

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y Extensión
Dirección de Proyectos

Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales
Escuela de Ingeniería en Construcción

Informe final de proyectos de investigación y extensión

COrrósión del concreto reforzado y DEgradación de sus propiedades MECánicas (CODE_MEC1):
Etapa 1 Estudio experimental y modelación computacional de la carbonatación del concreto

Código: 1490017

Ing. Bruno Chine P., PhD., investigador responsable
Ing. Rommel Cuevas K., Lic, investigador
Ing. Ronald Jimenez S., MSc., investigador
Ing. Giannina Ortiz Q., MSc., investigador
Ing. Galina Pridybailo C., MSc., investigador

21 de junio de 2018

Contenido

1. Código y Título del proyecto	4
2. Autores y direcciones	4
3. Resumen Ejecutivo	4
4. Palabras clave.....	5
5. Introducción	5
6. Marco teórico	7
6.1. Cemento hidráulico utilizado	7
6.2. Composición química del cemento hidráulico	7
6.3. Construcción, Cemento hidráulico. Especificaciones y requisitos INTE 06-11-15:2015.....	9
6.4. Normativa para diseño de mezcla de concretos	9
6.4.1. Ensayo estándar para determinación de la densidad aparente ("Peso unitario") y vacíos en el agregado (ASTM C29-17)	9
6.4.2. Método de ensayo estándar para Densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso y fino. (ASTM C127-15, ASTM C128-15)	10
6.4.3. Método de prueba estándar para el análisis de tamices para agregados finos y gruesos (ASTM C136-06).....	11
6.4.4. Módulo de Finura	12
6.4.5. Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio (ASTM C192-16 ^a):	12
6.4.6. Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto (ASTM C39-16).....	12
6.5. Carbonatación del concreto.....	13
6.6. Cámara de carbonatación	14
6.7. Sistema de control	15
6.8. Ensayos de medición de carbonatación.....	15
6.9. Técnicas experimentales y de END mediante gamma scanning (GS) y rayos x (XR)	17
6.10. Modelación del proceso de carbonatación.....	18
6.10.1. Hipótesis del modelo de carbonatación del concreto.....	19
6.10.2. Conservación de la masa.....	20
6.10.3. Expresión de la velocidad para el flujo en medio poroso	21
6.10.4. Ecuaciones de transporte para el flujo reactivo-difusivo.....	22
6.10.5. Ecuaciones diferenciales de transporte del modelo de carbonatación.	22
6.10.6. Ecuaciones diferenciales de transporte acopladas a las reacciones químicas	23
7. Metodología	26
7.1. Revisión bibliográfica	26

7.2.	Elaboración de los especímenes.....	27
7.3.	Caracterización de componentes.....	28
7.3.1.	Caracterización de agregados.....	28
7.3.2.	Caracterización de material cementicio.....	28
7.4.	Diseño de mezcla de concreto hidráulico.....	28
7.5.	Elaboración de especímenes de estudio.....	28
7.6.	Desarrollar un sistema experimental de carbonatación acelerada por difusión de CO ₂	29
7.6.1.	Pruebas preliminares.....	29
7.6.2.	Diseño y construcción de cámara de carbonatación.....	29
7.6.3.	Sistema de control de la cámara de carbonatación.....	29
7.7.	Campaña experimental.....	30
7.7.1.	Condiciones de prueba.....	30
7.7.2.	Extracción y preparación de muestras para análisis.....	31
7.7.3.	Ensayos de caracterización.....	33
7.7.3.1.	Ensayos colorimétricos.....	33
7.7.3.2.	Ensayos difractométricos.....	33
7.7.3.3.	Ensayos termogravimétricos.....	33
7.7.3.4.	Ensayos de ATR-FTIR (Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier con implemento de Reflexión Total Atenuada).....	33
7.8.	Perfiles de carbonatación por medio de escaneo gamma (GS).....	33
7.9.	Radiografías con rayos X.....	36
7.10.	Ensayos mecánicos.....	37
7.11.	Modelación y simulación el proceso de carbonatación en el concreto.....	37
8.	Resultados.....	40
8.1.	Caracterización de componentes.....	40
8.1.1.	Caracterización de agregados.....	40
	Tabla 8.2. Análisis granulométrico agregado grueso [Ast14].....	40
	Figura 8.1. Análisis granulométrico de los agregados gruesos en estudio.....	41
	Tabla 8.3. Análisis granulométrico agregado fino, según [Ast14].....	41
8.1.2.	Caracterización de material cementicio.....	42
8.2.	Diseño de mezcla de concreto hidráulico.....	43
8.3.	Elaboración de especímenes de estudio.....	43
8.4.	Diseño y construcción de cámara de carbonatación y del sistema de control.....	46
8.5.	Campaña experimental.....	51
8.5.1.	Pruebas preliminares.....	51

8.5.1.1.	Construcción de un sistema para ensayos preliminares	51
8.5.1.2.	Resultados de ensayo colorimétrico preliminar	52
8.5.1.3.	Resultados de ensayo difractométrico preliminar	52
8.5.1.4.	Resultado de ensayo termogravimétrico preliminar (TGA)	53
8.5.2.	Ensayos definitivos	54
8.5.2.1.	Ensayos colorimétricos	54
8.5.2.2.	Ensayos Difractométricos	55
8.5.2.3.	Ensayos termogravimétricos	56
8.5.2.4.	Ensayos con espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)	56
8.5.2.5.	Ensayos mecánicos	57
8.5.2.6.	Aplicación de la técnica de gamma scanning (GS)	59
8.5.2.7.	Radiografías con rayos X	67
8.6.	Modelación y simulación el proceso de carbonatación en el concreto.	68
9.	Discusión y conclusiones	73
10.	Recomendaciones	81
11.	Agradecimientos	82
12.	Referencias	82
13.	Apéndices	88
13.1.	Apéndice 1	88
13.2.	Apéndice 2	89
13.3.	Apéndice 3	90

1. Código y Título del proyecto

Código del Proyecto: 1490017

COrrosión del concreto reforzado y **DE**gradación de sus propiedades **MEC**ánicas (**CODE_MEC1**): Etapa **1** Estudio experimental y modelación computacional de la carbonatación del concreto.

2. Autores y direcciones

Investigador	Escuela/Centro	email
Bruno Chinè Polito	ECIM/CIEMTEC	bchine@itcr.ac.cr
Rommel Cuevas Kauffmann	EICO/CIVCO	rcuevas@itcr.ac.cr
Ronald Jiménez Salas	ECIM/CIEMTEC	rjimenez@itcr.ac.cr
Giannina Ortiz Quesada	EICO/CIVCO	gortiz@itcr.ac.cr
Galina Pridybailo Checkan	ECIM/CIEMTEC	galia@itcr.ac.cr

3. Resumen Ejecutivo

En el sector civil de la construcción, el concreto y el refuerzo metálico representan aun los materiales de mayor importancia, aunque sean muy vulnerables por los agentes atmosféricos, como en el caso de su degradación por corrosión. En Costa Rica debido a la falta de métodos de monitoreo de las estructuras existentes, sumado a una deficiente política preventiva en términos de mantenimiento, se hace urgente el desarrollo de modelos predictivos que permitan intervenir a tiempo cualquier tipología de estructura antes de que comprometa de alguna forma la integridad de los usuarios.

En este informe se presentan los resultados de un proyecto de investigación que abarca el estudio de la carbonatación del concreto por causa del gas CO₂. En el proyecto se considera solamente el estudio experimental y la modelación de la carbonatación sin la presencia del refuerzo metálico. Se usan métodos de carbonatación en cámara acelerada y ensayos de difracción de rayos X, químicos y no destructivos con el objeto de obtener datos experimentales que sirvan de base para el desarrollo de un modelo computacional del mecanismo reactivo-difusivo de carbonatación. El modelo computacional ha sido validado comparando los resultados numéricos con los valores experimentales obtenidos con la campaña experimental. De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que el modelo describe satisfactoriamente el proceso de carbonatación y simula correctamente el avance del frente de carbonatación en el tiempo.

4. Palabras clave

Concreto, carbonatación, difusión-reacción en medios porosos, técnicas experimentales, modelación computacional

5. Introducción

En el sector civil de la construcción, el concreto y el refuerzo metálico representan aun los materiales de mayor importancia, aunque sean muy vulnerables por los agentes atmosféricos, como en el caso de su degradación por corrosión. Acciones para analizar el impacto sobre la corrosión atmosférica de estructuras debido al aumento de CO₂ en la atmosfera, como consecuencia del cambio climático, son apoyadas por los Gobiernos de diferentes países [Wan10]. En Estados Unidos un reporte reciente de la American Society of Civil Engineers ASCE [Asc13] subraya la deficiencia del sistema de transporte, en particular la degradación de las estructuras de los puentes y los altos costos asociados con la corrosión del acero. En Costa Rica debido a la falta de métodos de monitoreo de las estructuras existentes, sumado a una deficiente política preventiva en términos de mantenimiento, se hace urgente el desarrollo de modelos predictivos que permitan intervenir a tiempo cualquier tipología de estructura antes de que comprometa de alguna forma la integridad de los usuarios. Sumado a que el desarrollo de estas técnicas, podrán colaborar en la implementación de nuevos métodos que permitirán la instauración de nuevas especificaciones técnicas, como requisitos de diseño en los códigos nacionales.

La Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales (ECIM) del ITCR mantiene desde su inicio el área de la corrosión y protección de los materiales como una de las áreas prioritarias de investigación. Diversos proyectos han sido llevados a cabo en el área de la corrosión atmosférica, para citar un caso la participación al proyecto internacional CYTED “*Corrosión y protección de metales en las atmosferas de Iberoamérica*” [Mor98], así como acciones de divulgación en este campo, para citar otro caso importante el curso del profesor Vincenzo Amicarelli, desarrollado en 1989 en el ITCR con el título “*Causas de la corrosión de los armazones de concreto en ambiente marino y no marino*”. La misma Escuela ha alcanzado un valioso reconocimiento durante los últimos veinte años en las aplicaciones de las técnicas de ensayos no destructivos en el área de los materiales, en particular ha usado las técnicas GS (gamma scanning) y XR (x rays) y desarrollado proyectos de investigación nacionales e internacionales. Paralelamente la Escuela ha incorporado temas de modelación y simulación computacional en sus actividades de investigación, aplicándolas a procesos de difusión en materiales porosos (mecanismos de difusión en materiales agroindustriales) y celulares (procesos de espumado del aluminio).

La Escuela de Ingeniería en Construcción busca en el mejoramiento del sector construcción por medio de la investigación, la capacitación y transferencia de tecnología. Con ello, los profesionales involucrados en la escuela, así como sus estudiantes procuran el cambio en la práctica constructiva, con propuestas económicas, amigables con el ambiente y que mejoren la calidad de vida de los usuarios. La labor del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción se concentra en la investigación, la capacitación y la asistencia técnica en sus campos y áreas de acción. Considera las políticas emitidas a nivel local y regional, coordina con entidades públicas, privadas y organizaciones no gubernamentales, tanto nacionales como internacionales. Asimismo, mantiene una actitud permanente de cooperación con todos aquellos entes que juegan un rol en el sector de la vivienda y los asentamientos humanos. El CIVCO ha venido desarrollando una serie de labores investigativas en materia de cementos y concretos hidráulicos en alianza con instituciones estatales y empresa privada, buscando la mejora en los procesos de elaboración y resistencia de estos aglutinantes.

El proyecto Ebrige se encuentra realizando un modelo de predictivo en falla en puentes mediante metodologías de evaluación que buscan potenciar el uso de ensayos no destructivos, en la evaluación de puentes, y dado que

durante los procesos de inspección en las estructuras, se ha encontrado que existe una gran afectación en el deterioro de las secciones de concreto estructural como consecuencia de la corrosión del acero de refuerzo, principalmente en las losas de los puentes del país. El estudio de fenómeno de la carbonatación contribuirá de sobre manera en la generación de un modelo predictivo de la caída de la resistencia a la compresión del concreto hidráulico y sus efectos en el concreto estructural, implementando eventualmente en un caso de estudio uno de los puentes instrumentados por el proyecto Ebrige.

La importancia de los estudios en el concreto hidráulico radica en que este aglutinante se encuentra entre los materiales de mayor consumo en el mundo, sumado a que en la mayoría de las obras de infraestructura y edificaciones requieren de este material para su desarrollo; por ello la importancia de las investigaciones en estos materiales cuyo fin último es salvaguardar la integridad de sus usuarios ante los diferentes eventos en el que las estructuras se encuentran expuestas.

El estudio de la carbonatación del concreto por causa del gas CO_2 que permea su matriz porosa y eventualmente la fractura, es un requisito fundamental para establecer la probabilidad de que el concreto se degrade, y que el refuerzo metálico pueda enfrentar mecanismos de corrosión lo que finalmente puede incidir en la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado. El grado de carbonatación del concreto puede inducir el cambio en las condiciones protectivas del refuerzo metálico en los concretos estructurales, lo cual podría acarrear corrosión en el refuerzo, provocando una serie de eventos que finalmente podrían generar la degradación de los elementos estructurales.

El uso de la modelación computacional y de técnicas no destructivas para la caracterización mediante perfilajes de materiales porosos como el concreto, se considera por parte de la comunidad científica un método con un elevado potencial de desarrollo. El presente proyecto representa así un esfuerzo de dos Escuelas que, uniendo los conocimientos propios de cada una, pretenden abordar conjuntamente el tema de la carbonatación del concreto causada por la difusión de CO_2 , mecanismo fundamental que controla el sucesivo proceso de corrosión y degradación de las propiedades mecánicas.

Por lo anterior, en el presente proyecto se formularon diversos objetivos que tienen la finalidad de generar un conocimiento base sobre el proceso de carbonatación en los concretos hidráulicos. De esta forma se inició con un estudio sobre la problemática de la carbonatación, considerando las variables que inciden en el fenómeno, métodos de estudio, condiciones de evaluación, para finalmente desarrollar un modelo y una simulación computacional de este fenómeno.

Con base en este marco conceptual se planteó el objetivo de llevar a cabo un equipamiento que permitiera el estudio de carbonatación y otros tipos de ensayo.

6. Marco teórico

6.1. Cemento hidráulico utilizado

El cemento hidráulico es un material aglutinante que se forma por medio de la calcinación de material calcáreo (piedra caliza, conchas, mármol, etc.) y un material arcilloso en el cual la sílice es el constituyente más importante (arcilla o escoria de altos hornos), hasta la formación de un material conocido como Clinker. Este material adicionado con yeso como controlador de los tiempos de fraguado, sumado a algunas otras adicciones, forma lo que se conoce como cemento hidráulico tipo 1 (Portland). Este material al mezclarse con el agua forma una pasta el cual constituye aproximadamente del 25% hasta 40% del volumen total del concreto” [Pca04].

6.2. Composición química del cemento hidráulico

Principalmente, el cemento hidráulico se encuentra compuesto por:

- Silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$ (Alita))
- Silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$) (Belita)
- Aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_2 = \text{C}_3\text{A}$)
- Ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_2 = \text{C}_4\text{AF}$)

Después del proceso de calcinación se adiciona yeso durante la molienda u otra fuente de sulfato de calcio y otros auxiliares de molienda. El yeso (sulfato de calcio dihidratado $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO}\cdot\text{SO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es la fuente de sulfato de calcio más empleada en el cemento hidráulico.

La alita y la belita se hidratan para generar compuestos como el Silicato de Calcio Hidratado (C-S-H), llamado también gel de tobermolita) e Hidróxido de calcio. La Alita reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar aluminato tetracálcico hidratado. El C_4AF reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado. La Alita, sulfato (yeso, anhidrita u otra fuente de sulfato) y el agua combinan para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado), monosulfato de calcio y otros compuestos afines.

Las cantidades de calcio, sílice y alúmina establecen la cantidad de los compuestos principales en el cemento y efectivamente las propiedades del cemento hidratado.” [Pca04]. Estas transformaciones básicas de los compuestos se presentan en el Tabla 6.1

Tabla 6.1. Transformaciones básicas de los compuestos en los cementos hidráulicos.

2 (3CaO·SiO ₂) Silicato tricálcico	+ 11 H ₂ O agua	= 3CaO·2SiO ₂ ·8H ₂ O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ 3 (CaO·H ₂ O) Hidróxido de calcio
2 (2CaO·SiO ₂) Silicato dicálcico	+ 9 H ₂ O agua	= 3CaO·2SiO ₂ ·8H ₂ O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ CaO·H ₂ O Hidróxido de calcio
3CaO·Al ₂ O ₃ Aluminato tricálcico	+ 3 (CaO·SO ₃ ·2H ₂ O) Yeso	+ 26 H ₂ O agua	= 6CaO·Al ₂ O ₃ ·3SO ₃ ·32H ₂ O Etringita
2 (3CaO·Al ₂ O ₃) Aluminato tricálcico	+ 6CaO·Al ₂ O ₃ ·3SO ₃ ·32H ₂ O Etringita	+ 4 H ₂ O agua	= 3 (4CaO·Al ₂ O ₃ ·SO ₃ ·12H ₂ O) Monosulfoaluminato de calcio
3CaO·Al ₂ O ₃ Aluminato tricálcico	+ CaO·H ₂ O Hidróxido de calcio	+ 12 H ₂ O agua	= 4CaO·Al ₂ O ₃ ·13H ₂ O Aluminato tetracálcico hidratado
4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ Ferroaluminato tetracálcico	+ 10 H ₂ O agua	+ 2 (CaO·H ₂ O) Hidróxido de calcio	= 6CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ ·12H ₂ O Ferroaluminato de calcio hidratado

Fuente: [Pca04].

Adicionalmente en la Fig. 6.1, se muestra el desarrollo de los componentes del cemento hidráulico una vez hidratado. En esta figura se puede observar que conforme se alcanzan los 90 días de hidratación del cemento hidráulico, se comienza a consolidar la presencia de Silicato de Calcio Hidratado (C-S-H) e Hidróxido de Calcio Hidratado, además de otros compuestos menores. También se presenta una disminución de la porosidad cuando avanza el curado del cemento.

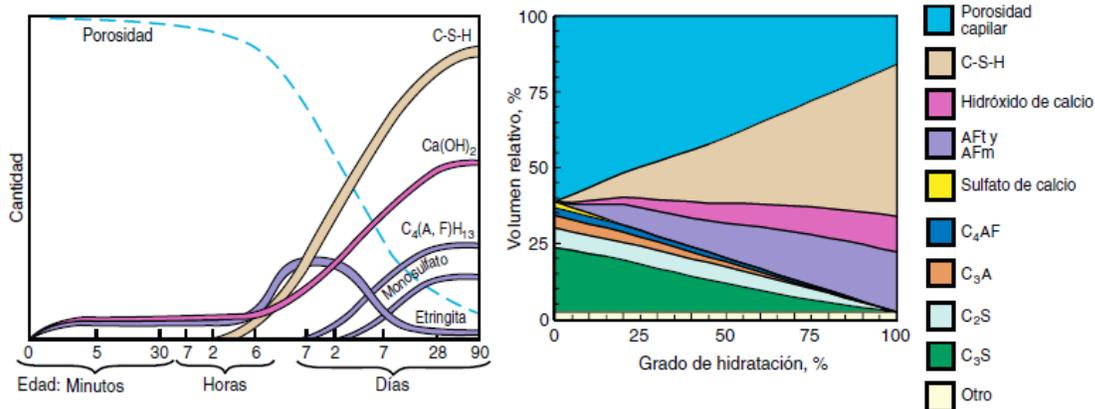


Figura 6.1. Volúmenes relativos de los compuestos principales en la microestructura de las pastas de cemento a distintas edades.

Fuente: [Pca04].

6.3. Construcción, Cemento hidráulico. Especificaciones y requisitos INTE 06-11-15:2015

En Costa Rica, las especificaciones acerca de los requisitos que los cementos hidráulicos deben de cumplir, lo expuesto el reglamento técnico nacional RTCR 479:2015, el cual indica los requerimientos para los cementos hidráulicos que serán comercializados en el mercado nacional.

En este caso en particular, actualmente se cuentan con 6 tipos de cemento (familias) como se muestra en la tabla 6.2 a continuación.

Tabla 6.2. Tipos de cementos hidráulicos

Tipo I	Cemento Portland (CPO)
Tipo ME	Cemento hidráulico con Escoria de Alto horno
Tipo MF	Cemento modificado con humo de sílice
Tipo MP	Cemento modificado con puzolanas, ceniza volante o esquisto
Tipo MC	Cemento hidráulico modificado con caliza
Tipo MM	Cemento hidráulico modificado mixto

Fuente: INTECO 06-11-15 -2015

El cemento hidráulico utilizado para este estudio se conoce como tipo MP/A-28 donde la categorización A indica que contiene entre un 80-96% de contenido de Clinker y entre un 20-4% de puzolanas (material arcilloso que mejora las reacciones químicas secundarias), y la resistencia mínima a la compresión del material aglutinante será de 28MPa a 28 días de hidratado el material.

La clarificación internacional del cemento en estudio según la normativa es de tipo GU (Uso General por sus siglas en ingles)

6.4. Normativa para diseño de mezcla de concretos

Para la elaboración de los especímenes en estudio se procedió a realizar un diseño de mezcla de concreto hidráulico, basado en lo expuesto en el ACI 211.1 (American Concrete Institute) por volúmenes absolutos.

En esencia el método busca hacer una correlación entre las propiedades de los agregados y el material de aglutinante (cemento hidráulico) con la finalidad de cumplir al menos las demandas de resistencia teóricas para el concreto hidráulico a desarrollar.

6.4.1. Ensayo estándar para determinación de la densidad aparente ("Peso unitario") y vacíos en el agregado (ASTM C29-17)

Este ensayo permite determinar el peso del agregado por unidad de volumen, el cual funciona a como un indicador de para determinar el peso del material, correlacionar su porosidad y el porcentaje de vacíos que este puede generar.

El ensayo consiste en depositar una cantidad de material (agregado fino o grueso), en un recipiente cuyo volumen es conocido. En función de diferentes energías de compactación aplicadas al material en el recipiente, se calcula la variación de peso volumétrico como propiedad del material en estudio.

6.4.2. Método de ensayo estándar para Densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso y fino. (ASTM C127-15, ASTM C128-15)

La gravedad específica también conocida como densidad relativa, se define como la relación entre el peso unitario de una sustancia y el peso unitario del agua. Es una medida de la densidad del agregado y es de suma utilidad para clasificarlos en función de los incrementos de densidad aparente. Mientras mayor sea este indicador, y siendo el material de origen pétreo, se pueden hacer correlaciones con respecto al porcentaje de absorción y porosidad del material, su resistencia mecánica y durabilidad.

- Gravedad específica absoluta (G_a): relaciona el peso unitario de un agregado pulverizado y sin aire interparticular (γ_a), con el peso unitario del agua destilada y sin aire, a temperatura normalizada (γ_w).

$$G_a = \gamma_a / \gamma_w \quad (6.1)$$

Gravedad específica aparente (G_s): es el peso unitario de un agregado seco (γ_s) entre el peso unitario del agua a temperatura normalizada.

$$G_s = \gamma_s / \gamma_w = P_s / (V_s \cdot \gamma_w) \quad (6.2)$$

Donde:

V_s : Volumen solido del material

- Gravedad específica bruta seca (G_{bs}): relaciona el peso en aire de un volumen de agregado que incluye los poros permeables (V_B), con respecto al peso en aire de un volumen igual de agua destilada, ambas condiciones tomadas a temperatura normalizada. Es un indicador de la conveniencia de uso de un agregado; por ejemplo un GBS bajo indica alta porosidad, alta absorción y debilidad del agregado.

$$G_{bs} = P_s / (V_B \cdot \gamma_w) \quad (6.3)$$

Donde:

P_s : Peso del material seco al horno (peso sólido)

Se puede expresar en función de la gravedad específica aparente y la absorción (D):

$$G_s = G \cdot [1 - (D \cdot G_{bs})] \quad (6.4)$$

Gravedad específica saturada superficie seca (GB_{SS}): es la relación del peso unitario saturado superficie seca (P_{SS}) y el peso unitario del agua, a temperatura normalizada. Considera los poros permeables y la cantidad de agua contenida en ellos.

$$GB_{SS} = P_{SS} / (V_B \cdot \gamma_w) \quad (6.5)$$

Se relaciona también con la gravedad específica bruta seca y la absorción:

$$GB_{SS} = GB_S \cdot (1 + D) \quad (6.6)$$

- Absorción (D)

La absorción del material se define como el incremento del peso del agregado debido al agua que penetra en los poros permeables del material, sin incluir el agua adherida a la superficie externa del agregado. Se refiere al porcentaje de agua absorbida expresado en relación con la masa del material seco. Del total de agua que toma parte en una batida, se denomina agua absorbida (P_{WD}) a la que no puede convertirse en parte del agua de la mezcla.

$$D = (P_{WD} / P_S) \cdot 100\% \quad (6.7)$$

6.4.3. Método de prueba estándar para el análisis de tamices para agregados finos y gruesos (ASTM C136-06)

Este ensayo brinda los procedimientos para la elaboración de la granulometría (tamaño de partícula) de los materiales en estudio, mediante el uso de tamices normalizados, tanto para agregados finos como gruesos, como se muestra en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Tamaños de tamices para el estudio granulométrico de agregado grueso

Tamaño de abertura (pulg)	Tamaño de abertura (mm)
3	75,00
2	53,00
1 ½	37,50
1	26,50
¾	19,00
3/8	9,50
No 4	4,75

Fuente: [Ast14]

Tabla 6.4. Tamaño de tamices para el estudio de agregado fino

Tamaño de abertura	Tamaño de abertura (mm)
#4	4,75
#8	2,36
#16	1,18
#30	0,60
#50	0,30
#100	0,15
#200	0,075

Fuente: [Ast14]

6.4.4. Módulo de Finura

Este indicador muestra numéricamente que tan grueso o fino es el material en estudio. En detalle, para el diseño de las mezclas de concreto, este indicador se utiliza para determinar el grado de finura de la arena y se calcula como la sumatoria de los pesos retenidos acumulados de los tamices de 9,50mm (3/8) a 0,15mm (No 100), dividido entre 100, los cuales son los tamices que rigen la granulometría del material fino que va a ser utilizado para elaborar concretos hidráulicos.

Según el ACI 211,1, el rango óptimo para determinar un adecuado balance entre una arena gruesa y fina se da cuando el módulo de finura se encuentra entre 2,4 a 3,1.

6.4.5. Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio (ASTM C192-16^a):

Esta práctica presenta las consideraciones que deben de tomarse en cuenta para elaborar las mezclas de concreto hidráulico en un ambiente controlado, así como las variables de temperatura y humedad relativa que deben de tener los sitios de curado en los cuales se mantendrán las muestras de concreto hidráulico en estudio.

6.4.6. Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto (ASTM C39-16)

Este método de ensayo determina el esfuerzo a la compresión de especímenes de concreto cilíndricos y se limita a concretos cuyo peso unitario sea mayor a los 800 kg/m³.

