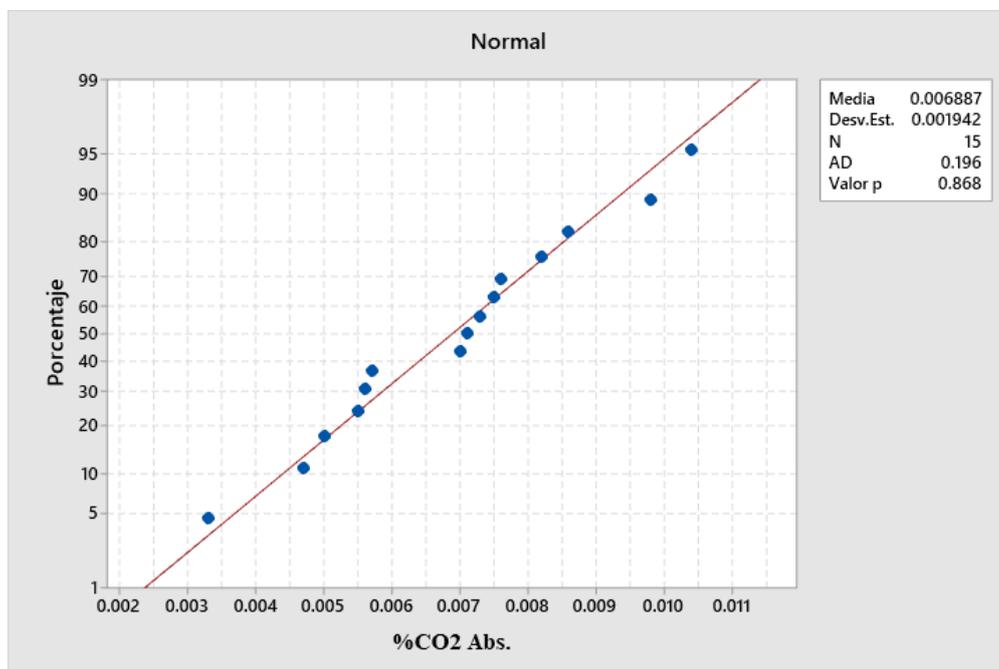
En la figura 92 se observa la aleatoriedad de los datos en la cuarta gráfica y la homocedasticidad en la segunda gráfica.

Se puede verificar en estas gráficas que se cumplen los criterios de aceptabilidad, lo que justifica un análisis de regresión lineal.

Serie 4. Prueba de ajuste a una distribución normal cemento tipo HS para Abs %CO₂.

Figura 93

Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido



Nota: Prueba de normalidad Anderson – Darling al %CO₂ absorbido de morteros de serie 4 cemento tipo HS. Fuente: Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

El p-valor es mayor que 0.05, los datos son normales, en el análisis se correlacionan el porcentaje de absorción, la profundidad de carbonatación y el tiempo de carbonatación.

Se analizó con dos variables (tiempo y profundidad de carbonatación) se puede incluir una tercera variable, pero los valores se vuelven $p > 0.05$ en el ANOVA.

Ecuación de regresión

$$C = -0.000228 + 0.000002 T + 0.002455 X$$

Donde:

C: %CO₂ Abs.

X: profundidad de carbonatación.

T: tiempo de carbonatación.

Tabla 105

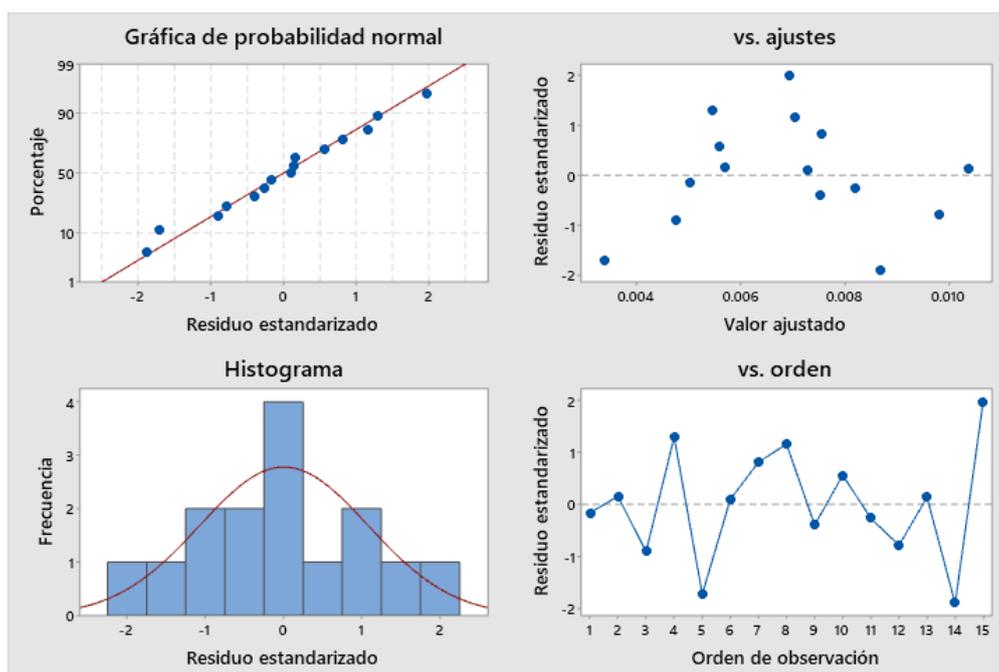
Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0000444	99.96%	99.95%	99.92%

Nota: Resumen del modelo del análisis de regresión del %CO₂ Abs. Serie 4 cemento tipo HS.

Figura 94

Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 4



Nota: Análisis de Regresión %CO₂ absorbido de serie 4 de morteros cemento tipo HS. Fuente: Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

En la figura 94 se observa la aleatoriedad de los datos en la cuarta gráfica y la homocedasticidad en la segunda gráfica.

Se puede verificar en estas gráficas que se cumplen los criterios de aceptabilidad, lo que justifica un análisis de regresión lineal.

En general se observa muy buena correlación de los resultados (99.97% y 99.95%) del R-ajustado lo que indica que la profundidad de carbonatación y el tiempo de carbonatación son las variables que explican el porcentaje de carbonatación de las muestras de cemento, es decir a mayor profundidad de carbonatación, mayor porcentaje de absorción de CO₂ y es suficiente

establecer una relación lineal entre las tres variables debido a los altos valores de R cuadrado-ajustado (coeficiente de correlación) obtenidos.

5.1.4.2 Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión.

Las pruebas de resistencia a la compresión solo se realizaron para serie 3. Para estudiar una población a través de métodos estadísticos, el interés se centra generalmente en una sola característica de la muestra que puede ser una variable continua o discreta.

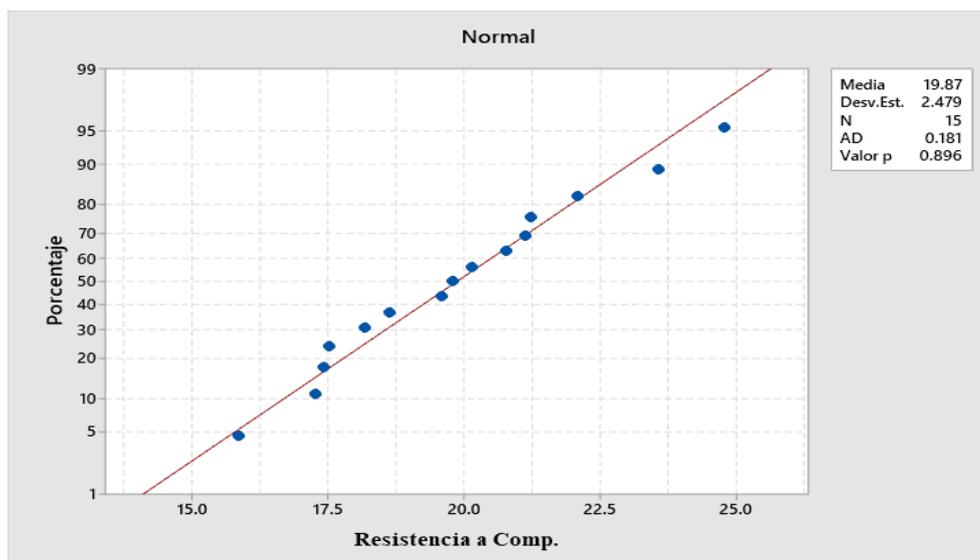
La distribución normal representa la distribución de frecuencias de una población de valores que hoy conocemos como curva normal, la cual tiene forma de una campana simétrica (Dicovski, 2012).