Para la determinación de los resultados de resistencia a la compresión, se deberá de considerar un promedio de no menos de dos especímenes para evaluaciones antes del cumplimiento de 28 días de haber elaborado los especímenes de estudio. Para la determinación de la resistencia a la compresión a 28 días se deberán de evaluar al menos tres especímenes para determinar el cálculo promedio de esta resistencia. Durante el proceso de evaluación de la resistencia se deberán de respetar las tolerancias estipuladas en la Tabla 6.5 que se muestra a continuación.

Tabla 6.5. Tolerancias para la determinación de la resistencia de especímenes de concreto.

Edad de prueba	Tolerancia permisible
24 h	± 0,5 h o 2,1 %
3 días	±2 h o 2,8 %
7 días	± 6 h o 3,6 %
28 días	± 20 h o 3,0 %
90 días	±2 días o 2,2 %

6.5. Carbonatación del concreto

El concreto es fundamentalmente un material cerámico poroso [Hay65], [Mun98], [Nev98], [Por04], [Aci14], aunque estructuras celulares son ya una realidad a raíz del desarrollo de novedosos concretos celulares con propiedades funcionales-estructurales. La estructura porosa y celular del concreto está expuesta siempre más a procesos de corrosión atmosférica (Fig. 6.2), siendo la carbonatación uno de los mecanismos principales de corrosión (Fig. 6.3). Este fenómeno afecta también el metal que está presente en el concreto reforzado, el cual mantiene una capa oxidada en su superficie, que es estable termodinámicamente y protege el metal de la corrosión (pasivación). Sin embargo, el dióxido de carbono CO_2 que difunde en el concreto modifica las condiciones alcalinas de la solución presente en los poros del concreto (reacciones de neutralización o carbonatación) y, como consecuencia, la superficie metálica pierde la capa de protección (despasivación), ver por ejemplo Tuuuti [Tut82]. Sobre este tema, muy importante para poder predecir la degradación de las propiedades mecánicas y la durabilidad de una estructura civil, existen en literatura diversos trabajos publicados. Una serie de artículos de referencia sobre el proceso de carbonatación han sido publicados por el grupo de investigación ligado al autor Papadakis [Pap89], [Pap91], [Pap91a], [Pap91b], [Pap92a], [Pap92b]. En particular en [Pap89] se estudia el efecto de la dimensión de los poros y de la humedad, de la difusividad del CO_2 en el concreto carbonatado y de la humedad relativa. En [Pap92a] se analiza la carbonatación del cemento puzolánico mientras en [Pap92b] se brinda un estudio de la evolución temporal de la carbonatación en concretos y morteros. La dependencia de la velocidad de carbonatación del silicato cálcico hidratado (gel C-S-H) presente en el concreto con la presión de CO_2 ha sido objeto de estudio, en particular Hyvert *et al.* [Hyv10] demuestran que la cinética del proceso depende de la presión parcial de este gas. Un trabajo experimental para estudiar el efecto de la concentración de CO_2 y humedad relativa se debe a Zhiguon y Ri [Zhi13] que implementan un proceso de carbonatación acelerada en laboratorio. También mediante pruebas aceleradas Chi *et al.* [ChJ02] evalúan los efectos de la carbonatación sobre propiedades mecánicas y durabilidad del concreto y concluyen que la carbonatación puede, en algunos casos, aumentar la resistencia a compresión del concreto. Recientemente ha sido publicado un análisis estadístico interesante sobre la velocidad de carbonatación del concreto a partir de datos publicados en literatura [Hil15] con el propósito de brindar un modelo de previsión de la carbonatación de concretos.

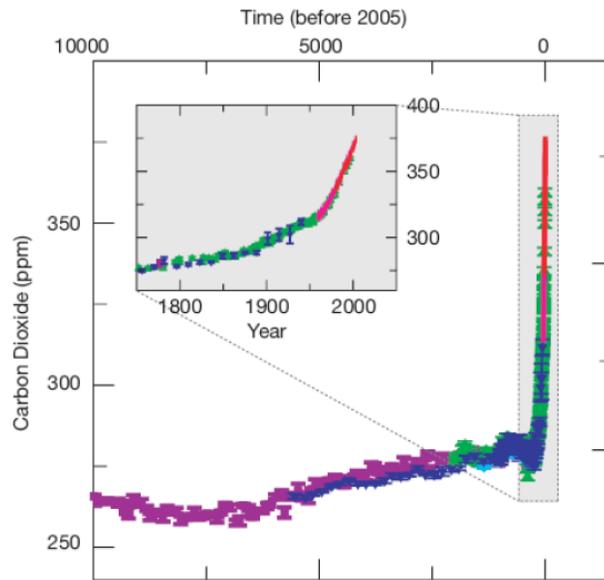


Figura 6.2. Aumento en los años del CO_2 atmosférico (año 0 es el 2005).



Figura 6.3. Carbonatación del concreto y consecuente descamado.

6.6. Cámara de carbonatación

Las cámaras de carbonatación tienen la finalidad de estudiar el proceso de carbonatación que ocurre en los cementos y concretos hidráulicos, simulando ambientes de exposición de concentraciones de humedad relativa y CO_2 controladas.

Como este fenómeno es lento, se construyen cámaras que permitan aumentar la concentración de CO_2 y realizar ensayos en tiempos más cortos; las concentraciones usuales en la atmosfera natural (variable con el tipo de atmosfera en que se encuentra) pueden ubicarse en aproximadamente 0,03% en volumen [Cha10], por lo que se requerirían años para realizar los estudios de un determinado concreto. Es así como muchas investigaciones se realizan a diferentes porcentajes de CO_2 , que pueden ir desde porcentajes de 3% (100 veces mayor que las concentraciones naturales) hasta valores de 10% y valores de 50% [Pha13].

Otro de los aspectos importantes a controlar en la carbonatación es la humedad relativa a la que se exponen los especímenes, siendo la humedad recomendada entre 50 y 70%, ya que de esta forma se logra que el proceso se lleve a cabo por la presencia de la fase húmeda. Si es muy alta se obstruyen los poros y no hay transporte del CO_2 y si es poca, no hay la suficiente humedad, para que se disuelva el hidróxido de calcio y luego se produzca la precipitación del CaCO_3 [Tal12].

Otro registro que puede ser importante de integrar en una cámara, según la experimentación que se quiera realizar, es el de la temperatura. Para algunos estudios esta variable se mantiene en un rango establecido o por lo menos se tiene monitoreo de como varía esta con el tiempo.

Para lograr las condiciones idóneas de experimentación las cámaras deben ser herméticas, con solamente una ventilación que permita mantener las condiciones establecidas, mediante un flujo continuo de CO_2 . También adicionarles sistemas de humectación mediante mezclas de aire húmedo y aire seco para mantener la humedad en los rangos controlados.

6.7. Sistema de control

El sistema de control de la cámara de carbonatación tiene como objetivo el de controlar tanto la concentración de CO_2 como la humedad relativa dentro de un rango de valores deseados. Además, tiene que monitorear la temperatura a la que se desarrolla el proceso.

Para lograr este objetivo, se usan sensores capaces de monitorear, en tiempo real, la concentración de CO_2 , el porcentaje de humedad relativa y el valor de la temperatura dentro de la cámara. Además se debe recurrir a válvulas con la capacidad de variar su apertura y cierre y por lo tanto de cambiar la cantidad de flujo de gas que dejan pasar, lo cual se basa en un control automático relacionado con el uso de motores eléctricos. Finalmente se adoptan configuraciones de control electrónico, sustancialmente con microcontroladores y reguladores de corriente, capaces de gestionar el sistema computacional y eléctrico propio de la lógica de control a implementar.

Disponiendo de los diferentes componentes de hardware del sistema de control, luego se diseña e implementa una lógica secuencial de control haciendo uso de un ambiente de programación que debe responder a las necesidades de la cámara de carbonatación.

6.8. Ensayos de medición de carbonatación

La carbonatación implica la transformación de algunos componentes de los cementos, como el hidróxido del calcio o la Anortita en carbonatos de calcio (CaCO_3), esto trae consigo una disminución de la basicidad del concreto y por consiguiente una pérdida en la pasividad del acero estructural que refuerza en concreto, produciéndose corrosión en el mismo. Este es uno de los principales problemas que acarrea el proceso de carbonatación. Por lo tanto, uno de los ensayo clásicos, para la determinación de la carbonatación, es el ensayo colorimétrico con fenolftaleína al 1%. Este indicador cambia de coloración de violeta a transparente cuando el pH (Fig. 6.4) se encuentra en un valor cercano a 9, lo que es un signo de que el concreto se encuentra carbonatado ya que las condiciones normales el concreto está en un pH de 12-13. [Cha15].

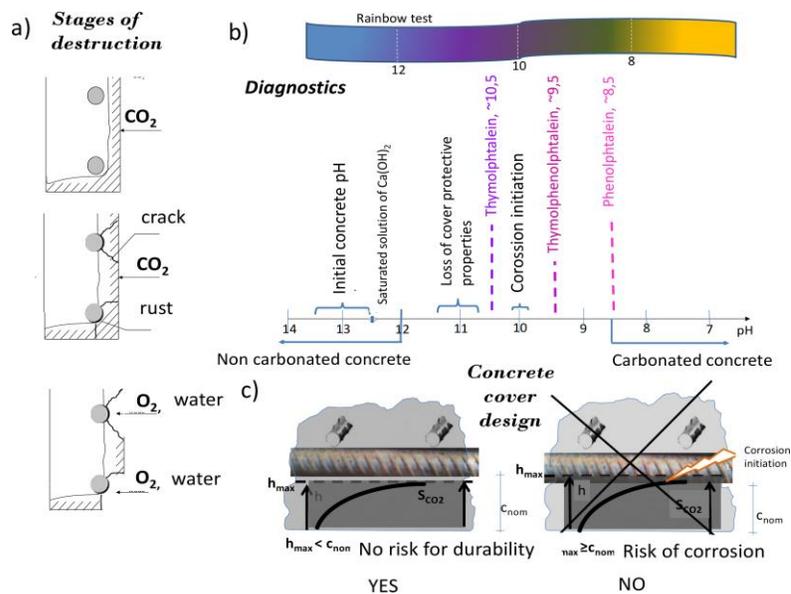


Figura 6.4 Efecto de la variación de pH en la carbonatación del concreto. Fuente: [Cha15].

Para la determinación de la composición química de cualquier compuesto cristalino que se forme durante todas las etapas de curado y transformación de los concretos, se suele usar la difracción de Rayos X. Esta técnica es de la más precisas y se basa en la ley de Bragg (Fig. 6.5); el ensayo consiste en hacer interactuar un haz de rayos x sobre la superficie del material en estudio, y determinar los ángulos a los cuales difracta esa radiación; al ir variando los ángulos se establece un gráfico donde se establecen los ángulos difractados versus la intensidad de esa radiación; la ley de bragg establece una relación entre los ángulos y las distancias interplanares y que es característico de cada compuesto lo que permite determinar la composición de este, su estructura cristalina, entre otros sinnúmeros de informaciones importantes en el estudio de materiales.

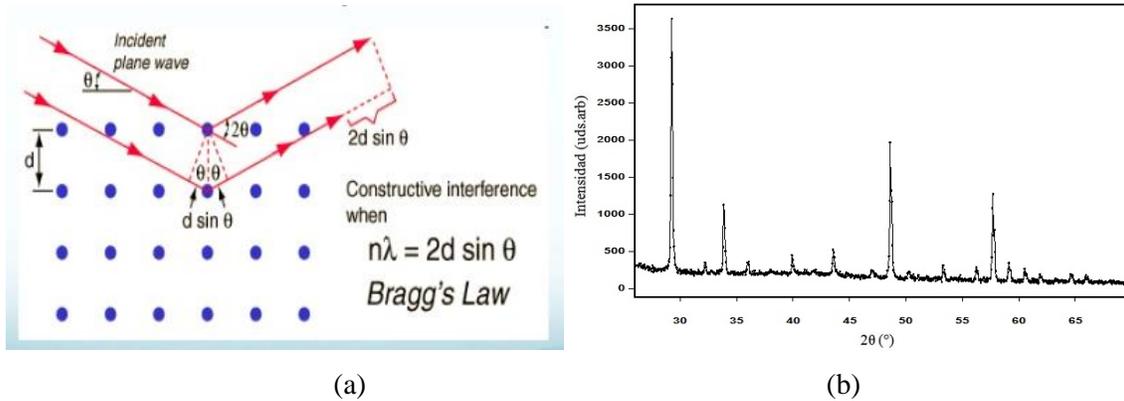


Figura 6.5. Técnica de difracción de rayos X (a) ley de Bragg (b) Difractograma de análisis con intensidad en la vertical vs ángulo de difracción en la horizontal.

Otra de las técnicas usadas para la identificación de los componentes formados durante la carbonatación, son los ensayos termogravimétricos (TGA). Estos análisis se realizan determinando la variación de masa de una muestra al variar la temperatura (ver Fig. 6.6). La pérdida de masa en los concretos se relaciona con las reacciones de deshidratación, la pérdida de agua químicamente adherida, y la pérdida del monóxido de carbono en el caso de los carbonatos. Con esta información se puede construir gráficos donde se establece a que temperatura se producen las pérdidas de masa y que están relacionadas con componentes específicos de los concretos

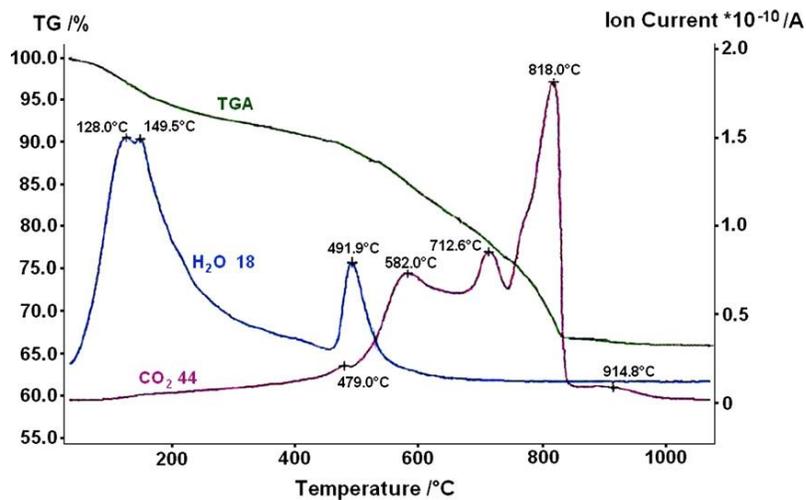


Figura 6.6. Gráfico de pérdida de masa de un análisis termogravimétrico. Fuente: [Pha13]

Los análisis con espectroscopia infrarroja, en particular por transformadas de Fourier, es otra de técnicas utilizadas con la idea de identificar los compuestos que se presentan en un proceso de carbonatación. Esta técnica se basa en hacer incidir una radiación infrarroja sobre la muestra, en esta una parte es absorbida y otra atraviesa la misma, de esto obtenemos un espectro que es característico del material que está bajo examen, como una huella del material. En la Fig. 6.7 se muestra el esquema del principio en el que se basa la espectroscopia infrarroja, así como un gráfico donde se observa la variación en las longitudes de onda al darse variaciones en los enlaces de las moléculas. En la Fig.6.8 más específicamente se muestra un análisis de especímenes de probetas carbonatadas y como varia la intensidad de la señal con una mayor presencia de carbonato de calcio.

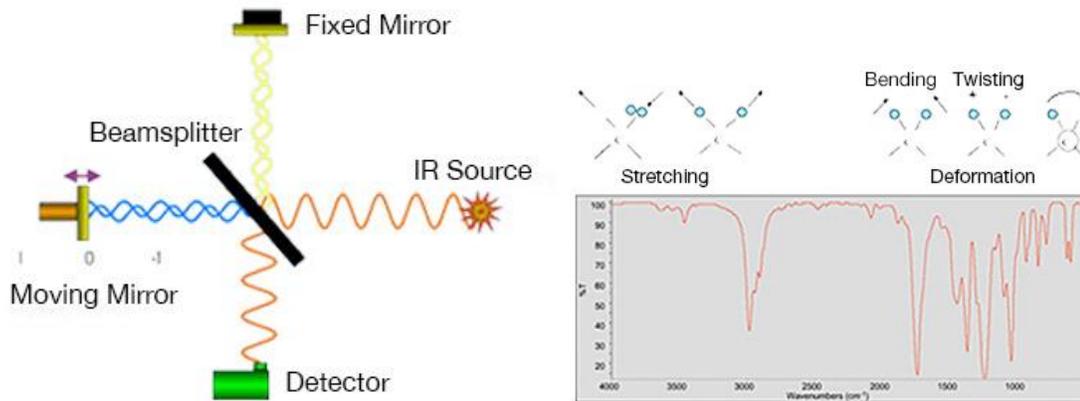


Figura 6.7. Esquema de funcionamiento de un analizador FTIR (a) y el gráfico obtenido de una muestra (b) [The18]

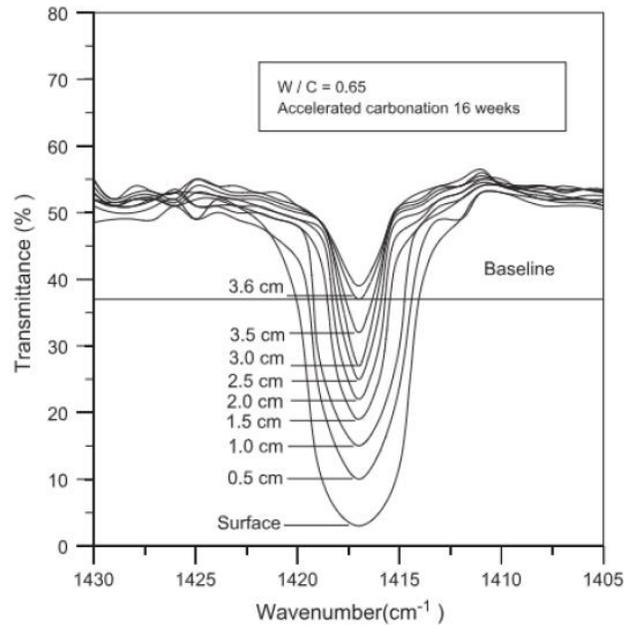


Figura 6.8 Espectroscopia de una muestra carbonatada a diferentes profundidades

6.9. Técnicas experimentales y de END mediante gamma scanning (GS) y rayos x (XR)

Los ensayos no destructivos (END) representan una metodología muy poderosa para el estudio y la caracterización de los materiales, permitiendo explorar y recabar informaciones a nivel micro-, meso- y macro-

scopico [Bab04], [Sal10]. En la técnica de gamma scanning” (GS) [Cha07], [Var05] se emplea una fuente de emisión de radiación gamma con la intensidad suficiente para atravesar el material. La fuente se coloca en un lado del material o pieza a estudiar, mientras que en el otro extremo se instala un detector de radiación de alta sensibilidad con la función de registrar la intensidad de la radiación que es capaz de “emerger” en esta extremidad del material. El registro de las intensidades en los diferentes puntos de interés de la pieza permite construir un perfil de intensidades en estos puntos [Bru02], [Con08], que se puede sucesivamente poner en relación con la densidad. En cambio con la técnica de rayos x (RX) [Asm02], [Gar90] es posible obtener imágenes del volumen completo de materiales celulares. Con este método se puede medir cuantitativamente la densidad radiográfica (grado de oscurecimiento) en los diferentes puntos a estudiar y con ello establecer una correlación entre la densidad radiográfica alcanzada y la densidad del material. La fuente emisora de la radiación necesaria para obtener las imágenes se gradúa con potenciales y corrientes muy pequeñas, usando tubos de rayos x que puedan regularse dentro de un amplio rango de diferencias de potencial y de corriente.

En el caso del concreto Harland [Har66], en un trabajo pionero de hace 50 años, aplica radiación gamma para medir variaciones de densidad en núcleos, cubos y vigas de concreto. Más recientemente Özturk *et al.* [Ozt03] usan ultrasonido y determinan variaciones espaciales de densidad y módulo de Young en especímenes de diferentes tipos de concreto. Aplicaciones de técnicas con gamma scanning (GS) son desarrolladas por Villain *et al.* [Vil07] para la determinación de perfiles de carbonatación en el concreto, midiendo variaciones espaciales de densidad que es función de la energía de radiación absorbida por el medio. También Sharma *et al.* [Sha11] usan radiación gamma para investigar la variación de la densidad de estructuras de concreto en presencia de defectos. Chinè [Chi09] ha investigado las técnicas no destructivas empleadas en materiales compuestos y celulares, concluyendo que las diferentes técnicas con rayos x son entre las pocas que pueden dar beneficio en la caracterización de materiales celulares, debido a la compleja estructura de estos materiales.

6.10. Modelación del proceso de carbonatación

Un trabajo de modelación, validado por investigación experimental con ensayos en cámara de carbonatación acelerada, ha sido desarrollado por Papadakis *et al.* [Pap91a] los cuales modelan los mecanismos principales controlantes el proceso físico-químico de carbonatación. Mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales, resueltas numéricamente, los autores describen la difusión de CO_2 en la fase gaseosa de los poros del concreto y su sucesiva disolución en la misma fase, la disolución del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la fase acuosa de los poros y su transporte difusivo y finalmente el sistema de reacciones químicas de carbonatación entre las especies interesadas. Liang *et al.* [Lia02] añaden al modelo físico-químico un método estadístico para estimar algunos parámetros del modelo y poder predecir la profundidad de carbonatación de estructuras reales. Jaśniok y Zybura [Jaś09] representan el mecanismo electroquímico de realcalización basado en relaciones entre flujo de iones en la solución de los poros, campo eléctrico y reacciones químicas y emplean datos experimentales para simplificar el modelo, obteniendo una solución numérica del modelo matemático. El transporte difusivo de O_2 y su modelación en medios porosos, en ámbito de problemas de corrosión originada por cloruros y durabilidad del concreto reforzado, es propuesto por Hussein e Iishida [Hus10]. Mediante el método de elementos finitos los autores desarrollan un modelo del transporte de oxígeno y lo acoplan a la corrosión de las varillas de acero, con el objeto de investigar las reacciones de corrosión controladas por este gas y el papel de su concentración en el proceso de corrosión. Kwon y Song [Kwo10] incorporan un algoritmo de redes neuronales al modelo físicoquímico de carbonatación, estimando el coeficiente de difusión del CO_2 a partir de datos experimentales, considerando diferentes valores de relación agua/cemento, humedad relativa y el cambio de porosidad causado por la carbonatación misma. Aplicaciones de la modelación multifísica para estudiar la corrosión inducida por

la difusión de cloruros, usando el software de elementos finitos Comsol Multiphysics, se deben a diversos autores ([Gho09], [Luy12], [Ben13], entre otros). Ghods *et al.* ([Gho09]) modelan y simulan el transporte de los agentes corrosivos y el sistema de reacciones electroquímicas para investigar la corrosión del refuerzo metálico del concreto y la influencia de las condiciones superficiales del metal. Por otro lado, el aspecto interesante de los trabajos de los otros dos autores [Luy12], [Ben13], se relaciona con el uso de reconstrucciones microestructurales de muestras de concreto, a partir de datos de tomografía con rayos X computarizada. Los datos topográficos se usan con el propósito de proporcionar un modelo más realístico del medio poroso que incluya el sistema de grietas causadas por la misma corrosión del concreto. La misma técnica tomografía es usada por Piller *et al.* [Pil09] para estimar el tensor que describe la permeabilidad de un medio poroso. Los autores usan técnicas de análisis de imágenes y simulación numérica directa para validar los resultados. Finalmente, diversas aplicaciones de la modelación computacional para el caso de la corrosión del concreto se han desarrollado recientemente, por ejemplo para estudiar la carbonatación originada por el CO₂ que se encuentra en el estado termodinámico supercrítico [Zha15], para la modelación de la difusión iónica en materiales cementicios [Arn13] y para la investigación de la absorción capilar de agua en el concreto, en este caso representando el material como un compuesto heterogéneo de partículas (agregado) colocadas aleatoriamente en el medio poroso [Deh14].

6.10.1. Hipótesis del modelo de carbonatación del concreto.

De acuerdo a la investigación teórica, el problema físico-químico de la carbonatación del concreto representa un típico proceso de flujo reactivo –difusivo, donde fundamentalmente una especie química gaseosa A (CO₂) penetra un medio poroso no-saturado a través de la fase gaseosa de los poros y se disuelve rápidamente en el agua de los poros. En la fase acuosa, la especie química CO₂ reacciona velozmente con una segunda especie B allí presente, que es el Ca(OH)₂, el cual proviene de la matriz solida del medio mediante un proceso de disolución. La reacción química entre las dos especies CO₂ y Ca(OH)₂ origina H₂O y una tercera especie C (CaCO₃), la cual precipita sobre las paredes de la matriz porosa. Básicamente, el proceso se puede describir mediante la siguiente reacción:



La velocidad del proceso de carbonatación depende crucialmente de la difusividad efectiva del CO₂ en los poros del concreto carbonatado y ha sido demostrado que tiene vinculación con la relación agua/cemento y con los agregados del concreto. Los mecanismos físico-químicos del proceso difusivo-reactivo de carbonatación incorporan usualmente cambios en el volumen de los poros, inducidos por la disolución del Ca(OH)₂ y precipitación del CaCO₃.

Para el desarrollo del trabajo de modelación de la carbonatación, se considera un medio poroso de volumen V y frontera ∂V . En este volumen se selecciona un volumen elemental de referencia homogéneo Ω y frontera $\partial\Omega$, donde los volúmenes de los poros y de la matriz solida son respectivamente Ω_p y Ω_s . Luego se definen la porosidad $\phi = \frac{\Omega_p}{\Omega}$ del medio poroso y la fracción de sólidos $\phi_s = \frac{\Omega_s}{\Omega} = \frac{\Omega - \Omega_p}{\Omega} = 1 - \phi$. Las correspondientes fracciones de gas y agua en el volumen Ω_p de los poros son respectivamente $\phi_g = \frac{\Omega_g}{\Omega_p}$ y $\phi_w = \frac{\Omega_w}{\Omega_p}$ (valor de saturación de agua), donde Ω_g representa el volumen de gas de los poros y Ω_w el volumen de agua de los poros. Siendo $\Omega_g + \Omega_w = \Omega_p$ resulta ser:

$$\phi_g + \phi_w = 1 \quad (6.9)$$

De acuerdo a las definiciones anteriores, se tiene además que:

$$\phi\phi_w = \frac{\Omega_p}{\Omega} \frac{\Omega_w}{\Omega_p} = \frac{\Omega_w}{\Omega} \quad (6.10)$$

y

$$\phi\phi_g = \frac{\Omega_p}{\Omega} \frac{\Omega_g}{\Omega_p} = \frac{\Omega_g}{\Omega} \quad (6.11)$$

6.10.2. Conservación de la masa

Primeramente se aplica el principio de la conservación de masa para el flujo reactivo-difusivo del proceso de carbonatación, es decir la conservación de la masa de una especie en un sistema cerrado. En este caso, el cambio de masa de una especie en un el volumen elemental de referencia Ω debe ser igual a la masa que es creada/destruida más el flujo neto de masa a través de las paredes de Ω . Ahora si la masa de una especie se considera presente solo en los poros, luego esta será igual a:

$$\int_{\Omega} \phi\rho \, d\Omega = \int_{\Omega} \frac{\Omega_p}{\Omega} \frac{m}{\Omega_p} \, d\Omega \quad (6.12)$$

que da así la masa en Ω . Sucesivamente el cambio en el tiempo de la masa en Ω es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \phi\rho \, d\Omega \quad (6.13)$$

En cambio, la cantidad de masa que se crea/destruye en el volumen de referencia es:

$$\int_{\Omega} Q \, d\Omega \quad (6.14)$$

donde Q es la masa creada por unidad de volumen y tiempo. Finalmente, el flujo de masa neto a través de las paredes de Ω es:

$$\int_{\partial\Omega} (\rho\mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} \, dS \quad (6.15)$$

donde \mathbf{n} es la normal a la superficie $\partial\Omega$ y dirigida hacia afuera y \mathbf{v} es la velocidad del fluido. Por lo tanto, el principio de conservación de la masa en el volumen elemental de referencia, siendo t el tiempo, está dado por la ecuación siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \phi\rho \, d\Omega = - \int_{\partial\Omega} (\rho\mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} \, dS + \int_{\Omega} Q \, d\Omega \quad (6.16)$$

Introduciendo el signo de derivada en la integral, aplicando el teorema de la divergencia y arreglando, se obtiene:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} (\phi\rho) \, d\Omega + \int_{\Omega} \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}) \, d\Omega - \int_{\Omega} Q \, d\Omega = 0 \quad (6.17)$$

Es decir:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) - Q \right) d\Omega = 0 \quad (6.18)$$

Como el volumen de referencia es arbitrario, el término integrando debe anularse, así:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) - Q = 0 \quad (6.19)$$

que representa la ecuación diferencial de conservación de masa de una especie en el volumen de referencia Ω .

6.10.3. Expresión de la velocidad para el flujo en medio poroso

Seguidamente se debe expresar la velocidad \mathbf{v} para el proceso de flujo en el medio poroso. Como el proceso de flujo reactivo-difusivo del proceso de carbonatación se desarrolla en la fase acuosa, se desprecia el movimiento convectivo del gas y se emplea la ley de Darcy para el solo flujo de agua, con la cual:

$$\mathbf{v} = -\frac{K_S}{\mu} (\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \quad (6.20)$$

siendo K_S la permeabilidad del medio, p_w la presión del agua, \mathbf{g} la aceleración de gravedad, μ y ρ respectivamente la viscosidad y la densidad del agua. Para un volumen de medio poroso homogéneo e isotrópico K_S es una cantidad escalar y constante. Debido a la presencia de la fase gaseosa en el medio poroso, se introduce una permeabilidad efectiva K , definida como:

$$K = k(\phi_w) K_S \quad (6.21)$$

donde $k(\phi_w)$, que representa la permeabilidad relativa de la fase acuosa, depende del grado de saturación ϕ_w . Sustituyendo en la Ec. (6.20) se obtiene:

$$\mathbf{v} = -\frac{k(\phi_w) K_S}{\mu} (\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \quad (6.22)$$

En el caso que la ecuación de conservación de masa anterior (6.19) se aplique para la sustancia agua, se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \phi_w \rho_w) + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{v}) - Q = 0 \quad (6.23)$$

y usando la Ec. (6.22):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \phi_w \rho_w) - \nabla \cdot \left(\rho_w \frac{k(\phi_w) K_S}{\mu} (\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \right) - Q = 0 \quad (6.24)$$

Finalmente, si la densidad del agua ρ_w es constante, la ecuación de conservación de la masa del agua es:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\phi_w) - \nabla \cdot \left(\frac{k(\phi_w)K_s}{\mu} (\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \right) - \frac{Q}{\rho_w} = 0 \quad (6.25)$$

6.10.4. Ecuaciones de transporte para el flujo reactivo-difusivo

En el proceso de carbonatación del concreto, además de las ecuaciones de conservación de la masa de agua, se deben satisfacer las ecuaciones de transporte para el flujo reactivo-difusivo de las especies químicas involucradas. Para una especie química de concentración $u(x, t)$, la conservación de la conservación de la masa en un volumen de control se obtiene con un procedimiento similar al de la Ec. (6.19), siendo:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} - Q = 0 \quad (6.26)$$

con $\mathbf{J} = \mathbf{J}_D + \mathbf{J}_C$ el flujo de masa difusivo-convectivo de la especie química y Q representando ahora la fuente de masa de la especie química. En el modelo de carbonatación, se asuenen en fase acuosa fenómenos de tipo convectivo-difusivo, mientras que en fase gaseosa se consideran fenómenos puramente difusivos, habiendo despreciado el movimiento del gas. Para soluciones diluidas en un problema unidimensional en dirección x , el flujo de masa difusivo \mathbf{J}_D de una especie se puede obtener de la ley de Fick, por lo tanto:

$$\mathbf{J}_D = -D \nabla u \quad (6.27)$$

donde D es el coeficiente de difusión de la especie en la fase considerada (agua o gas). En el caso del transporte convectivo de la especie de concentración u , se define la componente convectiva del flujo de masa \mathbf{J}_C como:

$$\mathbf{J}_C = \mathbf{v}u \quad (6.28)$$

Usando las definiciones de las Ecs. (6.27) y (6.28), el balance de masa de la especie química considerada, será entonces:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla u + \mathbf{v}u) - Q = 0 \quad (6.29)$$

6.10.5. Ecuaciones diferenciales de transporte del modelo de carbonatación.

Para describir el proceso de flujo reactivo –difusivo de la carbonatación del concreto en un medio poroso homogéneo, que regula la reacción química descrita por la Ec. 6.8, se deben aplicar primeramente las ecuaciones de conservación del párrafo anterior a las especies CO_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, H_2O y CaCO_3 . Sucesivamente, en la sección 6.10.6 se explicitarán los términos fuente/sumidero que acoplan la reacción química.

Se definen con A ($= \text{CO}_2(\text{aq})$) las concentraciones de CO_2 en fase acuosa y con a ($= \text{CO}_2(\text{g})$) en fase gaseosa, con B y b las concentraciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en fase acuosa ($= \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq})$) y sólida ($= \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$) y con C ($= \text{CaCO}_3(\text{aq})$) y c ($= \text{CaCO}_3(\text{s})$) las concentraciones de CaCO_3 respectivamente en fase acuosa y sólida. Luego, expresando por ejemplo la concentración A en mol/m^3 , la cantidad $\phi\phi_w A$ (también en mol/m^3) representa el

número de mol de A en el volumen de control constituido por los poros más la matriz sólida. A partir de la Ec. 6.29, se obtienen las ecuaciones de transporte difusivo-convectivo de las tres especies químicas A, B y C en fase acuosa:

$$\frac{\partial(\phi\phi_w A)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_A \phi \phi_w \nabla A + \mathbf{v}A) = F_A \quad (6.30)$$

$$\frac{\partial(\phi\phi_w B)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_B \phi \phi_w \nabla B + \mathbf{v}B) = F_B \quad (6.31)$$

$$\frac{\partial(\phi\phi_w C)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_C \phi \phi_w \nabla C + \mathbf{v}C) = F_C \quad (6.32)$$

donde F_A , F_B y F_C , representan los términos fuente/sumidero de masa por unidad de volumen de las especies químicas $\text{CO}_2(\text{aq})$, $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq})$ y $\text{CaCO}_3(\text{aq})$, respectivamente.

En el caso del H_2O la ecuación del transporte es la Ec. 6.25, obtenida sustituyendo la velocidad \mathbf{v} (en m/s) (o definida como flujo \mathbf{v} en $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) mediante la Ec. 6.22. Ahora si se introducen la fuerza gravitacional y la permeabilidad relativa, sustituyendo en la Ec. 6.22 se obtiene [Rad13]:

$$\mathbf{v} = -\phi k(\phi_w) K_S \nabla(p + z) \quad (6.33)$$

de tal manera que la nueva expresión de la Ec. 4.18 es:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi\phi_w) - \nabla \cdot (\phi k(\phi_w) K_S \nabla(p + z)) - \frac{Q}{\rho_w} = 0 \quad (6.34)$$

6.10.6. Ecuaciones diferenciales de transporte acopladas a las reacciones químicas

Los términos F_A , F_B , F_C y Q de las ecuaciones diferenciales anteriores representan los términos fuente/sumidero de masa por unidad de volumen de las especies químicas $\text{CO}_2(\text{aq})$, $\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{aq})$, $\text{CaCO}_3(\text{aq})$ y H_2O respectivamente. Estas cantidades engloban la velocidad de producción de la especie γ_i debida a la reacción química y la tasa de intercambio Q_i de la especie entre las diversas fases del volumen del medio poroso. Por lo tanto, las magnitudes γ_i acoplan las reacciones químicas a los fenómenos de difusión en el medio poroso. Siendo que para la reacción química de la Ec. 6.8, la velocidad de reacción es proporcional a las concentraciones de CO_2 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$:

$$\gamma = r [\text{CO}_2]^x [\text{Ca}(\text{OH})_2]^y \quad (6.35)$$

siendo r la constante cinética. La reacción se desarrolla en la fase acuosa del medio poroso, por lo tanto la velocidad de reacción es:

$$\gamma = r \phi \phi_w [\text{CO}_2]^x [\text{Ca}(\text{OH})_2]^y \quad (6.36)$$

donde, por la Ec. 6.10, $\phi\phi_w = \frac{\Omega_w}{\Omega}$ representa la relación entre el volumen agua y el volumen total. Además, las velocidades de producción de cada componente i de la reacción se pueden expresar como $\gamma_i = \sigma_i m_i \gamma$, luego:

$$\gamma_i = \sigma_i m_i r \phi\phi_w [CO_2]^x [Ca(OH)_2]^y \quad (6.37)$$

con σ_i y m_i , respectivamente el coeficiente estequiométrico de la reacción y la masa molecular del componente. Siendo la ecuación balanceada, resulta $\sigma_i=1$ para cada componente i ; además se asume $x=y=1$.

Dióxido de carbono

Para el transporte solo difusivo de CO_2 en aire:

$$\frac{\partial(\phi\phi_g a)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_a \phi\phi_g \nabla a) = Q_a \quad (6.38)$$

como el CO_2 se transfiere de la fase gaseosa a la acuosa, la cantidad Q_a es un sumidero para la Ec. 6.38, mientras $Q_A = Q_a$ es una fuente para la Ec. 6.30. Además, tomando en cuenta el consumo (sumidero) de CO_2 en la reacción de carbonatación, es decir usando la Ec. 6.37, la misma Ec. 6.30 se modifica en:

$$\frac{\partial(\phi\phi_w A)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_A \phi\phi_w \nabla A + \mathbf{v}A) = Q_A - m_A r \phi\phi_w A B \quad (6.39)$$

Aplicando la ley de Henry para el equilibrio gas-líquido del CO_2 , se tiene que la solubilidad del gas en el líquido es $c = H p$, donde c es la concentración molar del gas disuelto, H es la constante de Henry y p la presión parcial del gas. Siguiendo el trabajo de Radu *et al.* [Rad13], los términos anteriores se pueden expresar como:

$$Q_A = Q_a = P(H\phi\phi_w A - \phi\phi_g a) \quad (6.40)$$

Luego sustituyendo en las Ecs. 6.38 y 6.39 se obtienen las siguientes ecuaciones de transporte para el CO_2 :

$$\frac{\partial(\phi\phi_g a)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_a \phi\phi_g \nabla a) = P(H\phi\phi_w A - \phi\phi_g a) \quad (6.41)$$

$$\frac{\partial(\phi\phi_w A)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_A \phi\phi_w \nabla A + \mathbf{v}A) = -P(H\phi\phi_w A - \phi\phi_g a) - m_A r \phi\phi_w A B \quad (6.42)$$

Hidróxido de calcio

En la Ec. 6.31 del transporte de $Ca(OH)_2$ en el medio poroso se sustituye la expresión de F_B , la cual debe modelar el consumo (sumidero) de la especie por la reacción de carbonatación y la disolución (fuente) de $Ca(OH)_2$ en la fase acuosa de los poros, es decir:

$$\frac{\partial(\phi\phi_w B)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_B \phi\phi_w \nabla B + \mathbf{v}B) = Q_B - m_B r \phi\phi_w A B \quad (6.43)$$

Para la disolución del hidróxido de calcio de la matriz sólida a la fase acuosa de los poros, se puede recurrir a modelos que consideran la desviación de configuraciones de equilibrio, es decir:

$$Q_B = \phi\phi_w S_{dis}(B_{eq} - B) \quad (6.44)$$

donde S_{dis} es una constante y B_{eq} la concentración de equilibrio. Usando la Ec. 6.44, la ecuación diferencial de transporte del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ acoplada a la reacción química es:

$$\frac{\partial(\phi\phi_w B)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_B \phi\phi_w \nabla B + \mathbf{v}B) = \phi\phi_w S_{dis}(B_{eq} - B) - m_B r \phi\phi_w A B \quad (6.45)$$

En el caso del balance de la especie $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($= b$) en la fase solida del volumen porosos, la cantidad Q_b es ahora un sumidero, por lo tanto la ecuación diferencial de conservación es:

$$\frac{\partial(\phi_s b)}{\partial t} = -\phi_s S_{dis}(B_{eq} - B) \quad (6.46)$$

Carbonato de calcio

Igualmente, para la Ec. 6.32 del transporte del carbonato de calcio, se incorporan las reacciones químicas de carbonatación originada por la presencia de CO_2 y la tasa de intercambio de la especie entre las diversas fases del volumen del medio poroso. Para el balance en fase acuosa, en el primer caso se trata de una fuente y en el segundo caso de un sumidero. Usando la Ec. 6.37, se obtiene:

$$\frac{\partial(\phi\phi_w C)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_C \phi\phi_w \nabla C + \mathbf{v}C) = Q_C + m_C r \phi\phi_w A B \quad (6.47)$$

Para la precipitación del carbonato de calcio, análogamente al caso de la disolución, se considera una tasa de precipitación proporcional a una desviación de valores de equilibrio, es decir:

$$Q_C = \phi\phi_w S_{prec}(C - C_{eq}) \quad (6.48)$$

Recordando que para el balance de CaCO_3 ($= c$) en fase sólida, la precipitación de la especie resulta ser un término fuente, las ecuaciones diferenciales de conservación del carbonato de calcio son:

$$\frac{\partial(\phi\phi_w C)}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_C \phi\phi_w \nabla C + \mathbf{v}C) = Q_C + m_C r \phi\phi_w A B \quad (6.49)$$

$$\frac{\partial(\phi_s c)}{\partial t} = \phi_s S_{prec}(C - C_{eq}) \quad (6.50)$$

respectivamente en la fase acuosa y la fase solida del medio poroso.

7. Metodología

7.1. Revisión bibliográfica

La revisión literaria se realizó mediante la metodología que se presenta a continuación.

Se seleccionaron y se analizaron, por parte de todos los investigadores, trabajos publicados en la literatura científica sobre los mecanismos fundamentales que regulan el proceso de corrosión en el concreto y en particular, el fenómeno de la carbonatación asociada a la corrosión atmosférica. Se hace uso de bases de datos bibliográficas (libros, acta de congreso, revistas científicas de sector, tesis, etc.) disponibles en la Biblioteca del ITCR y material bibliográfico de los investigadores. En este particular, los investigadores de la Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales aportaron documentación especializada sobre el proceso de corrosión *atmosférica*, los de la Escuela de Ing. en Construcción sobre el material *concreto*, y ambos sobre la *carbonatación* que representa el tema científico que enlaza el proceso de corrosión y el material concreto.

De forma paralela se revisó la literatura científica sobre el transporte de los agentes agresivos (CO_2 , H_2O , O_2) en medios porosos, saturados y no saturados, en particular el rol de la porosidad, la presencia de H_2O , la difusión del gas CO_2 en el concreto carbonatado y no carbonatado, y el coeficiente de difusión asociado. Estas magnitudes son muy importantes, ya que el mecanismo de difusión en medio poroso podría controlar el proceso de carbonatación. Se usó bibliografía especializada de la Biblioteca del ITCR (textos, artículos de revistas especializadas, tesis, etc.) y material bibliográfico de los investigadores del proyecto. También se contempla la revisión de material bibliográfico de la Universidad de Trieste, a través de la colaboración de los investigadores del *Dipartimento di Ingegneria e Architettura*.

Respecto al proceso propiamente dicho de carbonatación de concretos, se hace uso de material bibliográfico de la Biblioteca (textos y base de datos), así como material de los investigadores, además de informes de investigación disponibles sobre corrosión atmosférica por carbonatación, cinética de disolución, reacciones químicas de los componentes hidratados del cemento, relativos parámetros y constantes de equilibrio, etc.

Finalmente, con el propósito de completar el estado del arte, se analizaron trabajos científicos sobre la aplicación de técnicas experimentales para la determinación de perfiles de carbonatación en concreto y la documentación técnica existente. También se revisaron métodos computacionales para la modelación y simulación del fenómeno de carbonatación, en particular métodos para el transporte de especies en medios porosos y para la modelación de las reacciones químicas de carbonatación.

Con respecto a las técnicas experimentales se revisaron los métodos de análisis químicos (CA), análisis termogravimétrico (TGA), difracción por rayos X (XRD) y técnicas no destructivas por radiación gamma (GS) y rayos X (XR). Para este fin se considera el análisis de bibliografía especializada (textos, revistas especializadas,

tesis, etc.) de la base de datos de la Biblioteca y propia de los investigadores, manuales de uso de algunos equipos de caracterización, documentación y normativas técnica existentes.

Para el caso de los métodos computacionales se revisa la bibliografía especializada de la base de datos de la Biblioteca (artículos, tesis, datos, etc.), estrategias computacionales, casos simulados de literatura y documentación del software comercial de modelación multifísica Comsol Multiphysics de propiedad de la Escuela de Ciencia e Ing. de Materiales. Más precisamente se revisa la información de los módulos CFD, Heat Transfer, Chemical Reaction Engineering y Corrosion) que se relacionan más directamente con el fenómeno de carbonatación. Finalmente se considera la revisión de material bibliográfico de la Universidad de Trieste, a través de la colaboración de los investigadores del *Dipartimento di Ingegneria e Architettura*, así como de documentación de softwares *open source* que modelan y simulan procesos de difusión –reacción en medios porosos similares a la carbonatación del concreto.

7.2. Elaboración de los especímenes

Para la elaboración de los especímenes cilíndricos de concreto en estudio se realizó la secuencia de actividades que se muestra en la Fig. 7.1

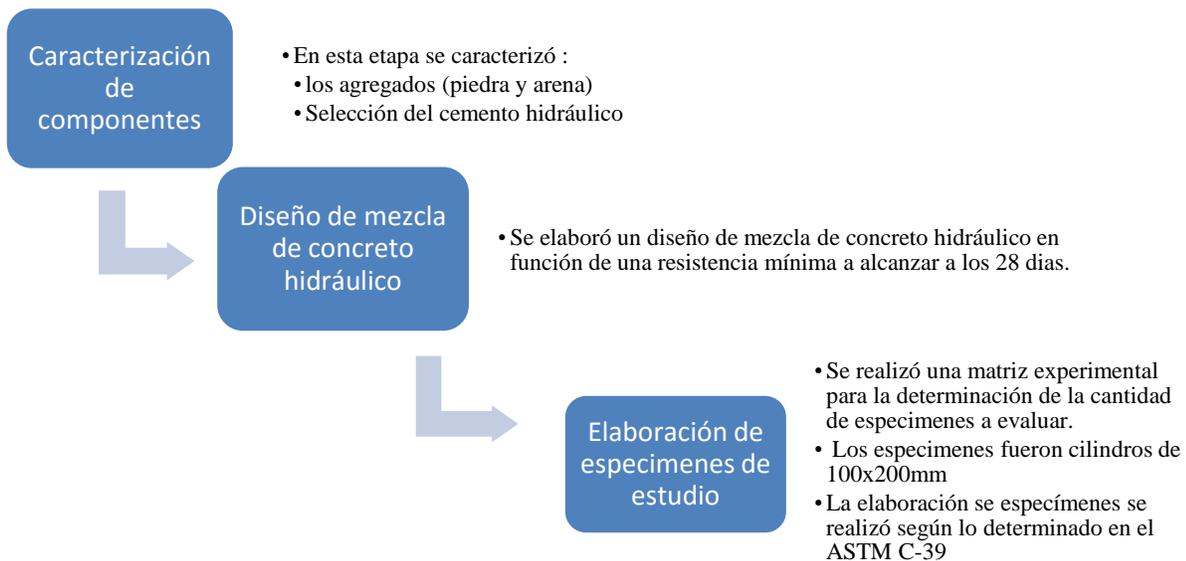


Figura 7.1. Esquema de elaboración de especímenes de concreto hidráulico

7.3. Caracterización de componentes

7.3.1. Caracterización de agregados

Los agregados tanto finos como gruesos (piedra y arena), fueron caracterizados físicamente con la finalidad de obtener los parámetros necesarios para realizar un diseño de mezcla de concreto hidráulico que cumpliera con los requisitos de la presente investigación. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- Ensayo estándar para determinación de la densidad aparente ("Peso unitario") y vacíos en el agregado [Ast17]
- Método de ensayo estándar para Densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso y fino. [Ast15a], [Ast15b]
- Método de prueba estándar para el análisis de tamices para agregados finos y gruesos [Ast14]

7.3.2. Caracterización de material cementicio.

Para la caracterización del material aglutinante (cemento hidráulico), se procedió a solicitar las fichas de control de calidad de dicho material (MP/A-28) y su contenido puzolánico al proveedor; ver apéndice 1

7.4. Diseño de mezcla de concreto hidráulico

El diseño de la mezcla de concreto se basó en lo estipulado en la normativa ACI 211.1, de volúmenes absolutos, donde se determinó una resistencia mínima a compresión a desarrollar por el concreto a los 28 días ($f'c$) de 20,59 MPa (210 kg/cm²). De este diseño se obtuvo las dosificaciones necesarias de cemento hidráulico, arena, piedra y agua (su relación agua cemento (a/c)) en función de la resistencia antes mencionada.

7.5. Elaboración de especímenes de estudio

Para la evaluación del comportamiento del concreto en estudio se realizaron de 200 especímenes cilíndricos de 100 x 200mm de las cuales 60 muestras fueron utilizadas para la investigación y el restante como testigos. Para la elaboración de la totalidad de los especímenes se siguió lo indicado en la "*Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio*" [Ast16]. Una vez terminada la elaboración de los especímenes de concreto, estos permanecieron en cámara húmeda por un periodo de 90 días de curado a una temperatura de 23 ± 2 °C y una humedad relativa superior al 95%, según lo dictamina la normativa supra indicada.

7.6. Desarrollar un sistema experimental de carbonatación acelerada por difusión de CO₂.

7.6.1. Pruebas preliminares

Con el objetivo de conocer y evaluar los métodos de análisis, que posteriormente se usaran en la investigación, se procede a hacer unos ensayos en una pequeña cámara preliminar construida, con un balde y un sistema de humectación y suministro de CO₂.

- a) El suministro de gas se realiza por un periodo de 48 horas sin control de porcentaje suministrado
- b) Se ensayan tres especímenes de los cuales se extraerán las muestras para ensayarlas por medio de fenolftaleína al 1%; extracción de tres puntos en profundidad para ensayos de difracción de rayos x, y TGA.

7.6.2. Diseño y construcción de cámara de carbonatación

Como se mencionó en la introducción, en un inicio se pensó en la posibilidad de adaptar una cámara de corrosión acelerada para la realización de las pruebas, pero al estimar la cantidad de muestras, sobre todo tomando en cuenta que se analizó la posibilidad de aumentar el número de puntos de medición en el tiempo y que permitiera una valorización más precisa de la evolución de la carbonatación, se decidió construir una cámara más específica para la realización de ensayos de carbonatación y que en un futuro pudiese ser utilizada para otro tipo de ensayo de materiales. Para la construcción de la cámara se realizó la siguiente metodología.

- Se estableció el número de especímenes máximos que se pueden exponer, considerando el tamaño, volumen y peso de los mismos, según los requerimientos de la investigación.
- Se diseñó la cámara de forma que pudiese colocarse en el espacio previsto para la misma y que a la vez existiese acceso para la colocación y extracción de las muestras.
- Se seleccionaron los materiales idóneos para realizar la estructura base y el forro, los cuales debían reunir condiciones de resistencia a la corrosión en medios de mediana severidad y que también pudiese tener visibilidad.
- Se construye mediante el método de construcción con soldadura y unión de las láminas por medio de adhesivo y tornillería.
- Se diseña y construye el sistema de humectación para mantener las condiciones de humedad dentro de la cámara.
- Se construye y verifican condiciones de hermeticidad y flujo de gases, a través de la prueba con humo.

7.6.3. Sistema de control de la cámara de carbonatación

La Fig. 7.2 muestra la distribución de los diferentes componentes que deben considerarse, así como la interconexión entre ellos, donde en general los sensores miden primero la variable física de interés, luego transmiten a un microcontrolador que la traduce en un valor representativo de la magnitud física medida y la envía a la unidad de control, que en este caso se implementa en LabVIEW. La unidad de control, de acuerdo

con los valores recibidos, genera así una secuencia lógica que transmite los comandos de control necesarios para que las válvulas regulen el flujo del CO₂, el de aire seco o húmedo para el control de la humedad relativa, con el vínculo de alcanzar y mantener un régimen estable mediante el monitoreo periódico del cambio de las variables medidas.