Para poder aceptar que los valores de las pruebas de resistencia a la compresión de probetas de morteros de cementos tipo I y tipo HS que se ajustan a una distribución normal, es necesario que se cumplan los parámetros estadísticos, como el coeficiente de normalidad (P), que debe encontrarse entre 0,05 y 1 para aceptar la estimación con un 95% de confiabilidad y el estadístico de contraste debe ser lo más cercano a 1 pero mayor de 0,05 (Dicovski, 2012).

Serie 3. Prueba de ajuste a una distribución normal cemento tipo I, Resistencia a la compresión

Figura 95

Prueba de normalidad de Resistencia a la compresión



Nota: Prueba de normalidad Anderson – Darling de Resistencia a la compresión de morteros de serie 3 cemento tipo I. Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

El p-valor es mayor que 0.05, por lo que los datos son normales los datos son normales, en el análisis se correlacionan el porcentaje de absorción, la profundidad de carbonatación y el tiempo de carbonatación.

Se analizó con dos variables (tiempo y profundidad de carbonatación) se puede incluir una tercera variable, pero los valores se vuelven $p > 0.05$ en el ANOVA.

Ecuación de regresión

$$R = 24.88 + 0.136 T - 0.932 X$$

Donde:

R: Resistencia a la compresión.

X: profundidad de carbonatación.

T: tiempo de carbonatación.

Tabla 106

Análisis de regresión de Resistencia a la compresión Serie 3

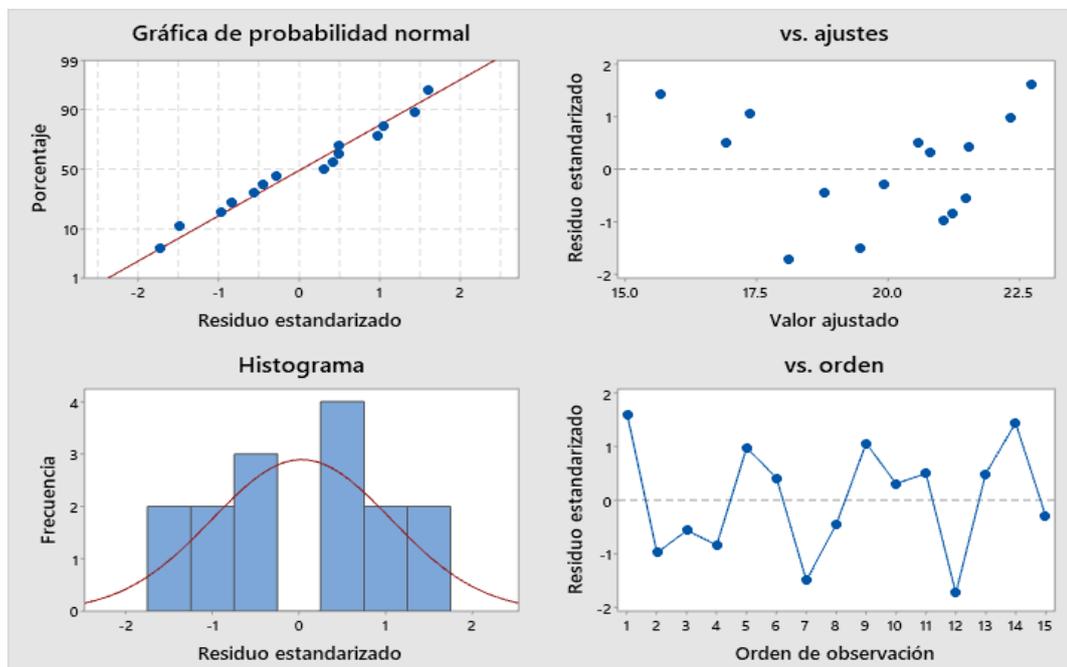
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.418	71.96%	67.28%	55.66%

Nota: Resumen del modelo del análisis de regresión de Resistencia a la compresión