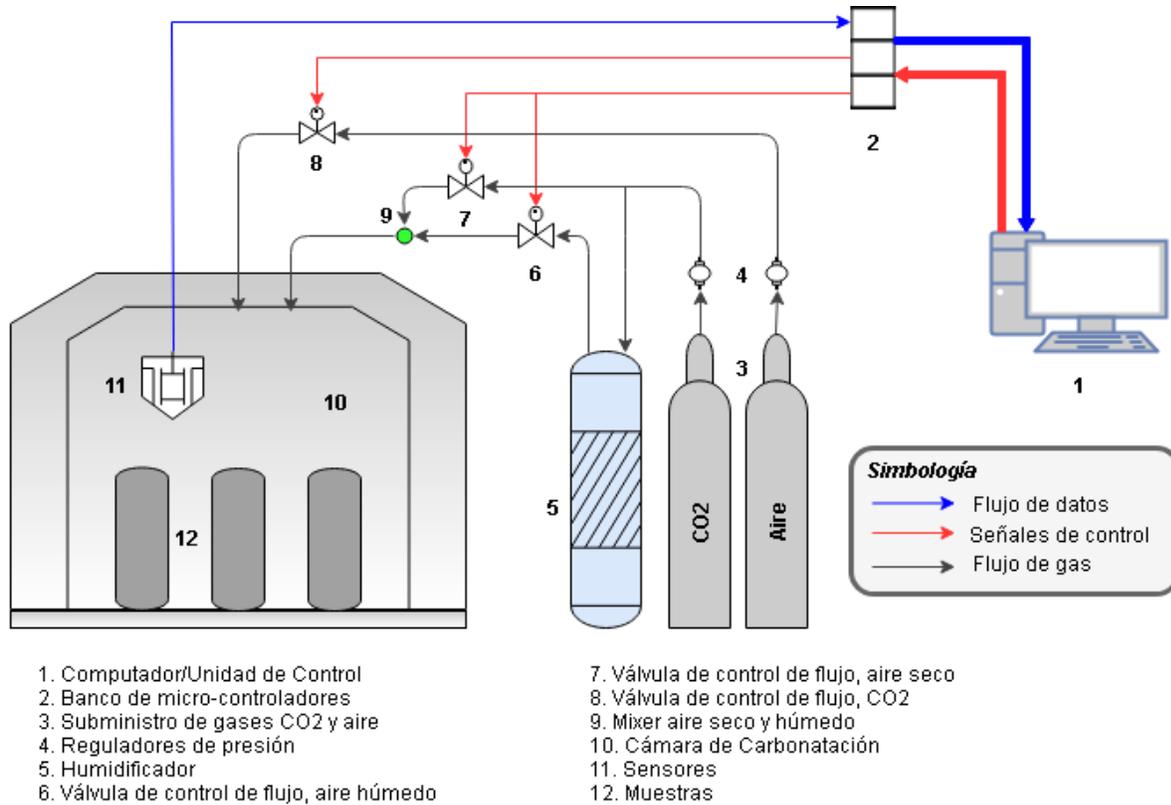


Figura 7.2 Diagrama de los sistemas que componen la cámara de carbonatación

Una vez establecido el esquema del sistema de control, se procedió a búsqueda, selección y adquisición de los componentes necesarios para control del sistema propuesto.

7.7. Campaña experimental

7.7.1. Condiciones de prueba

Los especímenes de ensayo se dividieron en un total de 6 grupos, cada uno formado por 7 especímenes; de los cuales cuatro muestras fueron sometidas a carbonatación y tres como pares para los ensayos mecánicos de control; de las carbonatadas una se usó para estudios químicos y tres especímenes se utilizaron para pruebas mecánicas. Así fueron identificadas con la letra Q (para las que iban para los diferentes análisis) y M para las de ensayos mecánicos, como se observa en la Fig. 7.3. Los tres especímenes restantes (que no serían expuestas a CO₂), se mantendrían para establecer variaciones con respecto al desempeño mecánico entre las muestras carbonatadas y no carbonatadas.

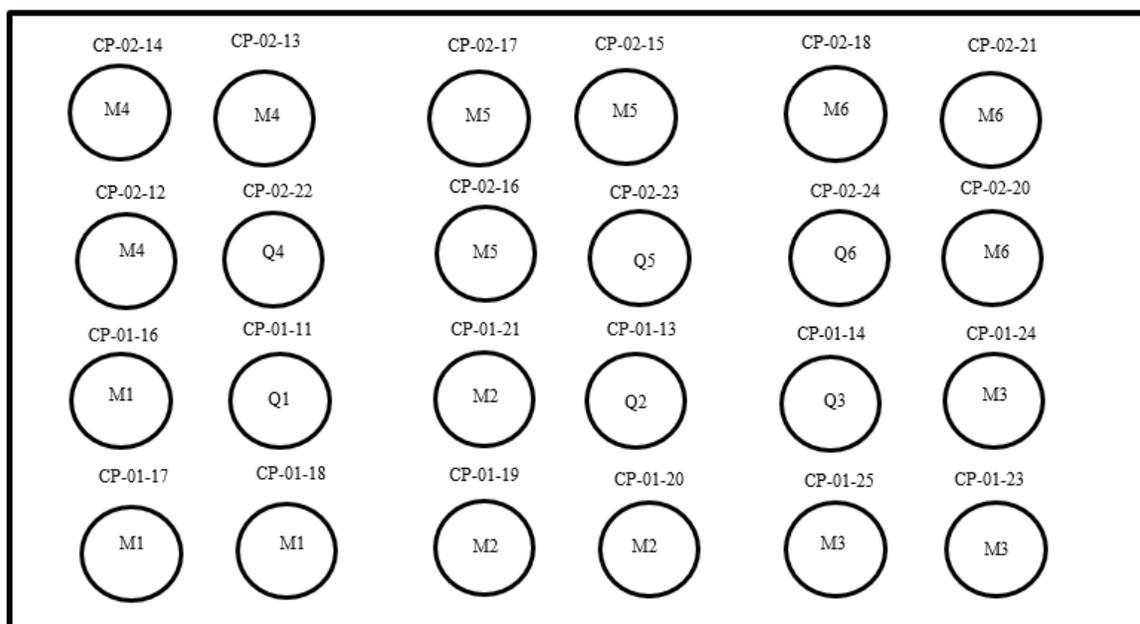


Figura 7.3. Distribución de especímenes en la cámara de carbonatación

Antes de iniciar con el proceso de carbonatación, las muestras se secaron al horno a masa constante a 60°C durante 24 horas y posteriormente, fueron expuestas a humedad relativa de un 65% durante un periodo de 7 días en la cámara de carbonatación. Después de ese periodo de acondicionamiento, las muestras fueron sometidas a carbonatación utilizando una concentración de CO₂ de 25% y se mantuvo las condiciones de humedad relativa a un valor de 65%. Estos valores seleccionados obedecen a las concentraciones estudiadas en función del tiempo para la realización de la campaña experimental. La temperatura no se controló pero se llevó registro a través de toda la campaña experimental.

7.7.2. Extracción y preparación de muestras para análisis

El plan de extracción de los especímenes se muestra en la Tabla 7.1. Este se estableció al estudiar la variación de la profundidad de penetración del CO₂ en el concreto en estudio, en función del tiempo.

Tabla 7.1 Extracción de muestras

Grupo	1	2	3	4	5	6
Días de exposición	2	4	8	16	28	44

Posterior a la extracción de las especímenes, las asignadas para análisis químico, fueron cortadas cuidadosamente transversalmente en discos como se muestra en la Fig. 7.4

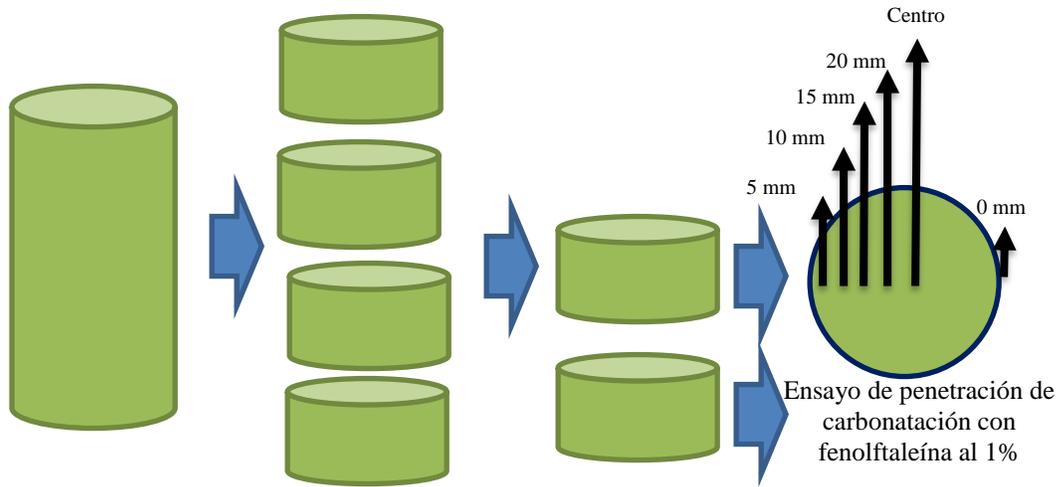


Figura 7.4. Extracción de muestras carbonatadas y sin carbonatar para ensayos químicos

A uno de los discos centrales se les sacaron muestras en la parte externa, y a 5, 10, 15, 20 milímetros y en la parte central (según el grado de carbonatación mostrado en la prueba de fenolftaleína). Las muestras se obtuvieron por perforación y extrayendo en varios puntos circunferenciales a la misma distancia. Estas fueron molidas con mortero y homogenizadas (ver Fig.7.5), para luego ser cuidadosamente almacenadas en bolsas plásticas e identificadas, para posteriormente enviarlas a análisis difractométrico y análisis por TGA.



Figura 7.5 Extracción y preparación de las muestras para análisis difractométrico y TGA.

7.7.3. Ensayos de caracterización

7.7.3.1. Ensayos colorimétricos

El ensayo más difundido para la determinación del grado de carbonatación se realiza por medio del ensayo colorimétrico utilizando fenolftaleína. En esta se preparó una solución de fenolftaleína al 1% y se rociaron los especímenes sobre una de las caras transversales del disco cortado; esta solución cambia de color de violeta a transparente cuando el pH es de aproximadamente 8,5, lo que indica la presencia de CaCO_3 .

7.7.3.2. Ensayos difractométricos

Los ensayos difractométricos se realizaron en un difractómetro marca Panasonic, bajo los siguientes parámetros. Tubo: Ánodo de Cobre (Cu); $\text{K-}\alpha_1$ [\AA]:1,54060; y con un barrido angular (2θ) de 10° a 70° y para el análisis se realizó mediante la base de datos "PANalytical".

7.7.3.3. Ensayos termogravimétricos

Los ensayos termogravimétricos se realizaron, a las mismas muestras extraídas para los ensayos difractométricos, en un equipo SDT Q600. Los rangos de temperatura se variaron desde temperatura ambiente hasta los 1000°C . Procedimiento de calentamiento: calentamiento hasta 1000°C a $10.00^\circ\text{C}/\text{min}$; Atmósfera: no oxidante, nitrógeno UAP a $20,0\text{ mL}/\text{min}$; Frecuencia de toma de datos: $0,5\text{ sec}/\text{pt}$

7.7.3.4. Ensayos de ATR-FTIR (Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier con implemento de Reflexión Total Atenuada)

Los ensayos se llevaron a cabo en un Equipo Thermo Scientific Nicolet 380 FT-IR, con implemento Smart iTR para Reflexión Total Atenuada. Cantidad de barridos y resolución fue la misma para todos. Igual que para el caso de las termografías y los difractogramas se realizó un análisis para cada profundidad de los especímenes expuestos a diferentes tiempos de carbonatación.

7.8. Perfiles de carbonatación por medio de escaneo gamma (GS).

Para este ensayo se utilizaron discos extraídos de tres diferentes muestras cilíndricas de concreto de diámetro igual a 10 cm , el primero Q6 con 44 días de carbonatación con 25% en volumen de CO_2 y humedad relativa del 65% en la cámara, el segundo Q1 con un tiempo de carbonatación igual a 2 días y las mismas condiciones en la cámara y el tercero Q0 sin carbonatar. La Fig. 7.6 brinda una vista de estos discos. El primer espécimen presentaba un espesor de $4,85\text{ cm}$, mientras el segundo y el tercero poseían un espesor de $4,5\text{ cm}$.



Figura 7.6 - Muestra del disco de concreto Q6.

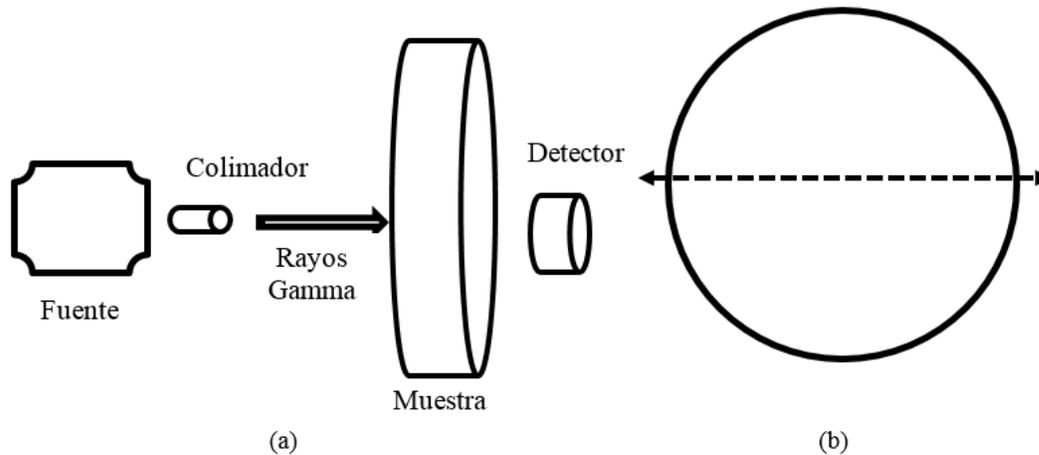


Figura 7.7 Ensayo de escaneo con fuente gamma. (a) Esquema de equipo para la realización de ensayo. (b) barrido aplicado sobre sección transversal de muestras.

En el ensayo se empleó un colimador para detector que posee una apertura circular de 8 mm de diámetro; el detector de centello junto con este colimador se posicionaron a la distancia más corta del colimador y de la fuente que la estructura permitía, es decir 19,4 cm de distancia entre las caras frontales de ambos colimadores. Debido a la geometría de las muestras analizadas, estas se colocaron sobre una base de acrílico para estabilizarlas. La Fig. 7.7 brinda un esquema del arreglo de medición, mientras que las Fig. 7.8 muestra el sistema real de escaneo con rayos gamma.



(a) Distribución espacial del sistema de medición.
Vista Lateral.



(b) Configuración espacial de
detector-muestra-colimador de fuente

Figura 7.7 Sistema real de escaneo con rayos gamma

El tipo de posicionamiento de las muestras en la plataforma de medición fue seleccionado para atenuar el efecto de la apertura del haz de radiación, es decir, lo más cerca posible del colimador de la fuente. De esta manera el espécimen se mantiene a una distancia de la cara frontal del colimador de la fuente de 9,0 cm. Para la medición con GS se creó un único perfil horizontal que abarca la totalidad del diámetro de los especímenes. La Fig. 7.7 (b) muestra la posición y dirección de las mediciones realizadas en material. Las mediciones comienzan a 1 cm antes del borde izquierdo de la muestra y terminan a 1 cm del borde opuesto. Cada medición tiene una separación de 1 mm y se registraron 120 puntos de medición en total. Los parámetros del sistema de medición GS configurados son los siguientes:

- 20 mediciones por punto de medición, 2400 mediciones totales.
- Tiempo de muestreo: 30 s, duración por ensayo de 20 horas.
- Distancia de medición horizontal: 1mm.

De acuerdo a los resultados obtenidos con los ensayos preliminares, llevados a cabo con la técnica de gamma scanning (GS), se realizó una serie de nuevas mediciones en la probeta carbonatada Q6 y no carbonatada Q0. El propósito era de verificar la veracidad de las mediciones anteriores y establecer si las regiones carbonatadas podían ser registradas con el sistema GS disponible. En este caso se seleccionaron los casos más extremos, siendo el de 44 días de carbonatación para la probeta Q6 y sin carbonatación para la Q0.

El ensayo planteado consistió en obtener cuatro perfiles de atenuación de la radiación gamma en diferentes ubicaciones de los discos cilíndricos Q6 y Q0, con diámetro de 10 cm y espesor de 4,85 cm y 4.50 cm respectivamente. La Fig.7.8 muestra las posiciones y dirección de estos perfiles, donde los perfiles 1 y 3 están desplazados de 90° uno del otro, mientras los perfiles 2 y 4 muestran una diferencia angular respecto al perfil 1 de referencia, de 135° y 45° respectivamente. Los perfiles de GS inician en 0,5 cm antes del primer borde de la probeta y terminan 0,5 cm después del segundo borde.

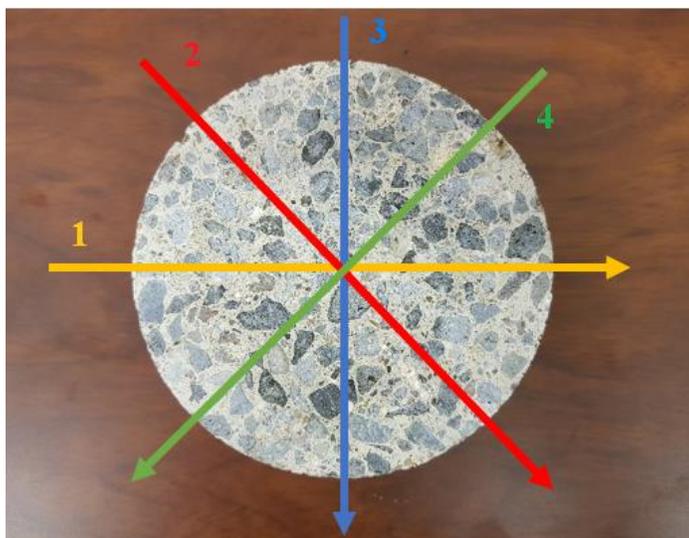


Figura 7.8 Posición y dirección de las mediciones GS realizadas con la probeta Q6.

El sistema de medición por radiación gamma presenta ahora una distancia entre la probeta Q6 y el colimador de la fuente de 0,10 cm, entre la probeta y el colimador del detector de 6,95 cm y entre colimadores de 11,90 cm. Los otros parámetros de medición y las características de cada ensayo se detallan a continuación:

- Periodo de muestreo: 30 s.
- Intervalo entre puntos de medición: 1mm.
- Mediciones por punto: 10 mediciones.
- Número de puntos de medición: 111.
- Número total de mediciones: 1110.
- Duración de cada ensayo: 9 horas con 15min.

Debido a la configuración de adquisición de datos en tiempo real con que se programa el sistema de medición, un dato de medida corresponde al conteo o número de partículas que inciden en la superficie del detector, cada 0,5 s. Es decir, cada medición efectuada es el resultado de calcular la media aritmética de 60 mediciones individuales si el periodo de muestreo corresponde a 30 s.

7.9. Radiografías con rayos X

Con el propósito de estudiar si el grado de carbonatación aplicada pudiese ser determinado mediante el uso de otras metodologías no destructivas, disponibles a los investigadores; se decidió aplicar la técnica de radiografía con rayos X.

Las condiciones del ensayo fueron las siguientes:

- Potencia: 100KV
- Amperaje: 3 mA
- Tiempo: 1,5 minutos
- Distancia de fuente a cara frontal: 70 cm.

7.10. Ensayos mecánicos

De la totalidad de los especímenes se extraen 12 de los lotes de concreto hidráulico elaborado, para determinar la resistencia a la compresión promedio a los 28 días y determinar si se cumple con los valores mínimos esperados establecidos en el diseño de mezcla previamente realizado.

Después del periodo de curado por 90 días, los restantes espécimen de estudio fueron llevados a condición seca al horno con la finalidad de eliminar la humedad presente. Una porción de estas muestras (30 especímenes) fueron llevadas la cámara de carbonatación, donde se humectaron por un periodo de 7 días, para eventualmente ser expuestas a diferentes concentraciones de CO_2 y humedad relativa. Otra porción similar (30 muestras) se mantuvieron como control para realizar un análisis de la variación de las resistencias a la compresión entre las muestras carbonatadas y las no carbonatadas, según lo estipulado en “*Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto*” [Ast13b].

7.11. Modelación y simulación el proceso de carbonatación en el concreto.

Una vez investigadas las ecuaciones de conservación de masa y flujo y las reacciones químicas acopladas a las anteriores, se fijan las hipótesis fundamentales y los alcances del modelo de carbonatación del concreto. El trabajo se llevó a cabo en conjunto con los investigadores de Universidad de Trieste, en particular para lo que concierne la modelación de los mecanismos que se desarrollan en medio poroso.

La Fig. 7.9 muestra una probeta cilíndrica de concreto ensayada. Para estudiar el avance del frente de carbonatación en los especímenes, excluyendo en una primera fase mecanismos de tipo bi y tri-dimensional y el transporte de tipo convectivo; hipótesis que son consideradas por casi la totalidad de los modelos revisados con el estado del arte, se puede representar el fenómeno de carbonatación mediante ecuaciones diferenciales de conservación unidimensionales. En el modelo, los fenómenos pueden desarrollarse convenientemente mediante el uso de coordenadas cilíndricas y aplicando condiciones de simetría, siendo que es indispensable no aumentar los tiempos de cálculo. Se seleccionó así una dirección de carbonatación en la coordenada radial, es decir se considera que los ensayos experimentales se deberán desarrollar exponiendo las superficies exterior - vertical de las muestras de concreto al ambiente de alta concentración de CO_2 y manteniendo las bases horizontales impermeables al gas.



Figura 7.9. Especímenes cilíndricos de concreto de diámetro 10 cm y altura 20 cm.

Para el fenómeno de carbonatación, la velocidad del frente de carbonatación depende crucialmente de la difusividad efectiva del CO_2 en los poros del concreto carbonatado. Papadakis et al. [Pap89] determinan el coeficiente de difusión del CO_2 en el concreto y concluyen que depende fuertemente de la relación agua/cemento (a/c) de las muestras y del valor de humedad relativa presente, siendo que los datos experimentales pueden ser ajustados mediante expresiones analíticas. El valor del coeficiente de difusión es del orden de $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para un concreto con relación a/c de 0,5, humedad relativa de 65% y fracción del volumen de poros de 0,20. Para el modelo preliminar, se usan estos valores de literatura.

Igualmente el valor de la concentración del CO_2 en la cámara de carbonatación acelerada determina el gradiente de concentración inicial que, a través de la ley de Fick, modela el mecanismo difusivo del transporte del gas en el medio poroso del concreto. De acuerdo a los tiempos previstos para la duración de los ensayos experimentales, se asume un valor de CO_2 en la cámara constante e igual a 25% en volumen, siendo el resto de la mezcla representada por aire.

Para incorporar en el modelo los parámetros cinéticos y las constantes de equilibrio de los mecanismos químicos de carbonatación, se usa la base de datos del software comercial Comsol Multiphysics [Com16] que es disponible en la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales y que presenta los valores estándares de las reacciones químicas entre especies. En este caso las reacciones se desarrollan en fase acuosa y por lo tanto el agua será el solvente de la solución con la presencia de las especies CO_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y CaCO_3 .

En particular, en el software Comsol Multiphysics, el cual se basa en el método computacional de elementos finitos, se usa el módulo Chemical Reaction Engineering [Com16] para desarrollar el modelo computacional del proceso de carbonatación del concreto. El módulo es apropiado para la modelación de sistemas químicos afectados principalmente por los valores de la composición química, cinética de las reacciones, mecánica de fluidos y transporte de energía, sea como función del espacio y del tiempo. El módulo presenta una serie de interfaces para representar el transporte de masa de las especies, tanto en soluciones diluidas como concentradas, además es capaz de describir soluciones que dependen de potencial eléctrico, flujo en medio poroso y transferencia de calor. Una vez especificadas las sustancias que son parte del sistema en estudio, las librerías del software permiten calcular las propiedades termodinámicas y de transporte de estas. Los métodos de modelación computacional de Comsol Multiphysics son estándares y coincidentes con la mayoría de los softwares comerciales.

La secuencia del trabajo es la siguiente:

- Se definió la física de interés, en este caso el transporte de especies diluidas en presencia de reacciones químicas;
- Se especificó el problema como unidimensional en coordenadas cilíndricas (r , θ , z) y en condiciones transitorias;
- Se definió los parámetros y variables del modelo computacional;
- Se creó la geometría; aplicando primero condiciones de simetría en la coordenada circunferencial θ y sucesivamente respecto de la coordenada axial z , se redujo a una sección transversal del cilindro de concreto, equivalente a un rectángulo de lado igual a 5 cm y altura de 20 cm;
- Se especificaron las propiedades de transporte y química de los materiales; las reacciones químicas y las condiciones de borde e inicial del problema de carbonatación; en este caso no se consideró problemas de movimiento de interfaces, pues se pretendió simular e identificar el frente de carbonatación a través del cálculo de las concentraciones de las especie químicas;

- Mediante operaciones de mallado se creó la malla computacional, con la cual se aplicó el método de elementos finitos para la resolución de las ecuaciones diferenciales del modelo; en el caso específico se refinó la malla de cálculo en las regiones donde se proyecta puedan existir variaciones importantes de las magnitudes en estudio;
- Se implementaron los cálculos del problema transitorio, para los tiempos de carbonatación que han sido seleccionados de acuerdo al estado del arte;
- Se procesaron y trazaron los resultados obtenidos.

8. Resultados

8.1. Caracterización de componentes

8.1.1. Caracterización de agregados

A continuación se muestra, en la Tabla 8.1, los resultados resumen de la caracterización del agregado fino y grueso:

Tabla 8.1. Propiedades de los agregados en estudio

Material	Ensayo					Porcentaje de Absorción %D
	Peso unitario Suelto (kg/m ³)	Peso unitario Compactado (kg/m ³)	Gravedad específica			
			Gbss	Gbs	Gs	
Agregado grueso	1480	1560	2,63	2,57	2,61	2,10
Agregado fino	1500	1710	2,39	2,20	2,22	8,00

Tabla 8.2. Análisis granulométrico agregado grueso [Ast14]

Peso Muestra Seca (g)		2041,9				
Tamiz	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando	Límite superior	Límite inferior
12,50 mm	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
9,50 mm	250,81	12,28	12,28	87,72	100	85
Nº 4 (4,75mm)	1642,95	80,46	92,74	7,26	30	10
Nº 8 (2,36mm)	114,68	5,62	98,36	1,64	10	0
Charola	32,80	1,61	99,97	-	-	-
Peso Total	2041,24	99,97	-	-	-	-
% Error	0,03					

Nota: Los límites para la piedra en estudio corresponde a piedra quintilla según lo estipulado en el RTCR 10854 "Norma Oficial de Especificaciones para Agregados finos y gruesos para concreto"

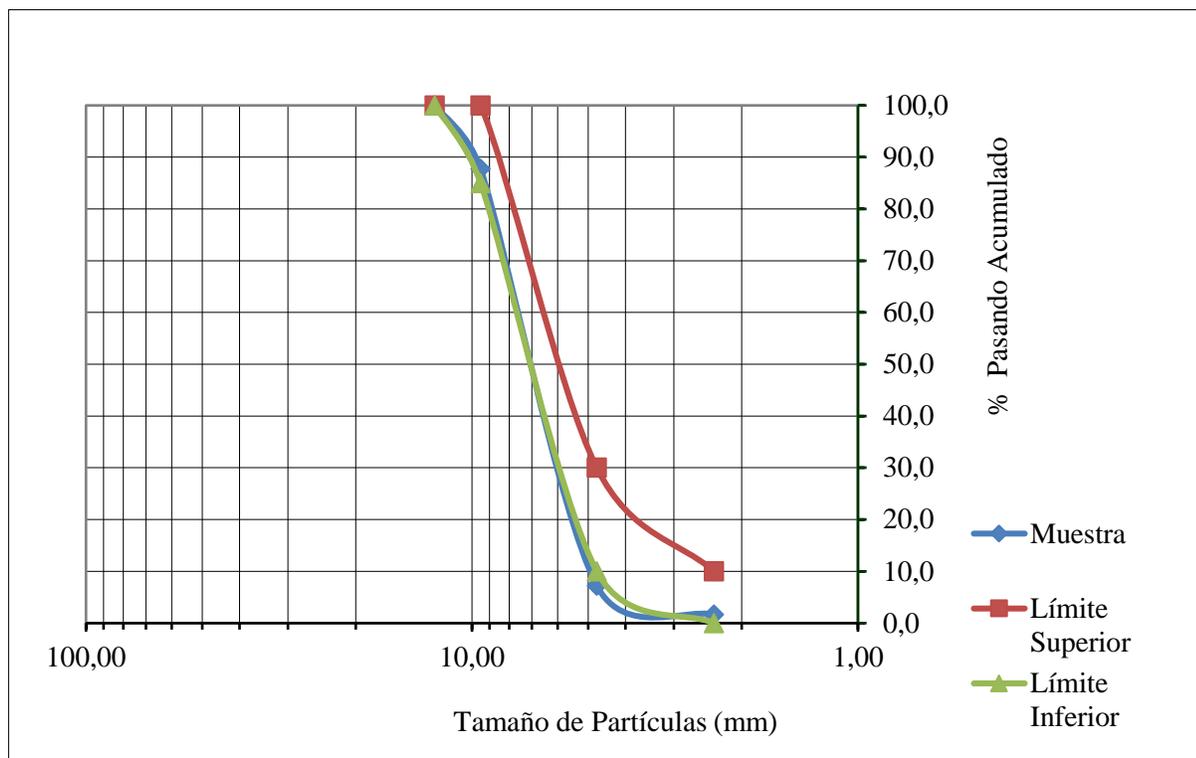


Figura 8.1. Análisis granulométrico de los agregados gruesos en estudio

Tabla 8.3. Análisis granulométrico agregado fino, según [Ast14]

Peso Húmedo (g)	350,82					
Peso Muestra Seca (g)	312,25					
Peso Muestra Seca Lavada (g)	305,85					
Tamiz	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasando Acumulado	Límite Superior	Límite Inferior
9,50 mm	0,88	0,28	0,28	100	100	100
N° 4 (4,75mm)	21,13	6,77	7,05	93	100	95
N° 8 (2,36mm)	54,66	17,51	24,55	75	100	80
N° 16 (1,18mm)	62,89	20,14	44,69	55	85	50
N° 30 (600µm)	56,69	18,16	62,85	37	60	25
N° 50 (300µm)	43,62	13,97	76,82	23	30	5
N° 100 (150µm)	36,87	11,81	88,63	11	10	0
N° 200 (75µm)	27,80	8,90	97,53	4	5	0
Charola	7,64	2,45	99,98	-	-	-
Peso Total	312	100	-	-	-	-
% Error		0,02				
Módulo de finura:		3,05				

Nota: Los límites para la arena en estudio corresponde a lo estipulado en el RTCR 10854 "Norma Oficial de Especificaciones para Agregados finos y gruesos para concreto"

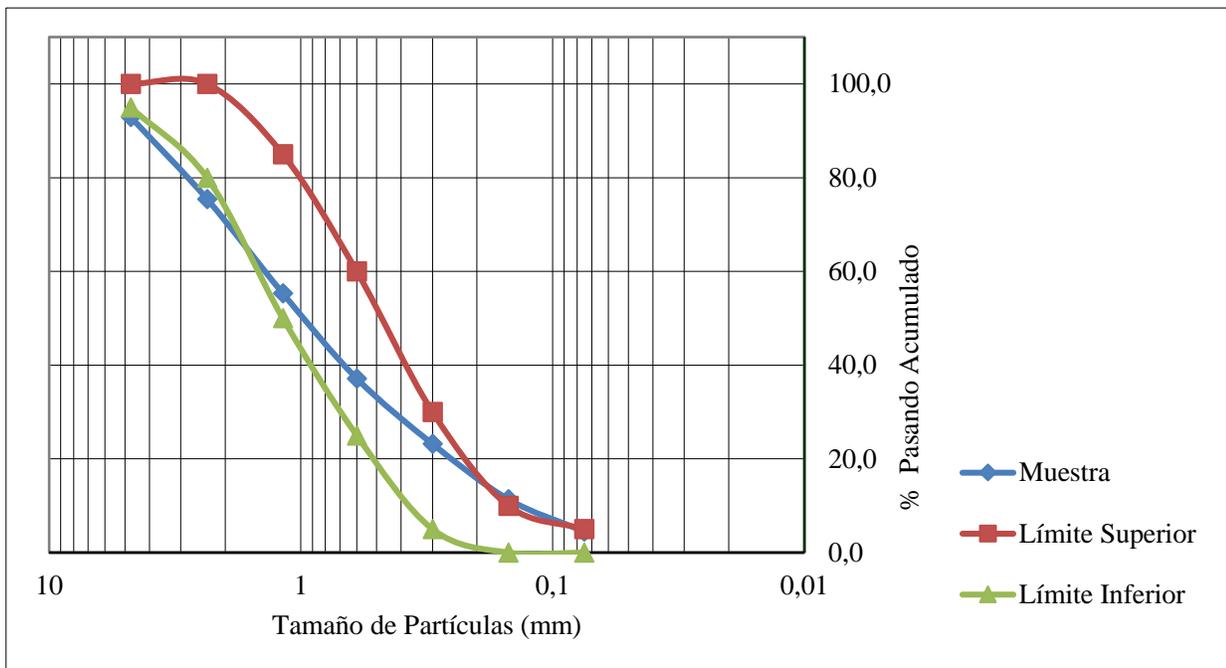


Figura 8.2. Análisis granulométrico de los agregados finos en estudio

8.1.2. Caracterización de material cementicio

Según los datos suministrados por el proveedor el cemento hidráulico corresponden a un MP/A-28, las cantidades de los componentes químicos del material en estudio se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 8.4. Contenido de compuestos químicos para cemento MP/A-28 en estudio.

Compuesto	Contenido (%)	Parámetro (%) RTCR 479:2015
% Óxido de magnesio (MgO)	2,19	≤ 6,0
% Trióxido de azufre (SO ₃)	2,51	≤ 4,0
Aluminato Tricálcico (C3A)	8,30	---
Silicato Tricálcico (C3S)	62,4	80-94%*
Silicato Tricálcico (C2S)	12,5	
Ferroaluminato tetracálcico (C4AF)	9,30	

Nota (*): Valor total de Clinker para el MP/A lo cual corresponde a la sumatoria de los porcentajes de los componentes de este material.
Fuente: LafageHolcim, control de calidad Junio 2017

Para los valores de la adición puzolánica que tiene este material aglutinante, se muestra la Tabla 8.5, según la información del proveedor del material cementicio:

Tabla 8.5 Contenido de compuestos químicos para para el material puzolánico contenido en el cemento hidráulico MP/A-28 en estudio.

Compuesto	Contenido (%)
SiO ₂	83,6
Al ₂ O ₃	0,2
Fe ₂ O ₃	1,6
CaO	0,8
MgO	0,1
SO ₃	0,9
K ₂ O	0,0
Na ₂ O	0,2

Fuente: LafageHolcim, control de calidad Junio 2017

8.2. Diseño de mezcla de concreto hidráulico

La memoria de cálculo del diseño de la mezcla del concreto utilizado se detalla en el apéndice 2, a continuación se muestra un resumen de los valores finales obtenidos para dicho diseño:

Tabla 8.6 Resultados de resumen del diseño de mezcla para un m³ de concreto hidráulica.

Material	Condición	Peso (kg)	Dosificación
Cemento Hidráulico	Seco	381,97	1
Arena	Húmeda	687,31	1,80
Piedra	Húmeda	907,12	2,37
Agua	Sin aditivo	197,45	0,52

8.3. Elaboración de especímenes de estudio

Los especímenes de estudio se identificaron y controlaron con la siguiente matriz:

Tabla 8.7. Nomenclatura utilizada para la identificación de las muestras en estudio

	Falla 90 días para estimación de comportamiento (Mpa)
	Entrega a Materiales y secado a 60°C Se entregan a Cámara de carbonatación 18/Sep/2017
	Análisis químico/ Varios
	Muestras secas al horno 60° en CIVCO
M1	Muestras con 2 días de exposición CO ₂ (Salida 30/Set/2017)
M2	Muestras con 4 días de exposición CO ₂ (Salida 04/Oct/2017)
M3	Muestras con 8 días de exposición CO ₂ (Salida 08/Oct/2017)
M4	Muestras con 16 días de exposición CO ₂ (Salida 16/Oct/2017)
M5	Muestras con 28 días de exposición CO ₂ (Salida 18/Oct/2017)

M6	Muestras con 44 días de exposición CO2 (Salida 13/Nov/2017)
Q1	Muestra cortada para análisis
Q2	Muestra cortada para análisis
Q3	Muestra cortada para análisis
Q4	Muestra cortada para análisis
Q5	Muestra cortada para análisis
Q6	Muestra cortada para análisis

Tabla 8.8. Identificación de muestras de lote CP-01 (primer lote elaborado)

ID lote	Id de especímenes	Observaciones y uso
CP-01	CP-01/01	Par para comparar M3
	CP-01/02	Par para comparar M1
	CP-01/03	Par para comparar M2
	CP-01/04	Par para comparar M1
	CP-01/05	Par para comparar M2
	CP-01/06	Falla para estimar comportamiento
	CP-01/07	Par para comparar M1
	CP-01/08	Par para comparar M2
	CP-01/09	Par para comparar M3
	CP-01/10	Par para comparar M3
	CP-01/11	Muestras para analisis
	CP-01/12	Falla para estimar comportamiento
	CP-01/13	Muestras para analisis
	CP-01/14	Muestras para analisis
	CP-01/15	Muestras para analisis
	CP-01/16	M1
	CP-01/17	M1
	CP-01/18	M1
	CP-01/19	M2
	CP-01/20	M2
	CP-01/21	M2
	CP-01/22	Falla para estimar comportamiento
	CP-01/23	M3
	CP-01/24	M3
	CP-01/25	M3

Tabla 8.9. Identificación de muestras de lote CP-02 (primer lote elaborado)

ID lote	Id de especímenes	Observaciones y uso
CP-02	CP-02/01	Par para comparar M4
	CP-02/02	Par para comparar M4
	CP-02/03	Par para comparar M4
	CP-02/04	Par para comparar M5
	CP-02/05	Par para comparar M5
	CP-02/06	Par para comparar M5
	CP-02/07	Par para comparar M6
	CP-02/08	Par para comparar M6
	CP-02/09	Falla para estimar comportamiento
	CP-02/10	Par para comparar M6
	CP-02/11	Falla para estimar comportamiento
	CP-02/12	M4
	CP-02/13	M4
	CP-02/14	Muestra Q4
	CP-02/15	M5
	CP-02/16	M5
	CP-02/17	M5
	CP-02/18	M6
	CP-02/19	Falla para estimar comportamiento
	CP-02/20	M6
	CP-02/21	M6
	CP-02/22	M4
	CP-02/23	Muestra Q5
	CP-02/24	Muestra Q6
	CP-02/25	no se realizo

8.4. Diseño y construcción de cámara de carbonatación y del sistema de control

La cámara de carbonatación fue diseñada y construida con una estructura en acero inoxidable AISI 304, para resistencia a las condiciones de exposición, y forrada con láminas de acrílico de 4,5 mm de espesor en las paredes y las puertas; todas las uniones se sellaron con silicón y cinta adhesiva. Esta tiene dimensiones de 1,5 de alto x 1,5 de ancho y 0,75 m de profundidad, lo que equivale a un volumen aproximado de 1,68 m³ como se muestra en la Fig. 8.3.



Figura 8.3 Esquema de diseño de la cámara de carbonatación

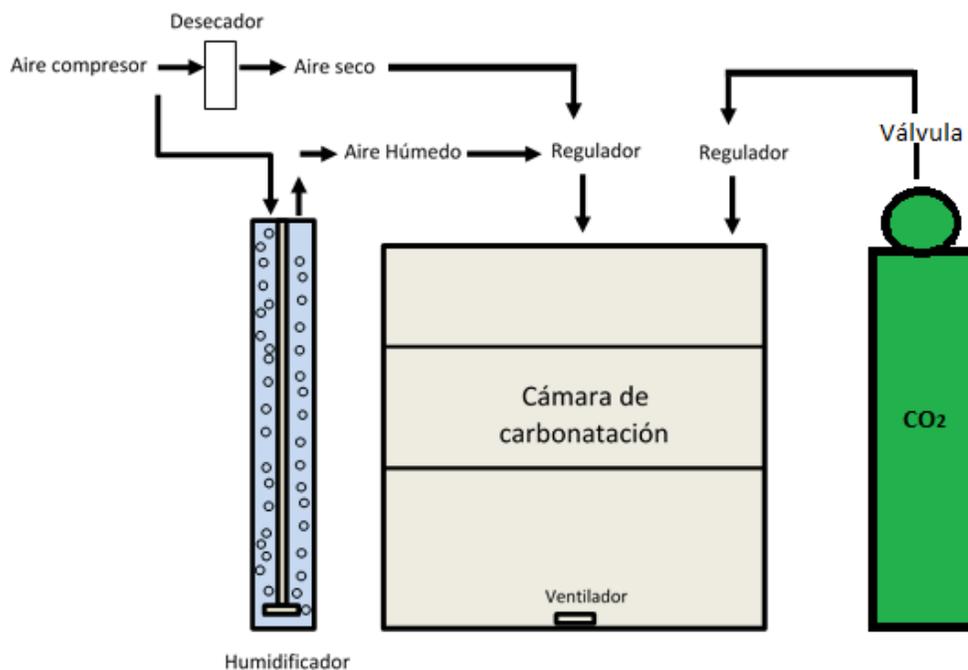


Figura 8.4 Esquema de humectación y suministro de CO₂ en la cámara de carbonatación

Para medir la concentración de CO₂ dentro de la cámara se adquirieron dos modelos de sensores de CO₂ de la empresa CO2Meter, Inc. En general, el primero de ellos (a) tiene la capacidad de medir concentraciones de CO₂ que van desde 0% hasta 30%, mientras el segundo (b) soporta atmósferas totalmente saturadas de este gas (hasta 100% CO₂). Las Fig. 8.5 muestran ambos modelos y la Tabla 8.10 detalla las características específicas de cada uno de ellos.



Figura 8.5 Modelos de sensores para la medición de concentraciones de CO₂

Tabla 8.10 Datos técnicos de los sensores de concentración del CO₂ [Co218a], [Co218b].

Característica	Modelo	
	Sensor CO2 0-30%	Sensor CO2 0-100%
Método de medición	NDIR*	NDIR* con placas de oro ópticas
Método de muestreo	Difusión/Directo	Difusión/Directo
Precisión	±0.2% vol CO2 ±3% del valor medido	±70ppm ±5% de la medición
Rango temperatura	-40-60°C	NA
Precisión (temperatura)	±0.4C a 25°C	NA
Rango humedad relativa	0-100% sin condensación	NA
Precisión (RH)	±3%RH	NA
Mediciones tiempo real	Sí, con soporte de software	Sí
Período de muestreo	30s-18h	500ms (2Hz)
Condiciones de trabajo	No especificado	0°C hasta 50°C, 950mBar hasta 10Bar
Tiempo de vida	>15 años	>15 años
Consumo eléctrico	6-14 VDC máximo	3.3 ± 0.1 VDC

Nota *Non-Disruptive InfraRed light, NDIR por sus siglas en inglés.

En la Tabla 8.10 observa que el sensor de 0-30% tiene la capacidad de medir tanto la temperatura como la humedad relativa, mientras el de 0-100% carece de dicha característica. Dado que el sistema de medición necesita además tanto controlar la humedad relativa como monitorear la temperatura de la cámara, se emplean sensores de temperatura y humedad relativa para complementar el funcionamiento del sensor de 0-100%. Las Figs. 8.6 muestran el sensor de humedad relativa (modelo HIH-4030/31) y temperatura (modelo Electronic Brick 3362), respectivamente, mientras que la Tabla 8.10 contiene las especificaciones de interés de ambos componentes.

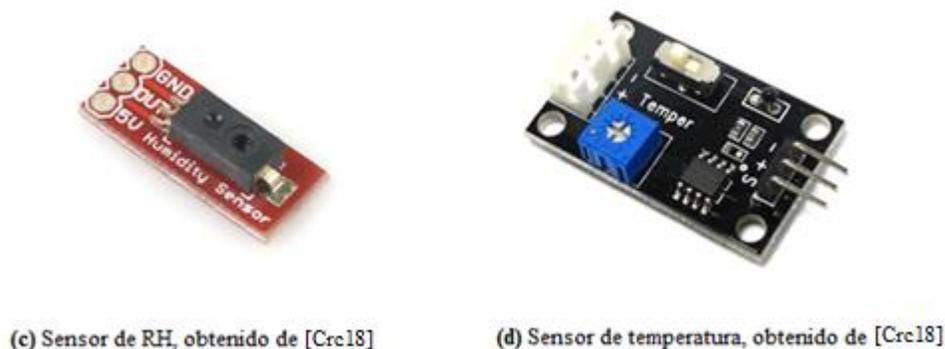


Figura 8.6 Modelos de sensores para la medición de humedad relativa.

Tabla 8.10. Especificaciones técnicas para los sensores de humedad relativa y temperatura [Ite13] [Crc18]

Característica	Modelo	
	<i>HIH-4030-31 Humedad Relativa</i>	<i>Electronic Brick 3362 Temperatura</i>
Rango	0-100%	-40°C-+125°C
Precisión	±3.5%RH	±2°C
Consumo eléctrico	4-5.8VDC - 200µA	2.7-5.5VDC

Para el control automático del nivel de concentración de CO₂ y humedad relativa dentro de la cámara se instalan tres válvulas de expansión electrónica de la empresa Fujikoki Corporation. La primera válvula es la encargada de regular el flujo de gas proveniente del balón de CO₂, en cambio las otras dos válvulas controlan el flujo ya sea de aire seco o aire húmedo proveniente de un compresor o del humidificador, respectivamente. La apertura/cierre de este tipo de válvulas es controlada por un motor paso a paso unipolar, el cual mueve la aguja de la válvula dependiendo de la orientación y cantidad de pasos deseados para obtener una cierta cantidad de flujo pasando a través de ella. La Fig. 8.7 muestra una de las válvulas usadas y la Tabla 8.11 contiene las especificaciones técnicas relevantes.



Figura 8.7. Válvula de expansión electrónica., obtenido de [Fuj18]

Tabla 8.11. Datos técnicos de las válvulas de expansión electrónica [Fuj18].

Característica	Componente
	<i>Válvula de expansión electrónica</i>
Rango cierre/apertura	2000 pasos
Precisión	0.18° por paso
Consumo eléctrico	900mA máx.

Los datos de la Tabla 8.11 indican que se necesitan 2000 pasos para cerrar o abrir completamente la válvula, lo que quiere decir también que se tiene un rango de trabajo de 2000 posiciones las cuales representan un flujo diferente para cada una de ellas. La precisión reportada es el desplazamiento angular que sufre el rotor del motor con cada paso que da y está relacionada de manera lineal al número de pasos que el motor debe dar para cerrar o abrir la válvula por completo, pues un recorrido de 360° del rotor equivale a 2000 pasos exactos del motor. Los actuadores encargados de recibir, traducir y transmitir las instrucciones provenientes de la unidad central de control son tres microcontroladores Arduino UNO REV3. Dos controladores se usan para la gestión de los motores de las válvulas de expansión electrónica y uno se emplea para la adquisición y transmisión de los datos provenientes de los sensores. Como el microcontrolador carece de la capacidad de suministrar el consumo eléctrico necesario para el funcionamiento de los motores de las válvulas, se añaden dos reguladores de corriente Adafruit modelo Motor Shield V2 para Arduino, los cuales reciben los comandos de control provenientes del microcontrolador y los traducen a impulsos eléctricos con la potencia necesaria para mover el rotor de los motores paso a paso. Las Fig. 8.8 muestran respectivamente el microcontrolador Arduino y el regulador Adafruit y la Tabla 8.12 brinda las características técnicas relevantes.

Tabla 8.12. Especificaciones técnicas para las válvulas de expansión electrónica [Ard18] [Ada18]

Característica	Componente	
	Arduino UNO REV3	Adafruit Motor Shield V2
Frecuencia de trabajo	16MHz	NA
Consumo eléctrico	5V	12V
Corriente DC por pin	20mA	1.2A



(e) Arduino UNO REV3



(d) Adafruit Motor Shield

Figura 8.8. Controladores de usan para la gestión de los motores de las válvulas de expansión electrónica

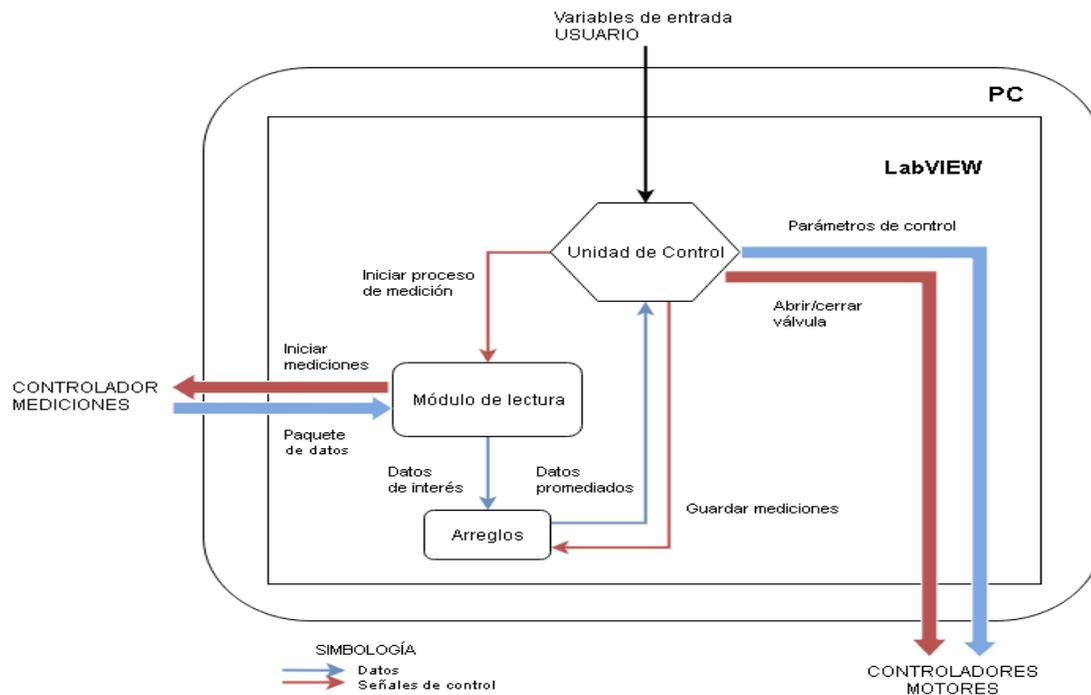


Figura 8.9 Diagrama de bloques para el sistema de control de la cámara de carbonatación.

Tabla 8.13. Variables de entrada el sistema de control de la cámara de carbonatación.

Variable	Descripción
Concentración de CO ₂ (%)	Porcentaje de CO ₂ deseado dentro de la cámara de carbonatación, dependiendo del sensor de CO ₂ instalado en ese momento, puede estar entre los rangos de 0-30% o 0-100%.
Humedad Relativa (%)	Porcentaje de humedad relativa requerida para un ensayo en particular, puede estar dentro del rango de 0-100%, aunque para este tipo de experimentos lo usual es que se mantenga entre 55-70%.
Periodo de muestreo (s)	Tiempo entre mediciones, en segundos.

8.5. Campaña experimental

8.5.1. Pruebas preliminares

8.5.1.1. Construcción de un sistema para ensayos preliminares

Para las pruebas preliminares se construyó una pequeña cámara, utilizando un balde plástico, como se observa en la Fig.8.10. También se fabricó un sistema de humectación, haciendo borbotear aire en un recipiente conteniendo agua.



Figura 8.10 Cámara de carbonatación para pruebas preliminares

Los ensayos se realizaron durante 48 horas con un porcentaje de CO₂ alto (no se pudo medir ya que no se contaba con los sensores de CO₂, en ese momento), el objetivo era verificar que los métodos de análisis que se querían utilizar para la investigación. Después de esto se determinó el grado de carbonatación mediante el uso de fenolftaleína, la difracción de rayos X y los ensayos con TGA.

8.5.1.2. Resultados de ensayo colorimétrico preliminar

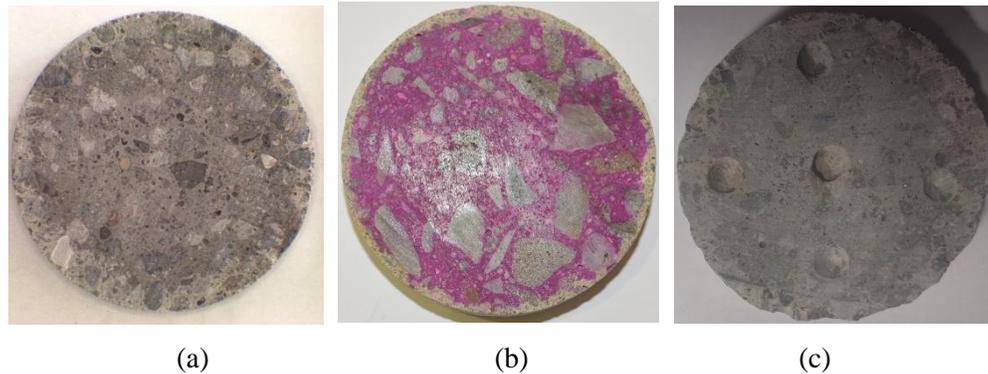


Figura 8.11 Resultados de primeras pruebas de carbonatación: (a) Muestra carbonatada antes de ensayo colorimétrico. (b) muestra después de ensayo colorimétrico (c) extracción de muestra para ensayos de composición.

Los primeros ensayos resultaron muy positivos ya que aunque no se controló la humedad ni el porcentaje de CO_2 , se logró un grado de carbonatación apreciable como se muestra en la Fig. 8.11(b) también se puede apreciar que la tonalidad de la zona carbonatada es diferente que con la zona carbonatada en la muestra sin ensayo calorimétrico (a).