Serie 3 cemento tipo I

Figura 96

Análisis de Regresión Resistencia a la compresión de serie 3



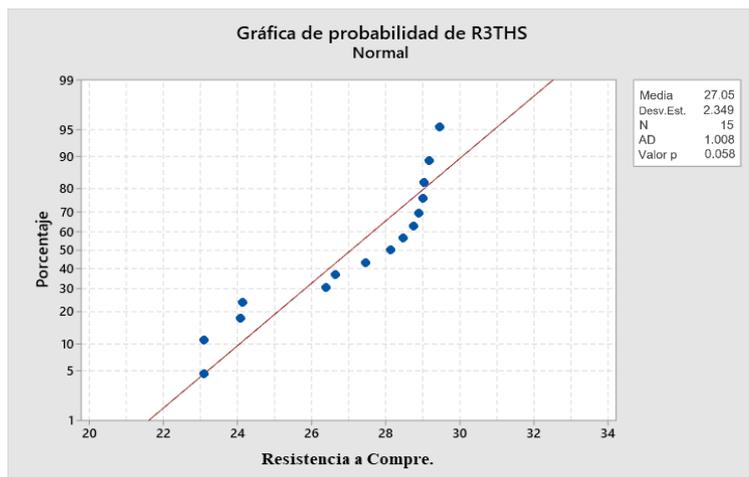
Nota: Análisis de Regresión Resistencia a la compresión de serie 3 de morteros cemento tipo I. Paquete estadístico Minitab versión 19.2

En la figura 96 se observa la aleatoriedad de los datos en la cuarta gráfica y la homocedasticidad en la segunda gráfica.

Serie 3. Prueba de ajuste a una distribución normal cemento tipo HS Resistencia a la compresión.

Figura 97

Prueba de normalidad de Resistencia a la compresión



Nota: Prueba de normalidad Anderson – Darling de Resistencia a la compresión de morteros de serie 3 cemento tipo HS. Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

El p-valor es mayor que 0.05, los datos son normales, en el análisis se correlacionan el porcentaje de absorción, la profundidad de carbonatación y el tiempo de carbonatación.

Se analizó con dos variables (tiempo y profundidad de carbonatación) se puede incluir una tercera variable, pero los valores se vuelven $p > 0.05$ en el ANOVA.

Ecuación de regresión

$$R = 32.069 - 0.428 T - 0.109 X$$

Donde:

R: Resistencia a la compresión.

X: profundidad de carbonatación.

T: tiempo de carbonatación

Tabla 107

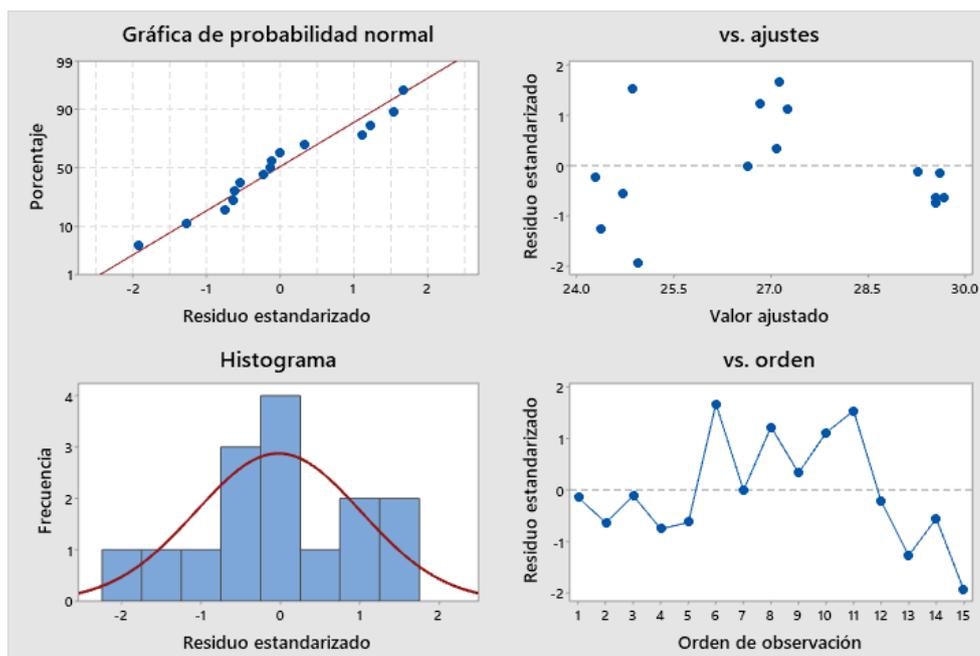
Modelo del análisis de regresión de Resistencia a la compresión

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.161	79.08%	75.59%	66.14%

Nota: Resumen del modelo del análisis de regresión de Resistencia a la compresión Serie 3 cemento tipo HS

Figura 98

Análisis de Regresión Resistencia a la compresión de serie 3



Nota: Análisis de Regresión Resistencia a la compresión de serie 3 de morteros cemento tipo HS. Paquete estadístico Minitab versión 19.2.