8.5.1.3. Resultados de ensayo difractométrico preliminar

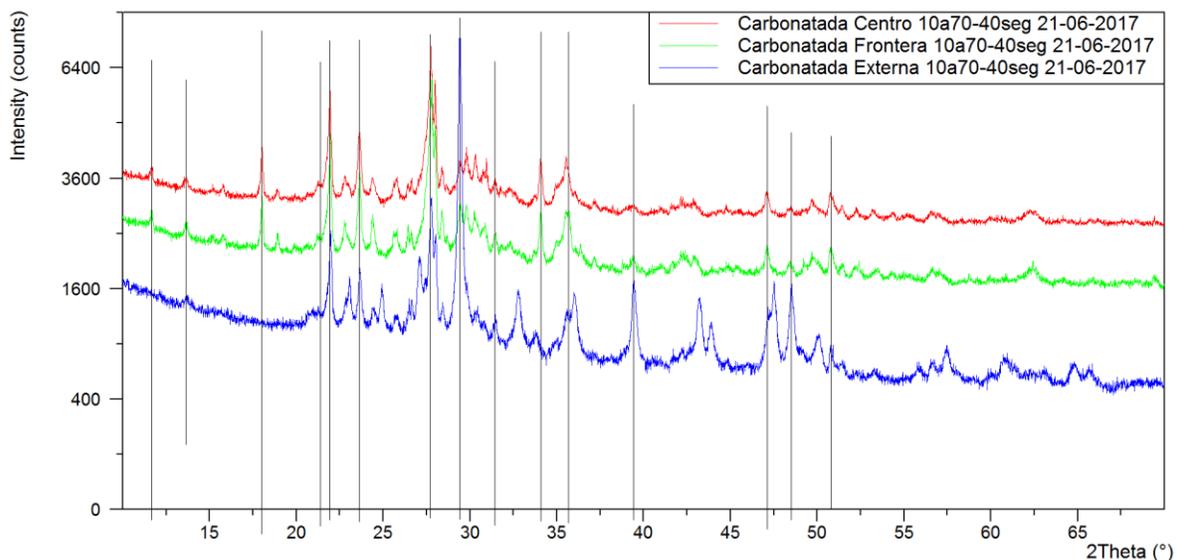


Figura 8.12 Resultados de primeras pruebas de análisis difractométricos

En estos se puede establecer la presencia de Carbonato de calcio (CaCO_3) en la parte más externa de la muestra, que disminuye a medida que se profundiza hacia la parte central del espécimen, adicionalmente se encuentra la presencia de Anortita (aluminosilicato de calcio) y portlantita (hidróxido de calcio).

8.5.1.4. Resultado de ensayo termogravimétrico preliminar (TGA)

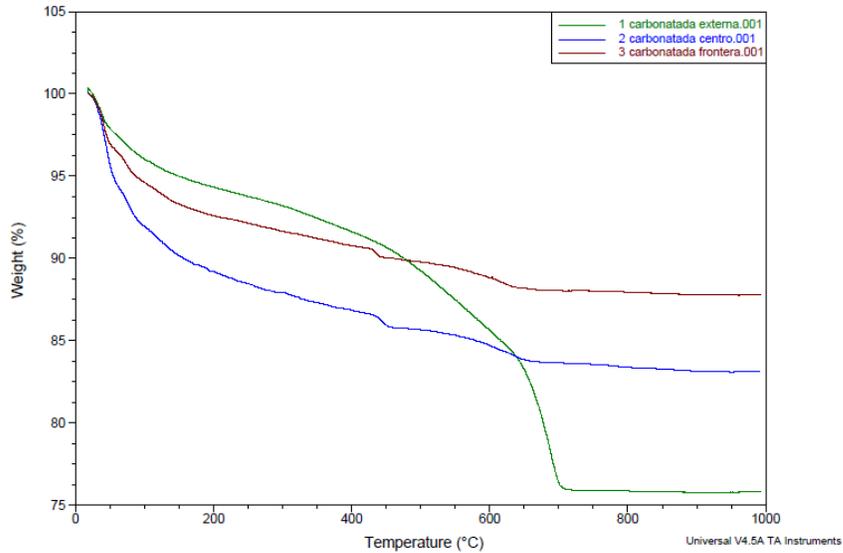


Figura 8.13 Resultados de primeras pruebas de análisis termogravimétricos preliminares

Los resultados preliminares de los ensayos termogravimétricos muestran presencia de carbonato en la muestra más externa del espécimen, adicionalmente presenta una variación de masa en la temperatura cercana a los 500 °C, que se asocia a la presencia de un hidróxido.

Tabla 8.14 Determinación de pérdida de peso para las muestras preliminares

Muestra	Masa inicial (mg)	% masa 200 °C	% masa 250 °C	% masa 300 °C	% masa 1000 °C	Masa perdida respecto a masa a 200 °C (%)	Masa perdida respecto a masa a 250 °C (%)	Masa perdida respecto a masa a 300 °C (%)
CAR1-AN2-0cm	10,628	95,79	95,20	94,65	73,20	23,58	23,11	22,66
CAR1-AN2-0.5cm	11,288	99,10	98,79	98,45	85,58	13,64	13,37	13,07
CAR1-AN2-1cm	14,453	95,49	94,97	94,48	82,46	13,65	13,17	12,72
CAR1-AN2-1.5cm	7,697	94,62	93,99	93,47	83,77	11,47	10,87	10,38
CAR1-AN2-2cm	14,6217	95,04	94,51	93,98	82,09	13,63	13,14	12,65

En general, como es de esperarse para mayores carbonataciones, se presentan mayores pérdidas de masa a altas temperaturas para las muestras más externas. Algo importante para tomar en cuenta a la hora de tratar los datos, es que las muestras tienen diferentes porcentajes de humedad, de modo que es importante considerar una masa inicial para los cálculos cuando el agua ya se ha perdido (por ejemplo: la masa presente a 200 °C, a la cual es de esperarse que ya la mayoría de agua se haya perdido).

8.5.2. Ensayos definitivos

8.5.2.1. Ensayos colorimétricos

Como se indica en la metodología las muestras se extrajeron, se cortaron y se les realizó el ensayo colorimétrico, cuyos resultados se muestran en la Fig. 8.14 y la Fig. 8.15 y la Tabla 8.15

Tabla 8.15. Resultados de prueba a colorimetría de grado de carbonatación (promedio) en función de los días de exposición

Días de exposición	0	2	4	8	16	28	44
Profundidad de carbonatación (mm)	0	4	6	8	10	12	15

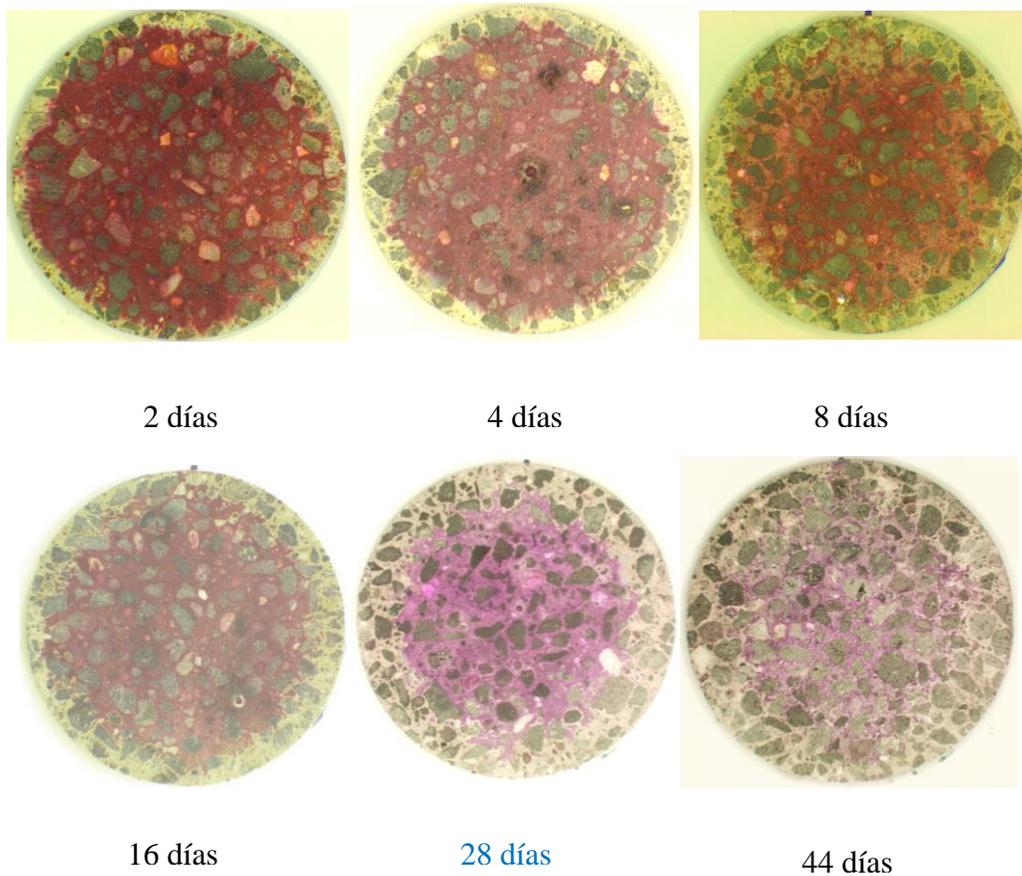


Figura 8.14. Profundidad de penetración de carbonatación mediante la prueba colorimétrica con fenolftaleína al 1% en función de los días de exposición

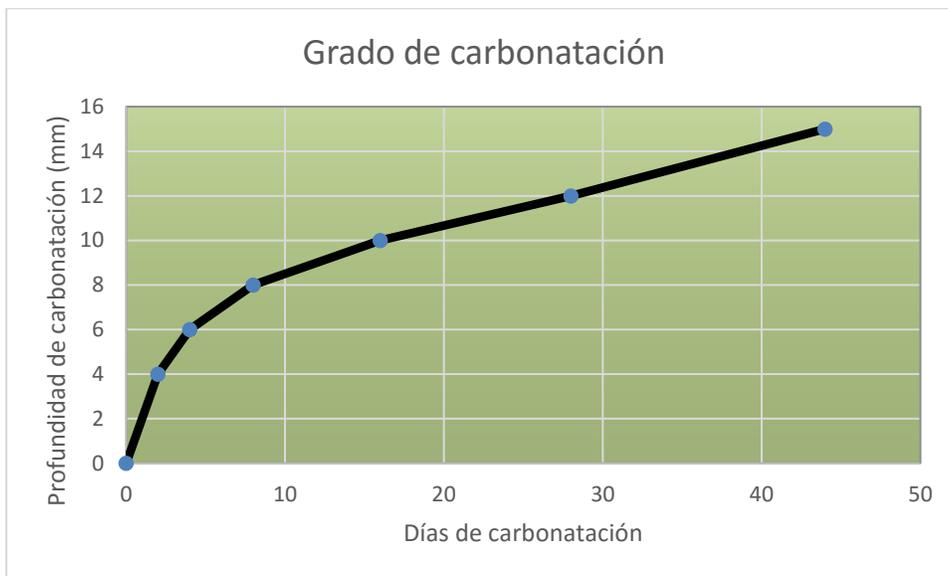


Figura 8.15. Grado de carbonatación (promedio) en función de los días de exposición.

8.5.2.2. Ensayos Difractometricos

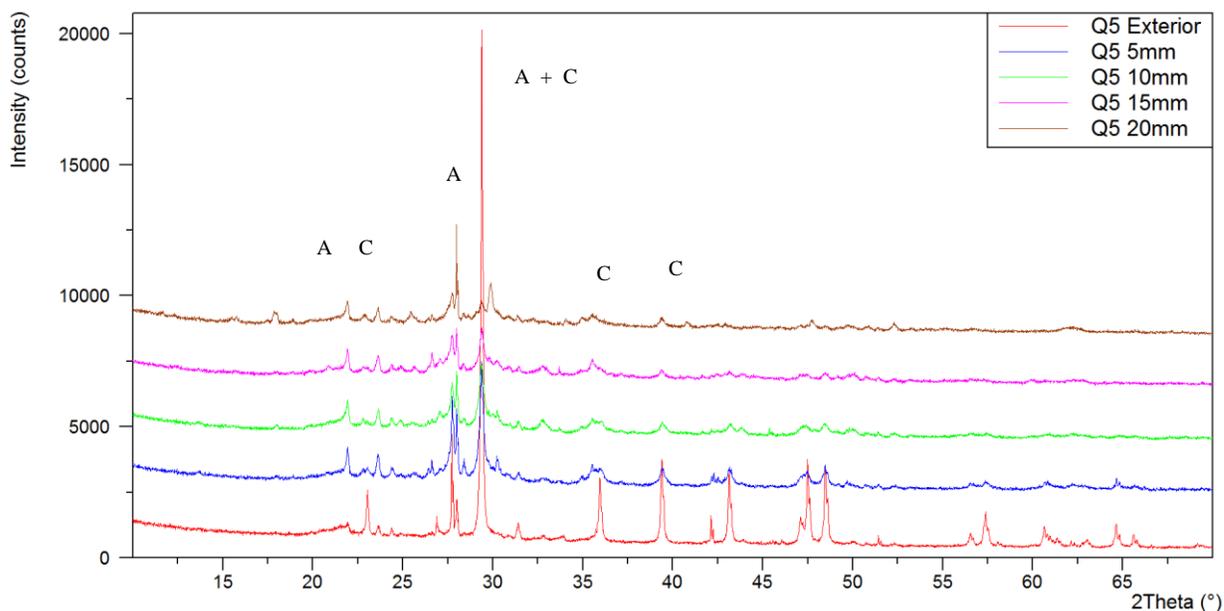


Figura 8.16. Análisis difractometricos de la muestra de 28 días de exposición, para diferentes profundidades
C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

Los difractogramas se realizaron a todas las muestras expuestas a diferentes tiempos, y de ellas se obtuvieron resultados a diferentes profundidades, los difractogramas individuales de estos se muestran en el apéndice 3.

8.5.2.3. Ensayos termogravimétricos

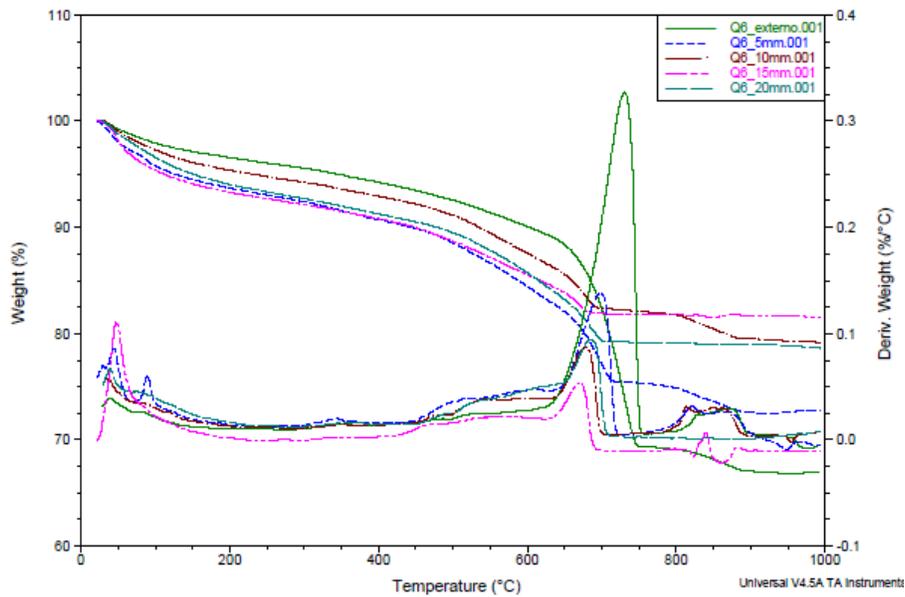


Figura 8.17 Análisis termogravimétrico de la probeta Q6 con 44 días de exposición a CO₂

8.5.2.4. Ensayos con espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR)

Los resultados para el FTIR se muestran a continuación donde se incluyen el gráfico correspondiente a 2 días de exposición y el correspondiente a 44 días de exposición al bióxido de carbono.

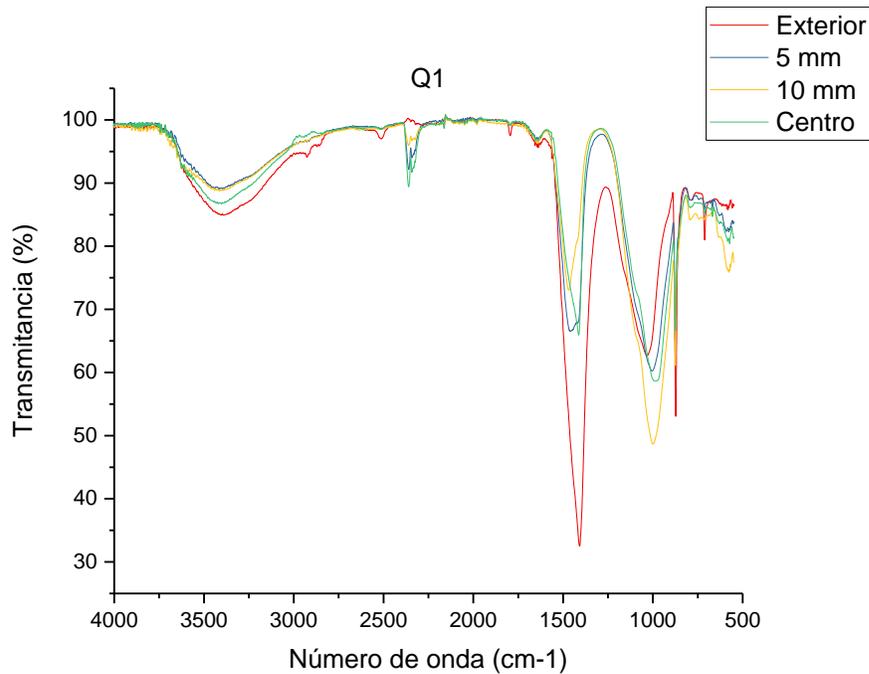


Figura 8.18. Espectroscopias FTIR para la probeta de 2 días en función de profundidad de carbonatación

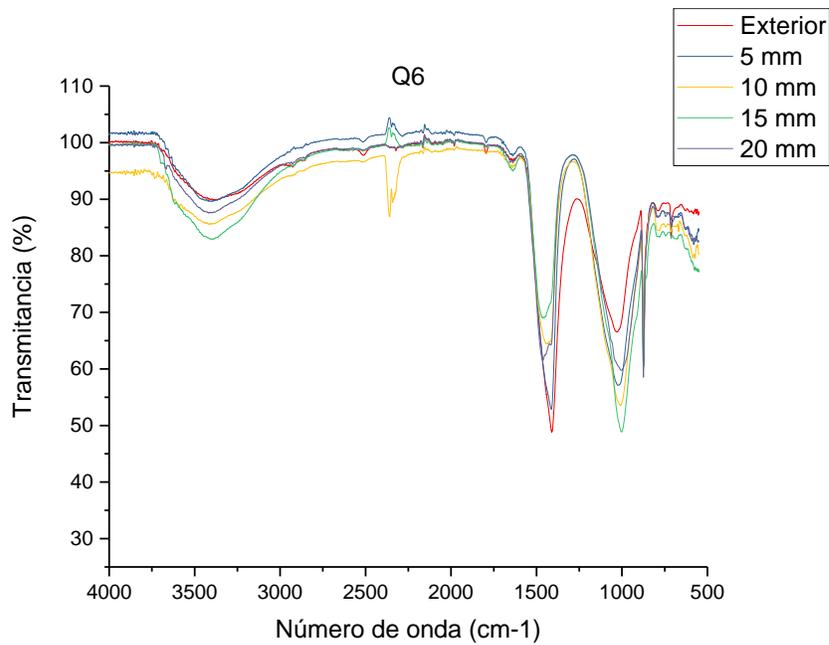


Figura 8.19. Espectroscopias FTIR para la probeta de 44 días en función de profundidad de carbonatación.

8.5.2.5. Ensayos mecánicos

Tabla 8.16 Determinación de la resistencia a la compresión a los 90 días de curado

ID	Cantidad	Fecha de elaboración	Edad 90 días	Código Espécimen	Carga (kN)	Resistencia 90 días (MPa)	Promedio (MPa)
CP-01	25	14/Jun./17	14/Set/17	CP-01/06	382,10	48,36	38,60
				CP-01/12	217,00	27,47	
				CP-01/22	310,30	39,27	
CP-02	25	15/Jun./17	15/Set/17	CP-02/09	229,00	28,98	
				CP-02/11	255,60	32,35	
				CP-02/19	269,40	34,10	
CP-03	25	19/Jun./17	19/Set/17	CP-03/03	357,80	45,28	
				CP-03/04	320,80	40,06	
				CP-03/05	358,90	45,42	
CP-04*	25	20/Jun./17	20/Set/17	N/A	N/A	N/A	
CP-05	25	21/Jun./17	21/Set/17	CP-05/15	326,20	41,53	
				CP-05/21	289,60	36,87	
				CP-05/22	306,00	38,96	

Nota: se descarta por inconsistencias durante el proceso de elaboración de la mezcla.

Tabla 8.17 Resultados de resistencia a la compresión para diferentes niveles de exposición de CO₂

Id	Muestras Sin carbonatar (MPa)				Muestras Carbonatadas (MPa)				Diferencia
	CP-01/02	CP-01/04	CP-01/07	Prom	CP-01/17	CP-01/16	CP-01/18	Prom M1	
Punto 1 (03/Oct/2017)	CP-01/02	CP-01/04	CP-01/07	Prom	CP-01/17	CP-01/16	CP-01/18	Prom M1	Diferencia
	41,79	44,45	32,56	39,60	34,42	36,79	33,21	34,81	12,10%
Punto 2 (09/Oct/2017)	CP-01/03	CP-01/05	CP-01/08	Prom	CP-01/19	CP-01/20	CP-01/21	Prom M2	Diferencia
	45,23	48,61	43,85	45,90	35,02	34,40	26,23	31,88	30,53%
Punto 3 (11/Oct/2017)	CP-01/01	CP-01/09	CP-01/10	Prom	CP-01/23	CP-01/24	CP-01/25	Prom M3	Diferencia
	38,51	42,04	48,76	43,10	35,46	34,29	34,18	34,64	19,63%
Punto 4 (20/Oct/2017)	CP-02/01	CP-02/03	CP-02/02	Prom	CP-02/13	CP-02/12	CP-02/22	Prom M4	Diferencia
	40,01	43,57	46,16	43,25	29,64	29,40	29,66	29,57	31,63%
Punto 5 (02/Nov/2017)	CP-02/06	CP-02/05	CP-02/04	Prom	CP-02/15	CP-02/16	CP-02/17	Prom M5	Diferencia
	41,34	42,47	39,22	41,01	24,41	35,47	22,44	27,44	33,09%
Punto 6 (15/Nov/2017)	CP-02/08	CP-02/07	CP-02/10	Prom	CP-02/18	CP-02/21	CP-02/20	Prom M6	Diferencia
	35,07	45,33	36,47	38,96	16,88	21,07	27,95	21,97	43,61%

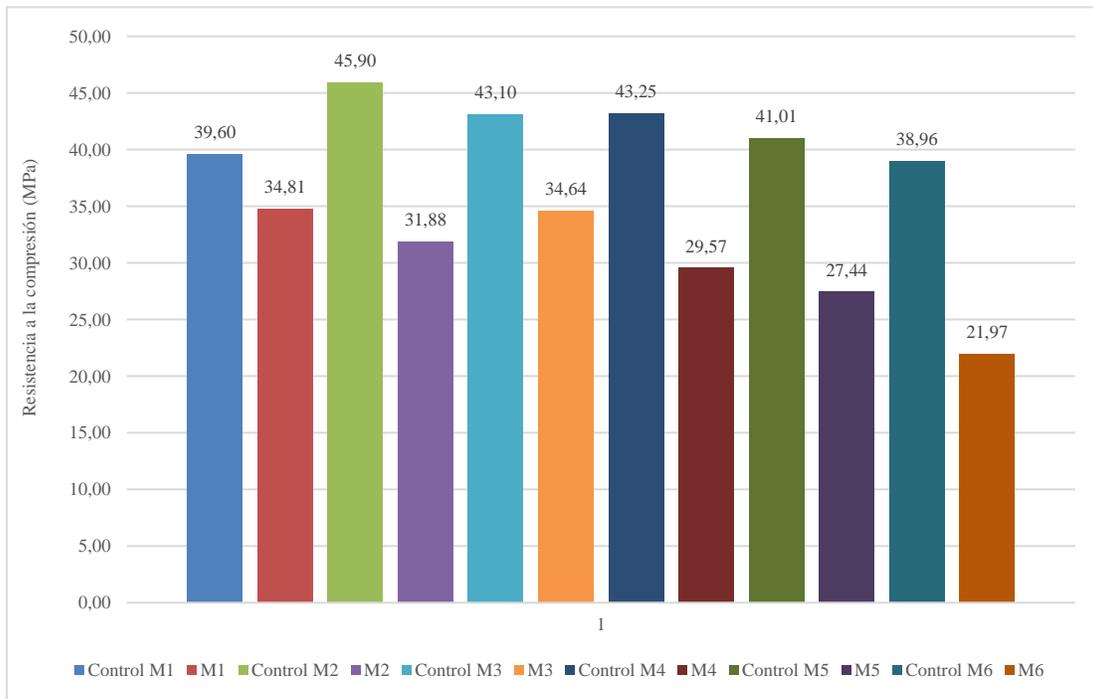


Figura 8.20. Comportamiento de muestras Carbonatadas (M) y no carbonatadas (Control M)

8.5.2.6. Aplicación de la técnica de gamma scanning (GS)

Los resultados sin procesar obtenidos para la probeta Q6 pueden ser observados en la Fig. 8.21, donde las mediciones a inicio y fin del perfil GS se realizaron sin presencia de concreto en la trayectoria entre la fuente y el detector.

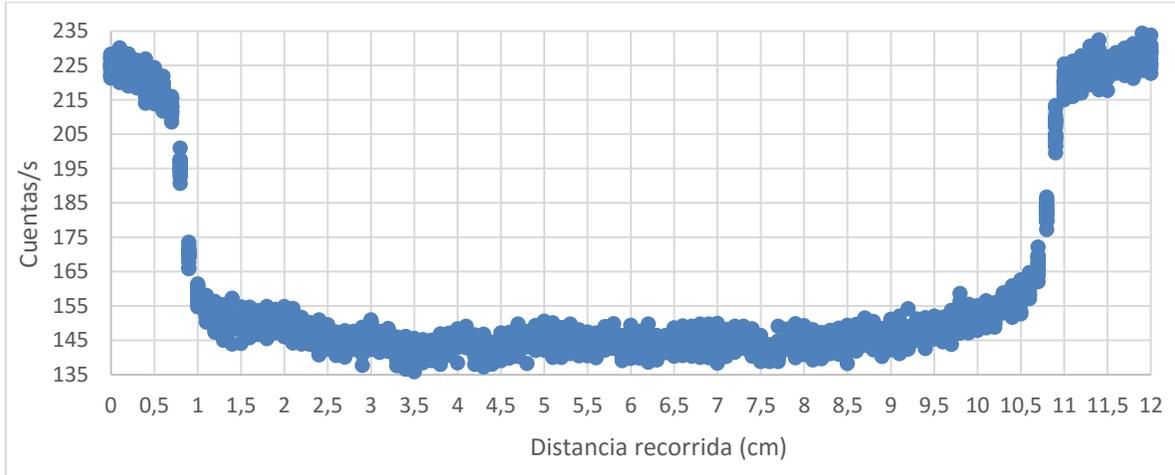


Figura 8.21. Resultados sin procesar para la probeta Q6.