En la figura 98 se observa la aleatoriedad de los datos en la cuarta gráfica y la homocedasticidad en la segunda gráfica. Se puede verificar en estas gráficas que se cumplen los criterios de aceptabilidad, lo que justifica un análisis de regresión lineal.

5.1.4.2 Variación de masas de las muestras carbonatadas

El efecto de la carbonatación en pastas y morteros se evidencio con el incremento de las masas, con lo que se demuestra la formación de la calcita y el agua como consecuencia de la reacción de carbonatación.

Durante el proceso de carbonatación acelerada se observó que las masas de los morteros de los diferentes cementos utilizados en las series 1,2,3 y 4 han aumentado como se muestra en las figuras (27, 29, 44, 46, 63, 65, 88 y 91) que representan la evolución con el tiempo y se ajustan a una tendencia lineal con pendiente positiva muy similar para cada una de las muestras con sus adiciones respectivas.

Las probetas carbonatadas a HR entre 85 a 90 % con relación a/c constantes, tienen un incremento de masa más o menos variables, hasta obtener la máxima cantidad de CO_2

absorbido. En la serie 3 para muestras de cemento tipo I según datos estadísticos el incremento de masa mínimo es de 4,65 g y 6,10 g; y del tipo HS el máximo 1,91g y 2,96 g con un coeficiente de variación $< 18,83\%$, presentando un nivel de variabilidad moderada; siendo las muestras de morteros con adición de NTC del cemento tipo HS las que menor masa incrementaron por consiguiente presentan menor grado de carbonatación.

Se puede decir que las muestras que más se carbonatan son las que más gramos ganan y menos agua de gel ligan. Las muestras que más portlandita pierden son también las que más CO_2 ganan.

5.2 Difractogramas de la prueba DRX

Para realizar el análisis de los resultados de los ensayos de difracción de rayos x (DRX) en muestras de morteros de la serie 3 se usaron los difractogramas de patrones normalizados para la identificación de compuestos cristalinos como la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (P), calcita (CaCO_3) (C), en la cima de los picos como se muestra en tabla (77).

Las siguientes graficas del 56 al 65, se presentan los difractogramas de DRX de las muestras carbonatadas a 85 y 90 % de HR.

Los picos principales de la portlandita aparecen en ángulos (2θ) de $118,0^\circ$, $28,7^\circ$, $34,1^\circ$, $47,1^\circ$, $50,8^\circ$, $54,4^\circ$; los de la calcita(2) en $23,1^\circ$, $29,5^\circ$, $36,0^\circ$, $39,4^\circ$, $43,2^\circ$, $47,6^\circ$, $48,6^\circ$, y $57,4^\circ$, además, se puede identificar al cuarzo (SiO_2) con la letra Q.

El análisis de los difractogramas DRX muestra que el pico más alto de la calcita formada corresponde a la muestra concreto del cemento tipo I con sus aditivos; igualmente se observa la presencia de portlandita para los ángulos 2θ e intensidades correspondientes.

VI. CONCLUSIONES

- El modelo utilizado para determinar el coeficiente de difusión o velocidad de carbonatación es el que se basa en la ecuación derivado de la ley de Fick: $x = k t^{1/2}$. Mayor profundidad de carbonatación corresponde a muestras con relación a/c mayores. Al aumentar la relación a/c aumenta la porosidad, esto facilita la difusión del CO₂, por lo tanto, El coeficiente de carbonatación depende de la velocidad de absorción de CO₂, dependiendo de la HR, y del % de CO₂ del ambiente de exposición en la cámara de aceleración.
- De los distintos aditivos utilizados en esta investigación se muestran en todas las series, el que generó menor profundidad de carbonatación y menor absorción de CO₂, es el NTC, le sigue el Impermeabilizante IP, presentando estos aditivos una mejor barrera de protección, no siendo aconsejables el de carbono y vidrio para muestras de cementos tipo I y tipo HS.
- El análisis de los difractogramas DRX muestra que el pico más alto de la calcita formada corresponde a la muestra de concreto del cemento tipo I con sus aditivos; igualmente se observa la presencia de portlandita para los ángulos 2θ e intensidades correspondientes. La comparación de las gráficas permitió relacionar el aumento de absorción de CO₂ con la disminución de la altura de los picos de la portlandita (Ca(OH)₂), esto debido a las reacciones de carbonatación, donde se convierte la portlandita en calcita.
- Cementos de mayor resistencia a compresión dan lugar a menores profundidades de carbonatación, bajas permeabilidades y baja penetración de sustancias agresivas.
- Los ensayos acelerados de carbonatación, reducen los tiempos en forma importante, pero es difícil extrapolar los resultados en un ambiente natural. El método acelerado permitió usar en la experimentación probetas de tamaño reducido para operar y obtener resultados en tiempos menores predecibles como ocurrió en las series 2 y 3.

- El tratamiento estadístico de los datos experimentales y de las relaciones entre las variables estudiadas mostro que cumplen con una distribución normal ($p > 0,05$), esto demostró la validez de los ensayos realizados.

VII. RECOMENDACIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, se recomienda normalizar el ensayo acelerado en la cámara de carbonatación, para predecir el comportamiento de los morteros y concreto de los diferentes tipos de cemento, frente a las reacciones de carbonatación por difusión del CO₂ e incluir en los reglamentos de construcción como ensayo obligatorio. (Corral et al., 2011)
- En obras de estructuras de concreto armado, se debe prever un recubrimiento adecuado, tomando en cuenta la carbonatación por efecto de absorción de CO₂ del medio ambiente, así mismo realizar mantenimientos planificados a lo largo de la vida útil de la estructura.
- Se recomienda la construcción de una torre de humidificación para la cámara de carbonatación construida en el LEM-UNI con la finalidad de controlar las HR constante y hacer las experiencias a diferentes HR.
- Para extrapolar los resultados obtenidos en la cámara de carbonatación acelerada con carbonatación en ambientes atmosféricos normales, es necesario hacer las pruebas con las mismas características de muestras de concreto por un periodo de dos años en ambientes externos.

VIII. REFERENCIAS

- ACI 201.2R. (2016). Guide to Durable Concrete. Reported by American Concrete Institute Committee 201.
- ACI 365.1R. (2017). Report on Service Life Prediction. Reported by American Concrete Institute Committee 365.
- Ajayan, P. (1999). Nanotubes from Carbon. *Chemical Reviews*, 99(7), 1787-1800.
doi:<https://doi.org/10.1021/cr970102g>
- Alvarado, J. (2020). Horizontes de la ética medioambiental: consideraciones intergeneracionales. *Revista de Filosofía*, 36(91), 7-24. Obtenido de <https://produccioncientificaluz.org/index.php/filosofia/article/view/31468>
- André, J. (2017). *Mixing cement with carbon dioxide - effect on early hydration (Bachelor of Science Thesis)*. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.
- Benítez, P. (2018). *Maintenance support strategies for reinforced concrete structures under corrosion risk (Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering)*. Portugal: University of Aveiro.
- Bonavetti, V. L., Rahhal, V. F., y Irassar, E. F. (2002). Evolución de la hidratación en cementos con adiciones. *Materiales de Construcción*, 52(268), 57-63.
doi:<http://dx.doi.org/10.3989/mc.2002.v52.i268.317>
- Bonavetti, V., y Rahhal, V. (2006). Interacción de Adiciones Minerales en Pastas de Cemento. *Revista de la Construcción*, 5(2), 33-41. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619380004>
- Chalmers, P. (2014). *Cambio Climático: Implicaciones para los Edificios*. Reporte: El Clima - Un asunto de todos. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Obtenido de https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/Buildings_Briefing_ES.pdf

- Chang, T.-P., Shih, J.-Y., Yang, K.-M., y Hsiao, T.-C. (2007). Material properties of portland cement paste with nano-montmorillonite. *Journal of Material Science*, 42(17), 7478-7487. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/s10853-006-1462-0>
- Chine, B., Cuevas, R., Jiménez, R., Ortiz, G., y Pridybailo, G. (2018). *CORrosión del concreto reforzado y DEgradación de sus propiedades MECánicas (CODE_MEC1): Etapa 1 - Estudio experimental y modelación computacional de la carbonatación del concreto*. Informe Final de Proyecto de Investigación y Extensión. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Corral, R., Arredondo, S., Flores, N., Vicente, J., Almeraya, F., Castorena, J., y Almaral, J. (2011). Sulfate attack and reinforcement corrosion in concrete with recycled concrete aggregates and supplementary cementing materials. *International journal of electrochemical science*, 6, 613-621.
- Czarnecki, L., y 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*, vol. 63(no. 1). doi:10.1515/bpasts-2015-0006
- Dayaram, K. (2010). *The Recarbonation of Crushed Concrete from a New Zealand Perspective (Master Thesis)*. New Zealand: University of Canterbury.
- Favier, A., De Wolf, C., Karen, S., y Habert, G. (2018). *A Sustainable Future for the European Cement and Concrete Industry - Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050*. Zürich, Switzerland: EPFL and ETHZ.
- Ferrer, B. N. (2009). *Miremos los problemas del medio ambiente desde la filosofía*. Obtenido de Monografías: medioambientales-filosofia/problemas-medioambientales-filosofia2. <https://www.monografias.com/trabajos66/problemas->
- FICEM. (2017). *Hoja de Ruta CO₂. Hacia una economía resiliente y baja en carbono*. Federación Interamericana del Cemento.