Luego se eliminaron los datos que no correspondían a la matriz porosa del concreto y aquellos afectados por la transición aire-concreto y se promediaron aritméticamente los puntos de medición restantes. La Fig. 8.21 muestra el resultado de este proceso para la probeta Q6 y las Fig. 8.22 y 8.23 brindan los perfiles de atenuación de la radiación para las probetas Q1 y Q0, respectivamente.

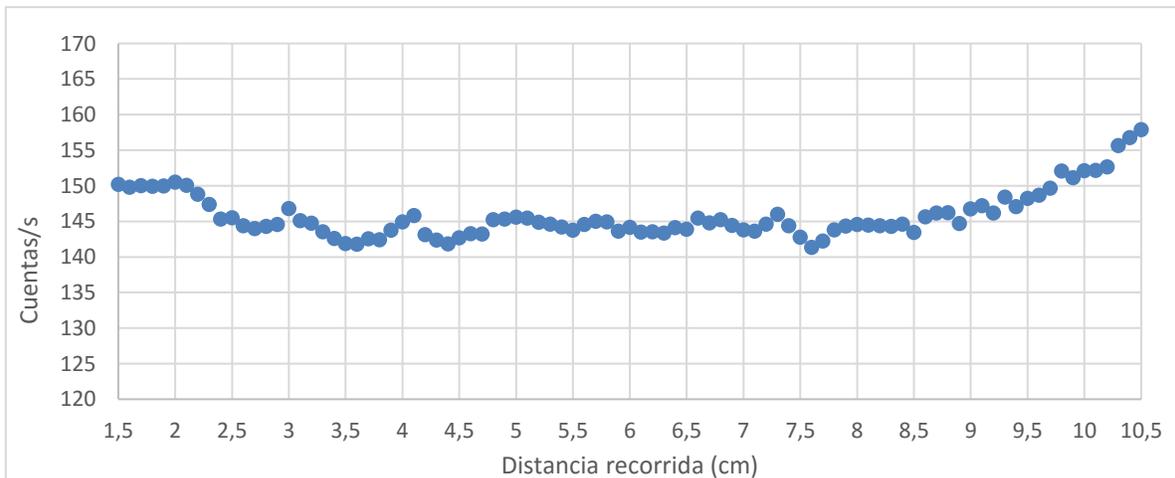


Figura 8.22. Perfiles de atenuación de la radiación, probeta Q6.

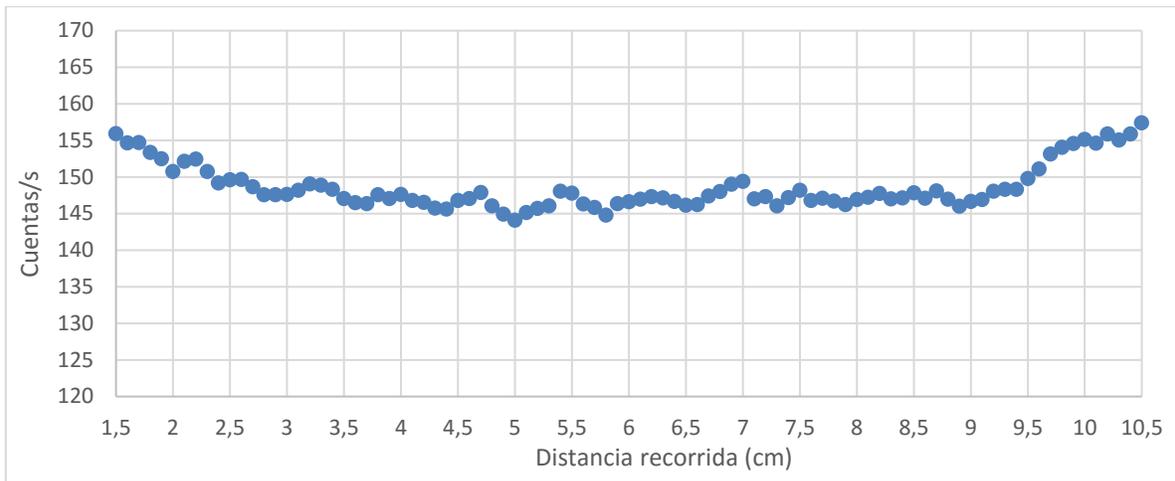


Figura 8.23. Perfiles de atenuación de la radiación, probeta Q1.

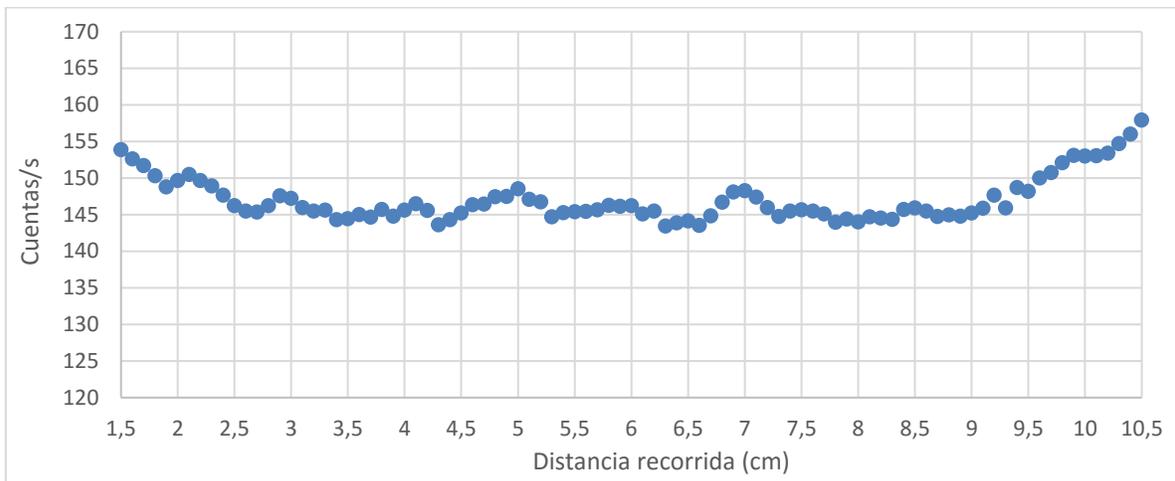


Figura 8.24. Perfiles de atenuación de la radiación, probeta Q0.

Si se analiza el comportamiento obtenido para las tres probetas, las mediciones comparten en general el mismo patrón. Comparadas entre sí, se puede notar que la probeta Q6 exhibe, en promedio, una atenuación mayor que las probetas Q0 y Q1, es decir una densidad mayor. Debido al proceso de carbonatación en dirección radial dentro de la matriz porosa del concreto, se esperaba que las mediciones en los dos bordes de las muestras Q6 fuesen iguales, situación que no se logra apreciar en los perfiles obtenidos. Este efecto puede tener su causa en el fenómeno de la apertura del haz de radiación conforme este se aleja de su fuente, lo que tendría como consecuencia que cada medición realizada sobre la superficie del material se encuentre afectada por sus alrededores. Como las variaciones de densidad debido al proceso de carbonatación son pequeñas, se presume que los errores instrumentales del sistema de colimación actual podrían enmascarar estas variaciones.

Sucesivamente, en las Fig. 8.25, 8.26, 8.27 y 8.28 se brindan los resultados de la atenuación de la radiación gamma, para los perfiles 1, 2, 3 y 4 de la probeta Q6 definidos anteriormente en el párrafo 7.8 y Fig. 7.8. Las dos líneas verticales de color gris, ubicadas respectivamente en las coordenadas 0,5 cm y 10,5 cm del eje horizontal, denotan la posición de la superficie cilíndrica de la muestra de concreto. Cada uno de los datos mostrados en las figuras anteriores es el resultado de calcular

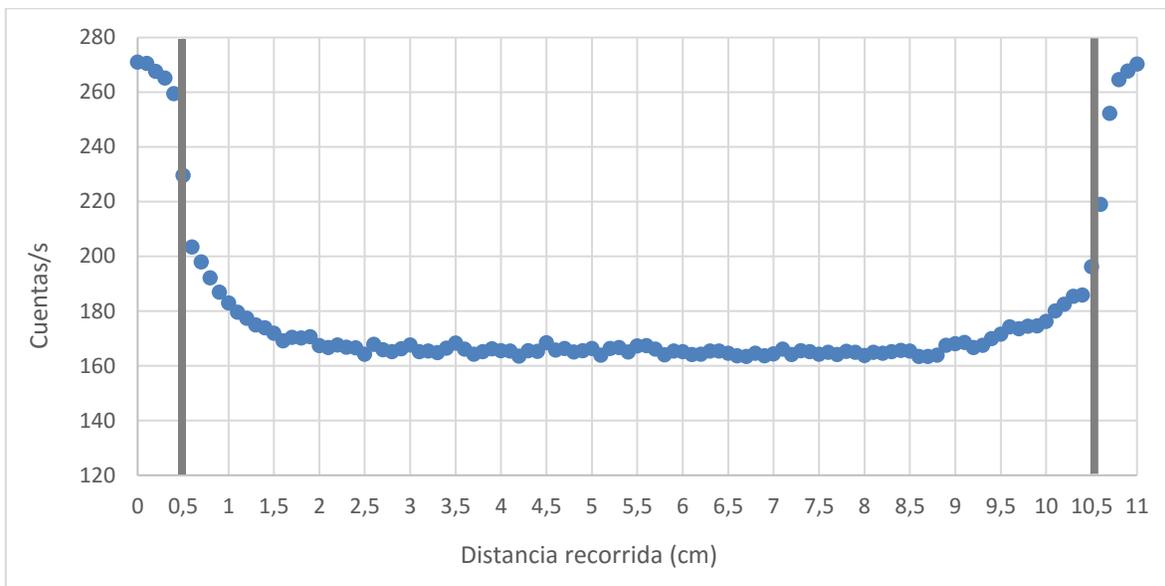


Figura 8.25. Perfil 1 de atenuación, probeta Q6.

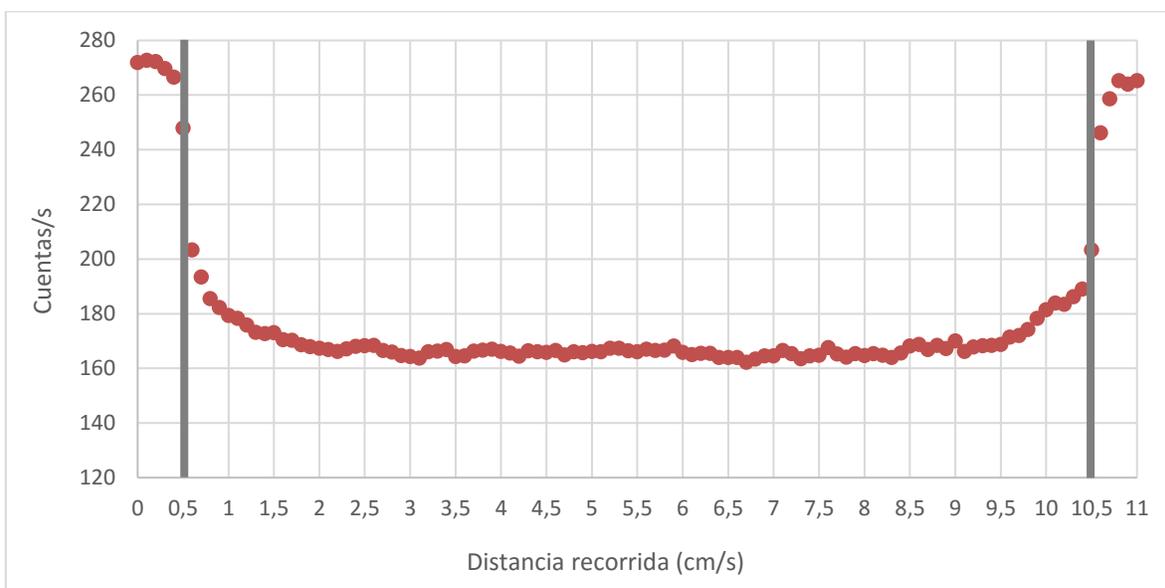


Figura 8.26. Perfil 2 de atenuación, probeta Q6.

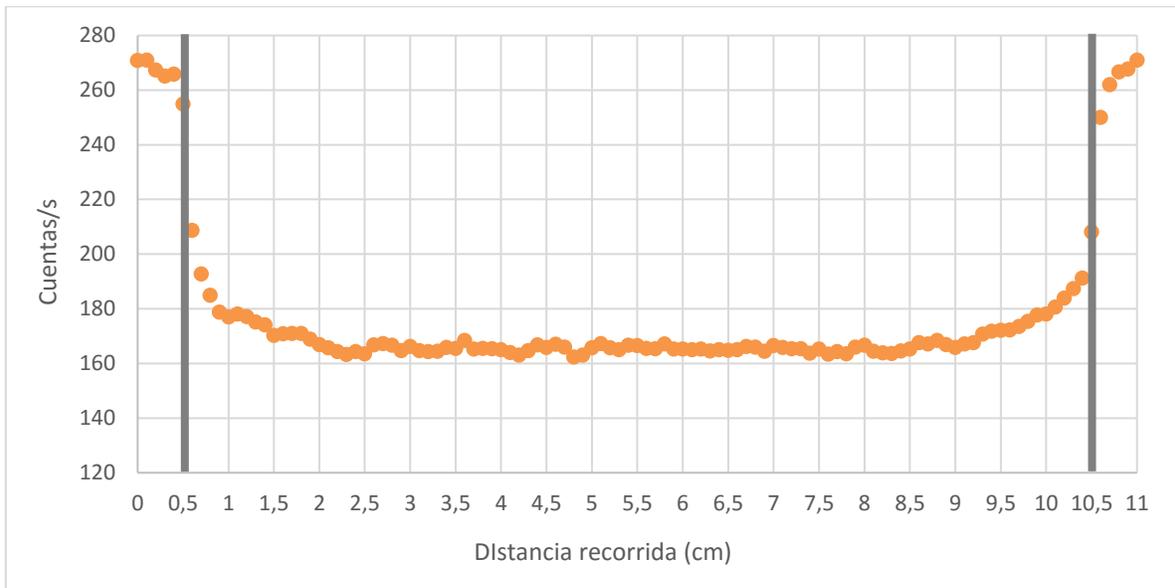


Figura 8.27. Perfil 3 de atenuación, probeta Q6.

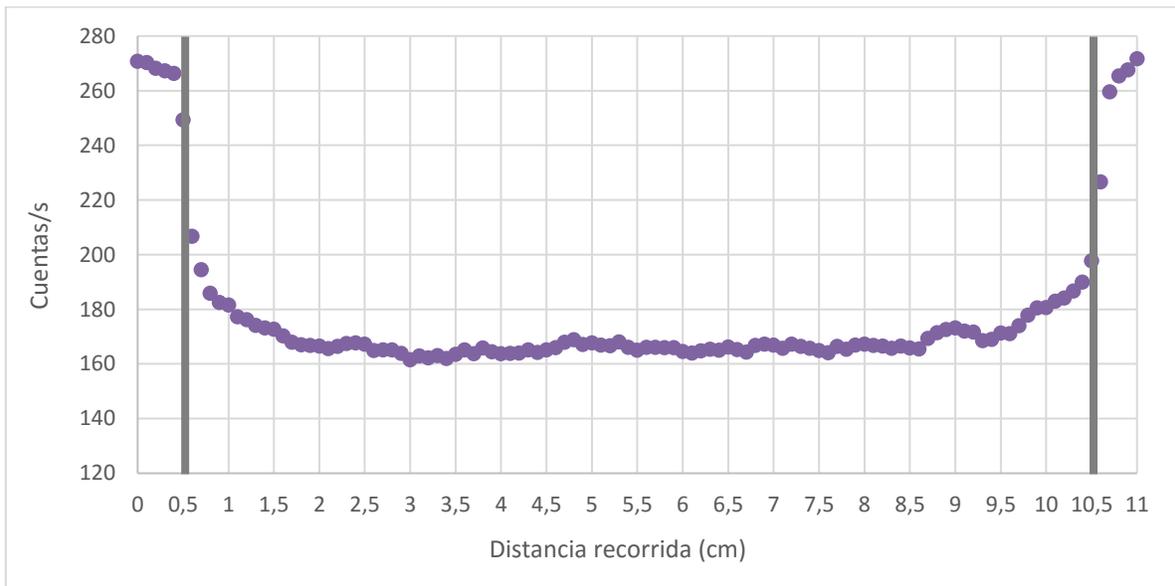


Figura 8.28. Perfil 4 de atenuación, probeta Q6.

la media aritmética de las 10 mediciones obtenidas en cada punto de medición. Analizando el gráfico de Fig. 8.29, el cual traza los cuatro perfiles simultáneamente, se observa una atenuación de la radiación gamma menor en el borde de las probetas, significando una disminución aparente de la densidad si se compara con la región interna del disco.

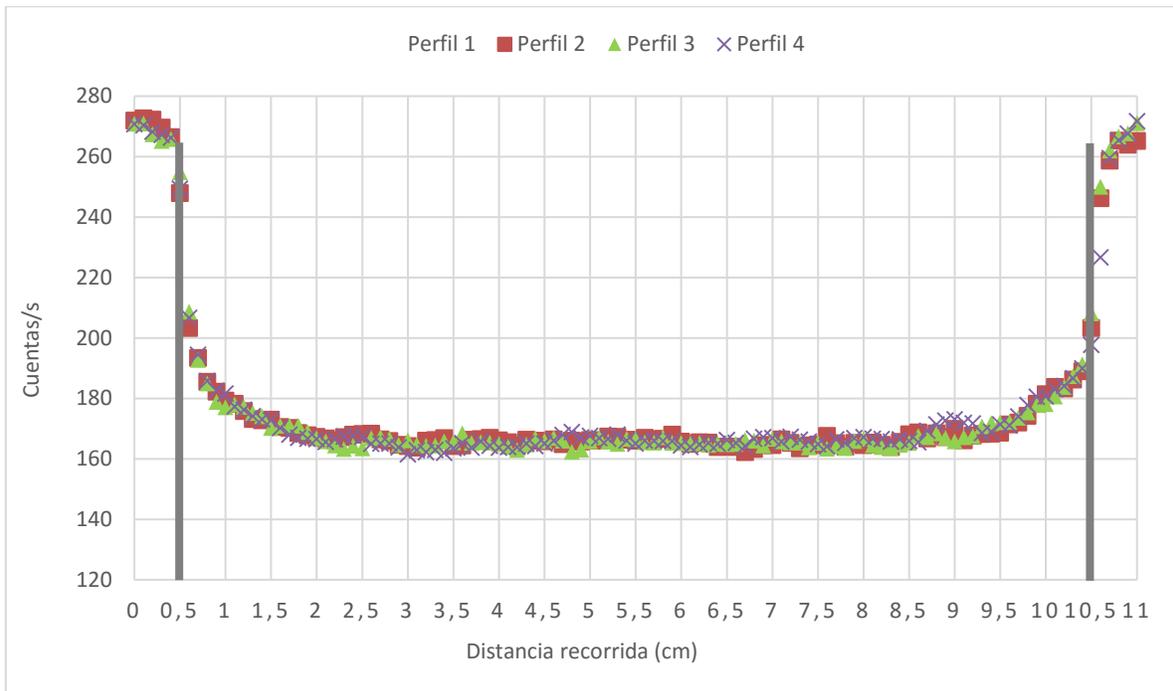


Figura 8.29. Perfiles obtenidos para la probeta Q6.

Los perfiles de atenuación obtenidos de los ensayos de la probeta Q0 se muestran en las Figs. 8.30, 8.31, 8.32 y 8.33 donde las líneas verticales de color gris en las coordenadas 0,5 cm y 10,5 cm del eje horizontal denotan siempre la posición de la pared del cilindro de concreto. Los cuatro perfiles se trazan en conjunto en el gráfico de Fig. 8.34, pudiéndose observar que la distribución de la masa es simétrica con respecto al eje axial del cilindro y que la atenuación de la radiación gamma es nuevamente menor en la región cercana a los bordes.

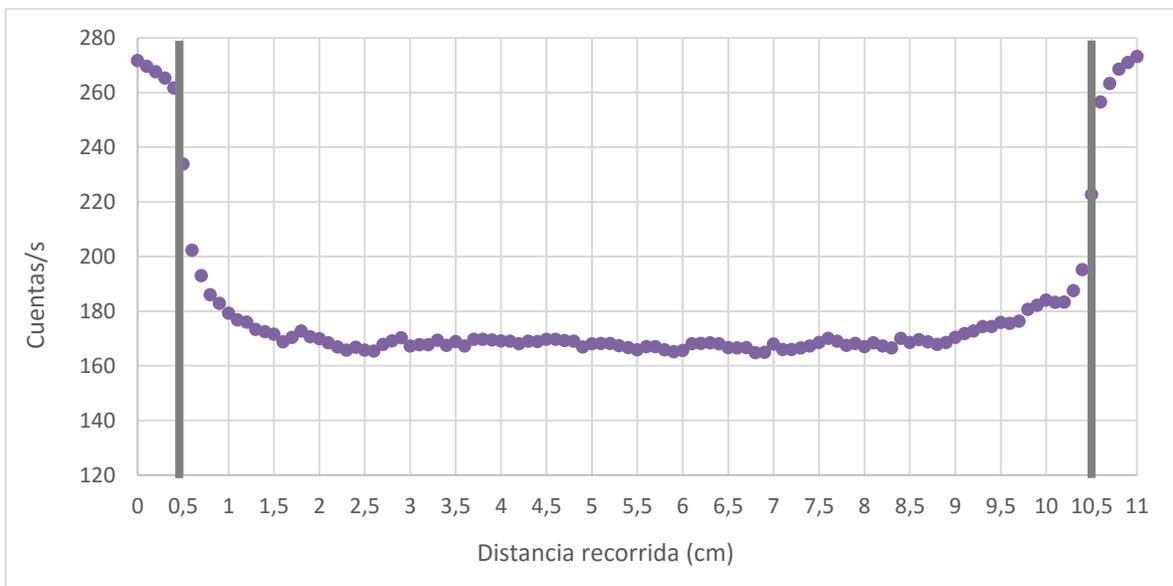


Figura 8.30. Perfil 1 de atenuación, probeta Q0.

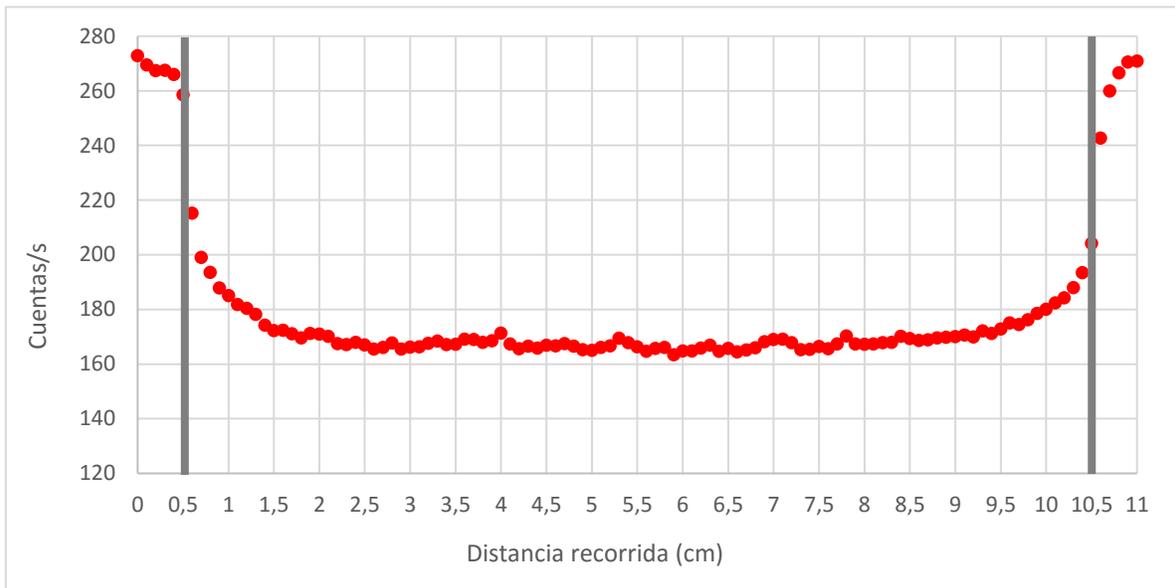


Figura 8.31. Perfil 2 de atenuación, probeta Q0.

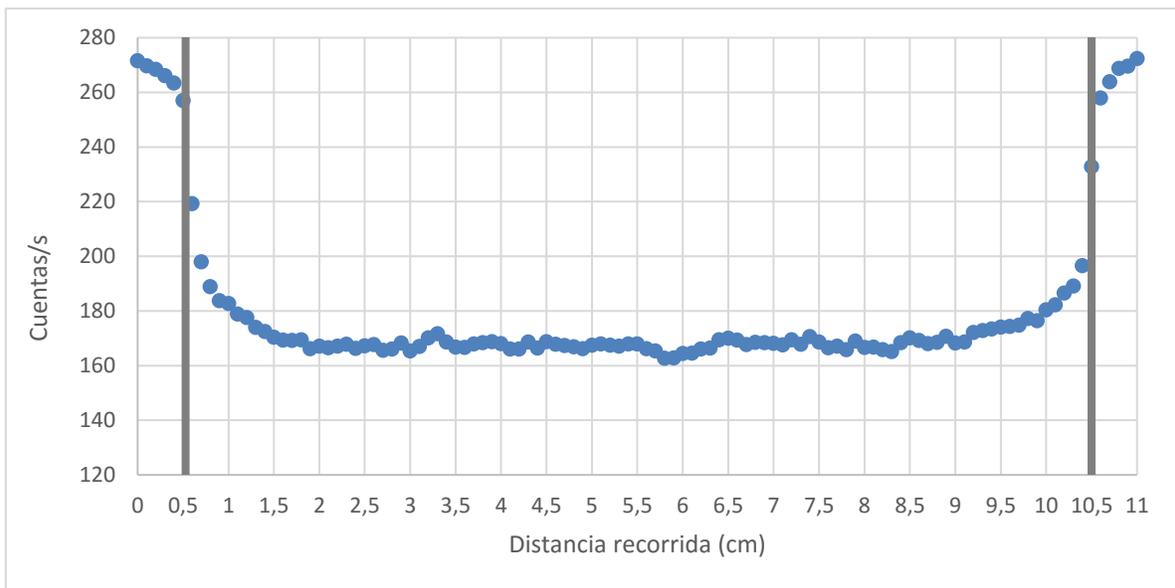


Figura 8.32. Perfil 3 de atenuación, probeta Q0.