- Galán, I. (2011). *Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH (Tesis Doctoral)*. España: Universidad Complutense de Madrid.
- Galan, I., Andrade, C., Prieto, M., Mora, P., Lopez, J., y San Juan, M. A. (2010). *Estudio del Efecto Sumidero de CO₂ de los Materiales de Base Cemento*. Madrid: IECA - Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
- García, M. E., y Garcés, L. F. (2018). La filosofía y la naturaleza. *Pensamiento Americano*, 11(21), 71-78. Obtenido de:
https://www.researchgate.net/publication/331407509_La_filosofia_y_la_naturaleza
- Ghahari, S. A., Ramezani pour, A. M., Ramezani pour, A. A., y Esmaeili, M. (2016). An accelerated test method of simultaneous carbonation and chloride ion ingress: durability of silica fume concrete in severe environments. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016.
doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2016/1650979>
- Ghantous, R. M. (2016). *Initiation and propagation of rebar corrosion in carbonated and cracked concrete (Thesis Doctor of Civil Engineering)*. France: Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA).
- Hernández, B. (2016). *Propiedades físicas y mecánicas de concreto con agregado grueso reciclado pre-tratado (Tesis de Maestría)*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hewlett, P. C. (Ed.). (2004). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (4 ed.). Oxford, United Kingdom: Elsevier Science and Technology Books.
- Iloro, F. H. (2015). Efectos del CO₂ ambiental sobre la carbonatación de hormigones elaborados con distintos cementos. *Revista Ciencia y Tecnología de los Materiales*, vol. 2015(núm. 05, pp. 15-31).

Obtenido de: <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/2047>

Iloro, F. H., Traversa, L. P., y Ortega, N. F. (2016). Correlación entre carbonatación natural y acelerada del hormigón con distintos cementos. *VII Congreso Internacional – 21a Reunión Técnica de la AATH* (pp. 333-340). Salta, Argentina: Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Obtenido de:

<https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/4921>

INACAL. (2016). (Norma Técnica Peruana NTP 334.009). *CEMENTOS. Cemento Portland. Requisitos*. Lima, Perú: INACAL - Instituto Nacional de Calidad.

INACAL. (2016). (Norma Técnica Peruana NTP 334.090). *CEMENTOS. Cemento Portland adicionados. Requisitos*. Lima, Perú: INACAL - Instituto Nacional de Calidad.

Kuo, W.-Y., Huang, J.-S., y Lin, C.-H. (2006). Effects of organo-modified montmorillonite on strengths and permeability of cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 886-895. Obtenido de:

<https://www.sciencedirect.com/journal/cement-and-concrete-research>

Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*. Heidelberg, Germany: Springer.

Lagerblad, B. (2005). *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute.

Le Tang, W. (2018). *Carbonation of Concrete Incorporating High Volume of Micro and Low Volume of Nano Palm Oil Fuel Ash (Thesis Master of Civil Engineering)*. Australia: Curtin University.

Lorca, P. (2014). *Efecto de la adición de hidróxido cálcico sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante (Tesis Doctoral)*. España: Universitat Politècnica de València.

Mel Fraga, J. (2017). *Nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón (Tesis Doctoral)*. España: Universidade da Coruña.

- MINAM. (2016). *El Perú y el Cambio Climático. Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente, Viceministerio de Desarrollo Estratégico de los Recursos Naturales.
- Mizzi, B., Wang, Y., y Borg, R. (2018). Effects of climate change on structures; analysis of carbonation-induced corrosion in Reinforced Concrete Structures in Malta. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*(442).
doi:[10.1088/1757-899X/442/1/012023](https://doi.org/10.1088/1757-899X/442/1/012023)
- Mohammed, M. K. (2015). *Multi-scale Response of Sustainable Self- Compacting Concrete (SCC) to Carbonation and Chloride Penetration (Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering)*. United Kingdom: The University of Nottingham.
- Muñoz, A. F. (2017). *Carbonatación acelerada de agregados finos reciclados y su influencia en mezclas de mortero (Tesis de Maestría en Ingeniería Civil)*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Mwiti, J., Karanja, J., y Muthengia, J. (2019). Review of Carbonation Resistance in Hydrated Cement Based Materials. *Hindawi Journal of Chemistry*, vol. 2019.
doi:<https://doi.org/10.1155/2019/8489671>
- Ñaupas, H., Mejía, E., Novoa, E., y Villagómez, A. (2013). *Metodología de la investigación científica y elaboración de tesis*. Lima: Centro producción editorial e imprenta UNMSM.
- Olumuyiwa, J. (2017). *Effects of concrete quality and cover depth on carbonation-induced reinforcement corrosion and initiation of concrete cover cracking in reinforced concrete structures (Thesis Doctor of Philosophy)*. Johannesburg, South Africa: University of the Witwatersrand.
- Ortiz, A. M. (2014). La Relación Hombre-Naturaleza. Tendencias de su Filosofía en Cuba. *Revista de Ciencias Sociales (CI)*(32), 63-76. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70831715004>

- Peter, T. (2016). *Investigations of the Use of Spent Sorbent from the Ca Looping Process in Cement Manufacture and Investigation of Long-Term CO₂ Uptake in Cement and Concrete (Thesis Doctor of Philosophy - PhD)*. London, United Kingdom: Imperial College London of Science, Technology and Medicine.
- Ramirez, A. (2002). La Construcción Sostenible. *Física y Sociedad*(13), 30-33.
- Rivera, J. O. (2016). *Evaluación del estado de degradación de diversos tipos de varilla de acero utilizadas como refuerzo en concretos carbonatados y contaminados con cloruros (Tesis Doctoral)*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Sánchez, H., y Reyes, C. (2015). *Metodología y diseños en la investigación científica*. Lima: Business Support Aneth.
- Sánchez, M. J. (2017). *La activación alcalina como procedimiento para el desarrollo de nuevos cementos belíticos (Tesis Doctoral)*. Madrid, España: UNED Facultad de Ciencias.
- Savija, B., y Lukovic, M. (2016). Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. *Construction and Building Materials*, vol. 117(núm. August), pp. 285-301.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.138>
- Srivastava, D., Wei, C., y Cho, K. (2003). Nanomechanics of Carbon Nanotubes and Composites. *Applied Mechanics Reviews*, 56(2), 215-230.
doi:<https://doi.org/10.1115/1.1538625>
- Takahashi, H. (2019). *Study on the microscopic alteration of cementitious materials subjected to high temperature and water action using non-destructive integrated CT-XRD method (Thesis for the degree of Doctor of Engineering)*. Sapporo, Japan: Hokkaido University.
- Talukdar, S. (2013). *The effects of global climate change on carbonation induced corrosion of reinforced concrete structures (Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering)*. Vancouver, Canadá: University of British Columbia.

- Taylor, H. (1997). *Cement chemistry* (2 ed.). London, United Kingdom: Thomas Telford.
- Tongaria, K., Mandal, S., y Mohan, D. (2018). A Review on Carbonation of Concrete and its Prediction Modelling. *Journal of Environmental Nanotechnology*, vol. 7(no. 1), pp. 75-90. doi:[10.13074/jent.2018.12.184325](https://doi.org/10.13074/jent.2018.12.184325)
- Valerio, J. T. (2019). *Preparación de probetas de concreto con nanotubo de carbono para el mejoramiento de sus propiedades (Tesis de Maestría en Ciencias)*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Visser, J. H. (2012). Accelerated carbonation testing of mortar with supplementary cementing materials - Limitation of the acceleration due to drying. *HERON*, vol. 57(núm. 3), pp. 231-247. Obtenido de:
<https://pdfs.semanticscholar.org/e5e2/f2f93a2e5758a7293b4563010953642a57d6.pdf>
- Wang, H. (2014). *The Study of Concrete Durability in the Case of Jinan Yellow River Highway Bridge (Master of Science Thesis in Programme of Infrastructure and Environmental Engineering)*. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology.
- Ye, R. (2019). *Investigation of the Carbonation Effect on the Microstructure and Transport Properties of Cement Pastes (Thesis Master of Science in Civil Engineering)*. Italy: Politecnico di Torino.