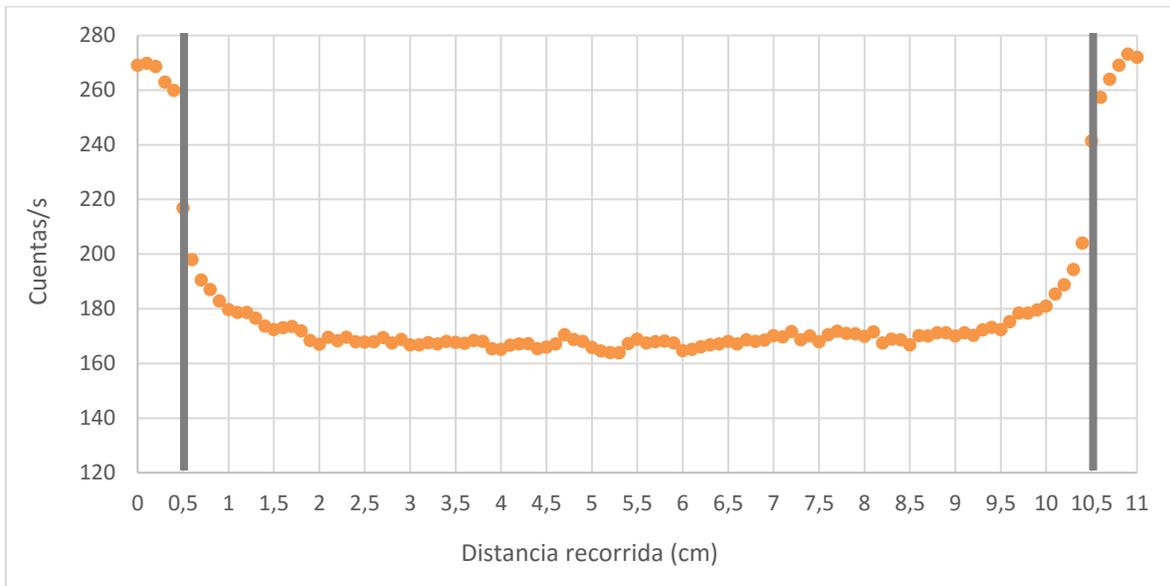


Figura 8.33. Perfil 4 de atenuación, probeta Q0.

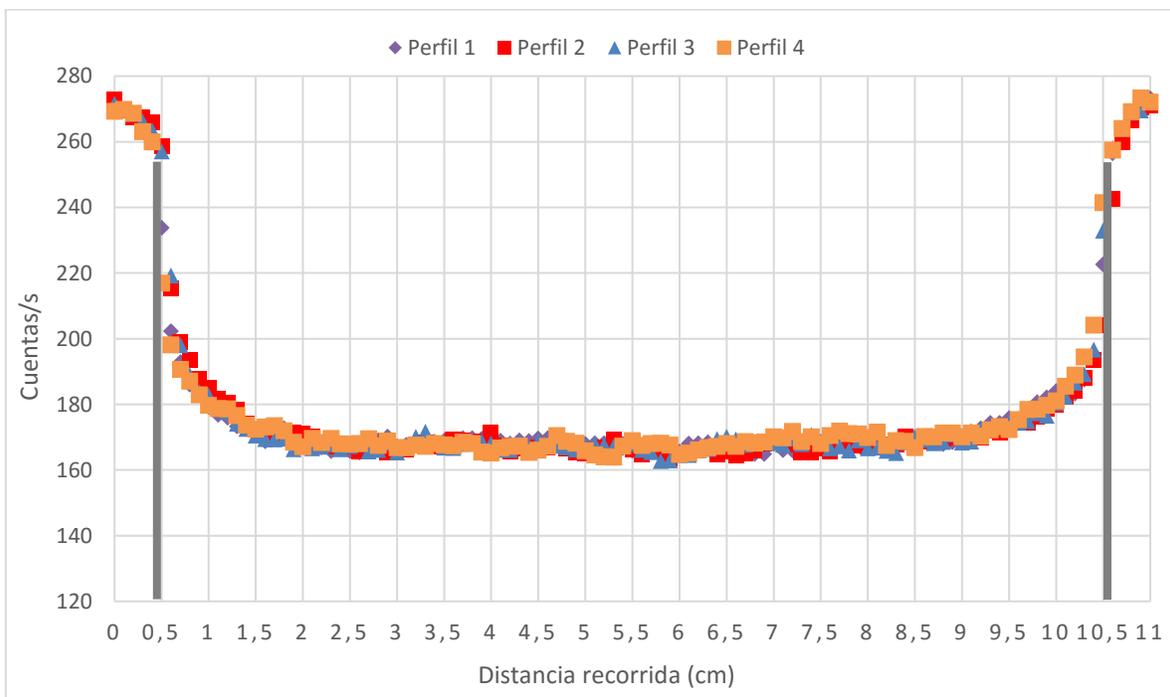


Figura 8.34. Perfiles obtenidos para la probeta Q0.

Sucesivamente, con el propósito de comparar los perfiles de atenuación de la radiación de la probeta Q0 no carbonatada con los de Q6 que presenta 44 días de carbonatación, se trazan en Fig. 8.35 las medias aritméticas de los 4 perfiles de ambas muestras. Para la probeta Q6, el espesor de la región de borde cercana a la pared del cilindro, donde se observa una disminución la atenuación y por lo tanto de la densidad, es aproximadamente de 1,5 cm. Para la misma probeta carbonatada Q6, los valores

de la profundidad de carbonatación revelados mediante el uso del indicador fenolftaleína y reportados en la Fig. 8.15 anterior, arrojan un valor próximo a 1,5 cm, lo cual es coincidente con la distancia determinada con la técnica de escaneo GS. Sin embargo, el mismo patrón se presenta para el valor medio de la atenuación de la probeta no carbonatada Q0, lo cual parece excluir así la posibilidad de discriminar el fenómeno de carbonatación. Una posible interpretación de la disminución de la densidad para ambas muestras se debería relacionar con mecanismos físicos presentes en la fabricación de las muestras en los moldes.

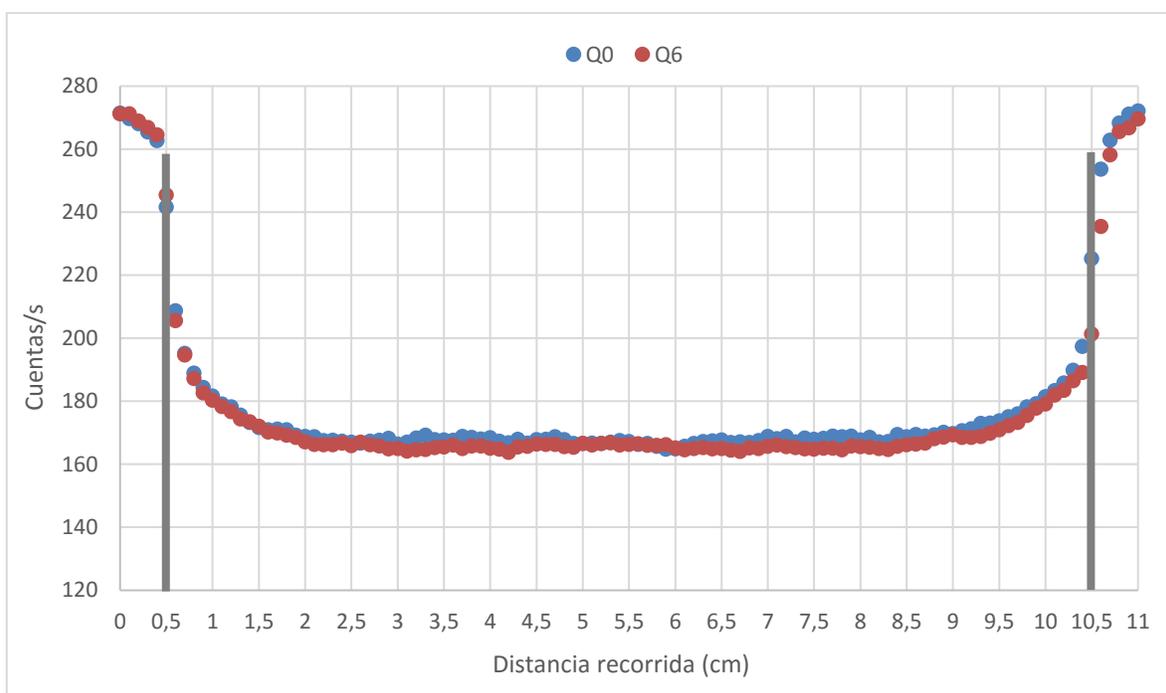


Figura 8.35. Valores medios de los perfiles de atenuación de las muestra Q0 no carbonatada y Q6 carbonatada por 44 días.

Los resultados obtenidos con la técnica de escaneo usando radiación gamma son prometedores, sin embargo deben ser confirmados e interpretados en función de las características del concreto ensayado y de los productos de la reacción química de carbonatación. Villain et al. [Vil07] reportan un aumento de la densidad en las probetas carbonatadas, cuando la reacción principal de carbonatación determina la sustitución del hidróxido de calcio con calcita. De acuerdo a la revisión del estado del arte, no parece que hayan sido reportados otros trabajos en este tema, por lo cual merece una profundización.

8.5.2.7. Radiografías con rayos X

Las Figs. 8.36 y 8.37 brindan las imágenes radiográficas de los discos de concreto Q0 y Q6 analizados anteriormente mediante las técnicas GS. La calidad de la imagen obtenida para la probeta Q6, que ha sufrido un proceso de carbonatación de 44 días en cámara acelerada, no permite distinguir una región exterior con alguna diferencia sustancial respecto de la región interna. La aparente disminución de color en el borde externo de la probeta, se repite también en la muestra no carbonatada y por lo tanto no parece discriminar algún efecto particular.

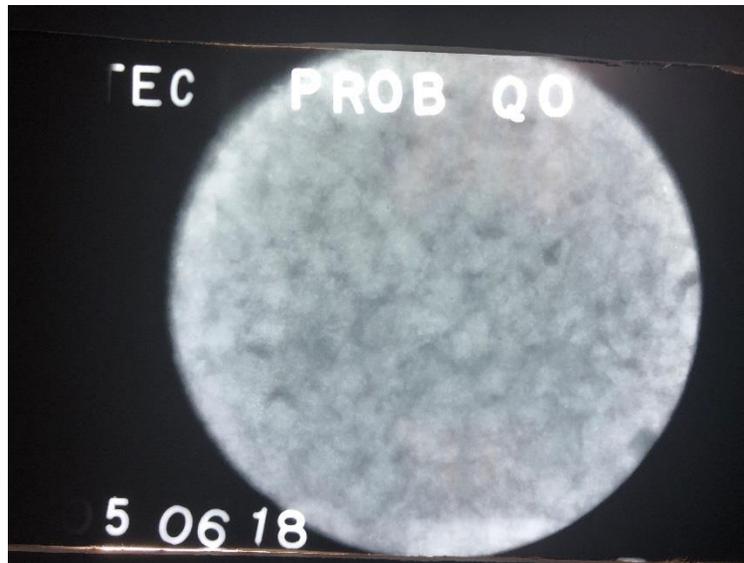


Figura 8.36. Imagen radiográfica de la probeta Q0, sin carbonatar.

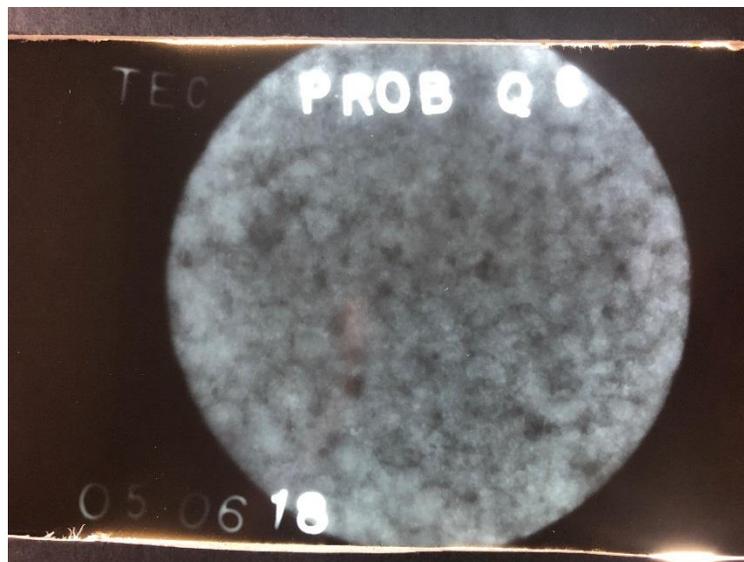


Figura 8.37. Imagen radiográfica de la probeta Q6, carbonatada por 44 días.

8.6. Modelación y simulación el proceso de carbonatación en el concreto.

La Fig. 8.38 brinda la geometría de la sección rectangular del modelo de concreto con las dimensiones relativas, obtenida aplicando las condiciones de simetría a una muestra cilíndrica inicial.

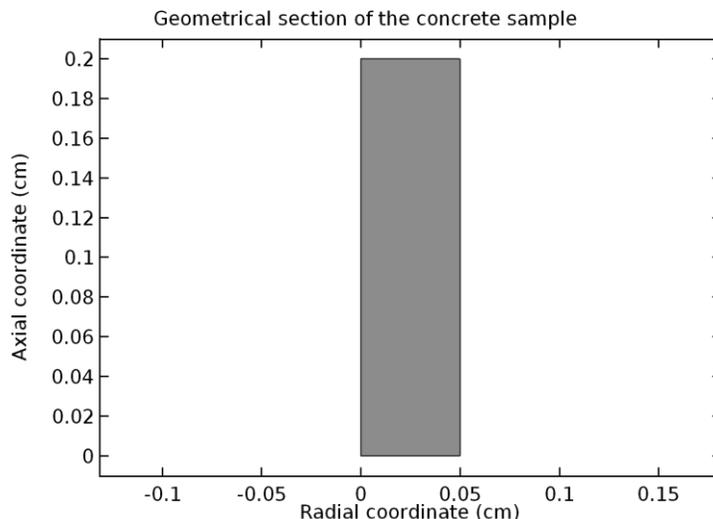


Figura 8.38. Sección geométrica de la muestra de concreto y dimensiones.

En la Tabla 8.18 se brindan los valores de masa molecular, densidad y coeficiente de difusión en el concreto poroso de las especies consideradas para la reacción de carbonatación de la Ec. 6.8.

Tabla 8.18. Masa molar y densidad de las especies químicas de la reacción de carbonatación 6.8 modelada.

Especie	Masa molar (g/mol)	Densidad (kg/m ³)	Coefficiente de difusión (m ² /s)
CO ₂ (gas)	44.01	$p \cdot 0.04401 / (8.31451 \cdot T)$	1×10^{-8}
Ca(OH) ₂ (sólido)	74.09	2211	1×10^{-9}
CaCO ₃ (sólido)	100.09	2710	1×10^{-9}
H ₂ O (líquido)	18.02	1000	solvente

Nota: El CO₂ se considera gas ideal a la presión p (Pa) y temperatura T (K).

Asumiendo condiciones similares a las de las futuras actividades experimentales, se fijan sucesivamente los valores de borde e iniciales para las especies químicas del modelo difusivo-reactivo desarrollado. Para las condiciones de borde, además que la de simetría a lo largo del eje z , se fijan el valor de la concentración del gas CO₂ igual a 10,22 mol/m³ en la pared horizontal del cilindro, condiciones de flujo difusivo nulo de las especies Ca(OH)₂ y Ca(OH)₂ en la misma superficie y condiciones de impermeabilidad en las dos bases horizontales del cilindro. Las condiciones iniciales son de 150 mol/m³ para el Ca(OH)₂ y concentraciones nula de CO₂ y CaCO₃. El modelo se asume isotérmico a 25 °C, la presión es la atmosférica y para el medio poroso se considera un valor de porosidad constante de 0,25 y una saturación de agua constante e igual a 0,27. La Fig. 8.39 muestra

la malla computacional, donde se puede observar el refinamiento en las regiones con gradientes iniciales de concentración, generando un modelo con un número de grados de libertad igual aproximadamente a 32000.

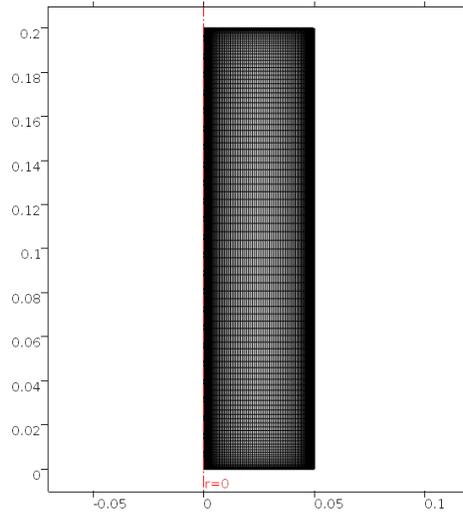


Figura 8.39. Malla computacional del modelo de carbonatación.

Los valores de la concentración de calcita y de hidróxido de calcio, después de 28 días de carbonatación del concreto en condiciones aceleradas, se muestran en las Figs. 8.40 y 8.41, respectivamente.

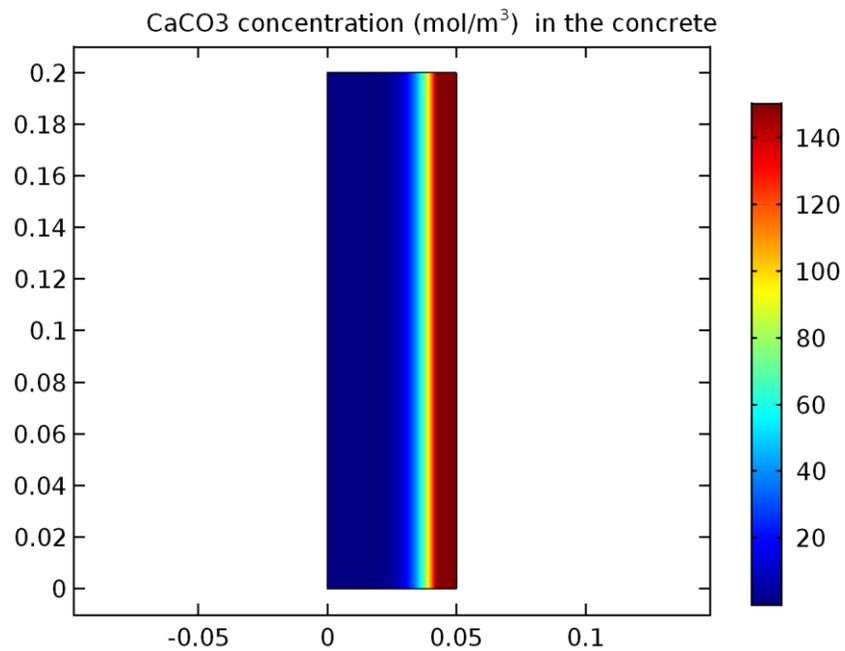


Figura 8.40. Valores de concentración de CaCO₃ en el concreto, después de 28 días de carbonatación.

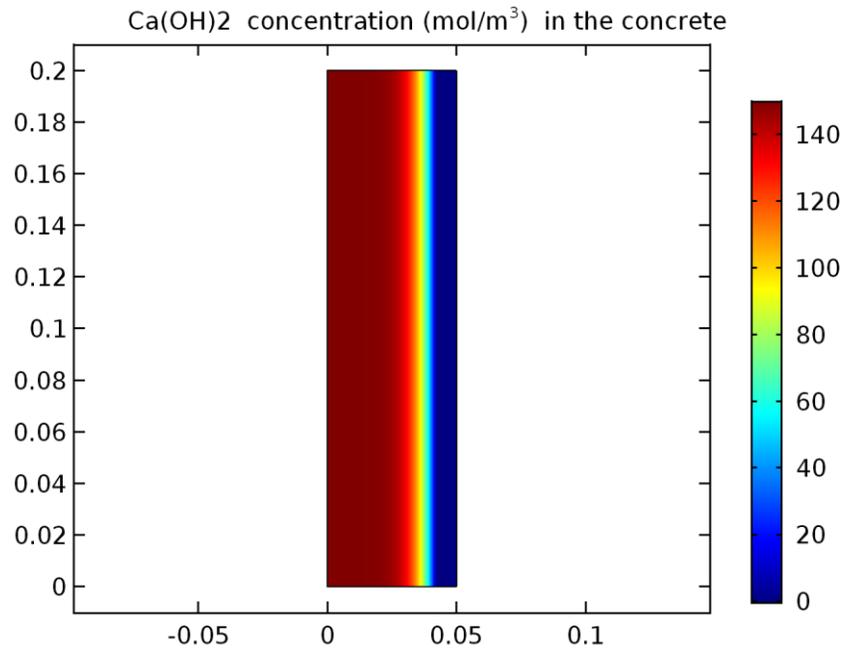


Figura 8.41. Valores de concentración de Ca(OH)₂ en el concreto, después de 28 días de carbonatación.

Siempre para un tiempo de carbonatación de 28 días, la Fig. 8.42 brinda la interfaz que separa la región carbonatada de la no carbonatada, mediante los perfiles de concentración espaciales de las mismas especies CaCO₃ y Ca(OH)₂. También en la Fig. 8.42 se traza el perfil de concentración del gas CO₂, mediante el cual se observa que el gas está ya presente con concentraciones importantes en proximidad del frente de carbonatación, permitiendo así que se desarrolle la reacción química de carbonatación. De acuerdo al gráfico de Fig. 8.42, el frente de carbonatación se localiza aproximadamente a una coordenada radial igual a 3,8 cm, es decir a una distancia de 1,2 cm de la superficie exterior de la muestra de concreto cilíndrica. Los valores de concentraciones adimensional del gas CO₂ se aprecian mejor en el gráfico de Fig. 8.43 en el cual se evidencian valores bajos en la región próxima al frente de carbonatación, siendo que el gas que ha difundido es consumido por la reacción química.

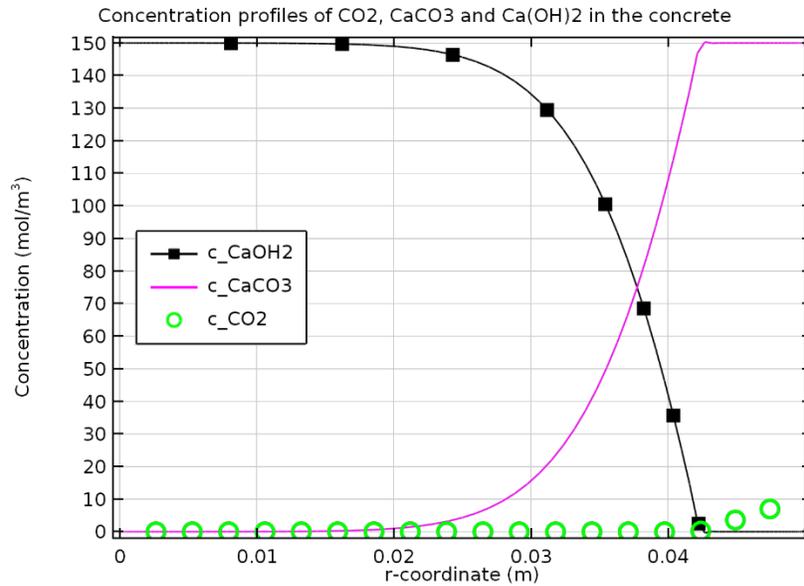


Figura 8.42. Perfiles de concentración de CaCO₃, Ca(OH)₂ y CO₂, en el concreto, después de 28 días de carbonatación.

En los gráficos sucesivos de Figs. 8.44 y 8.45 se trazan los perfiles de concentración después de 2 días de carbonatación y 44 días de carbonatación, respectivamente. Es evidente el desarrollo temporal del frente de carbonatación, que en este caso se puede estimar como la intersección entre las curvas de concentración de las especies CaCO₃ y Ca(OH)₂. Analizando los perfiles de estas figuras, se puede estimar una profundidad de carbonatación aproximadamente de 3,5 mm para 2 días, 13 mm para 28 días y 16 mm para 44 días, respectivamente.

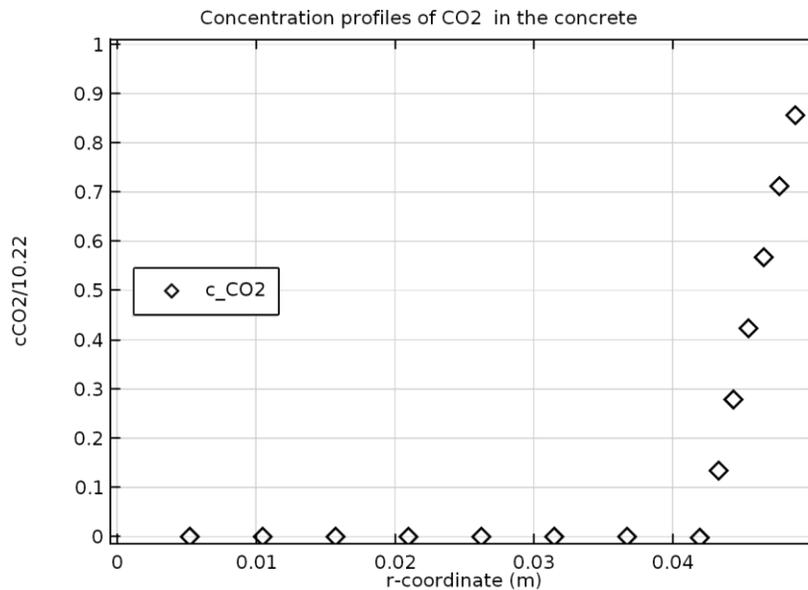


Figura 8.43. Perfil de concentración adimensional del gas CO₂ en el concreto, después de 28 días de carbonatación.

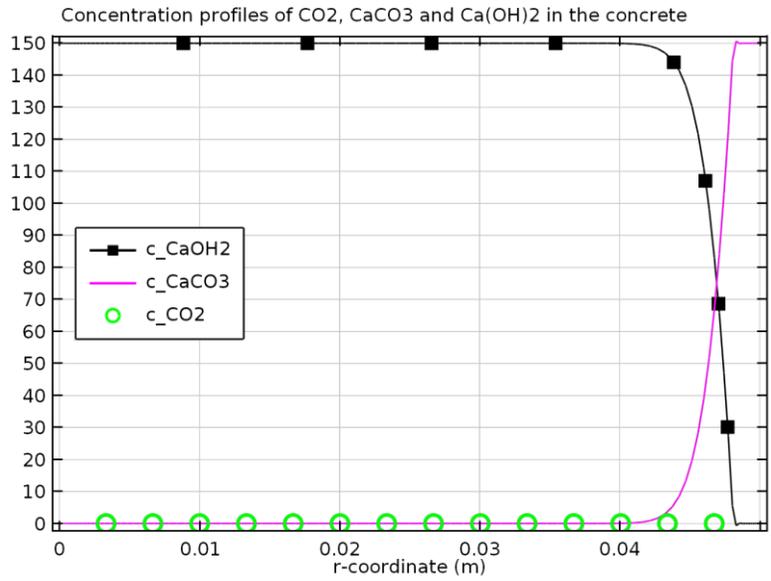


Figura 8.44. Perfiles de concentración de CaCO₃, Ca(OH)₂ y CO₂, en el concreto, después de 2 días de carbonatación.

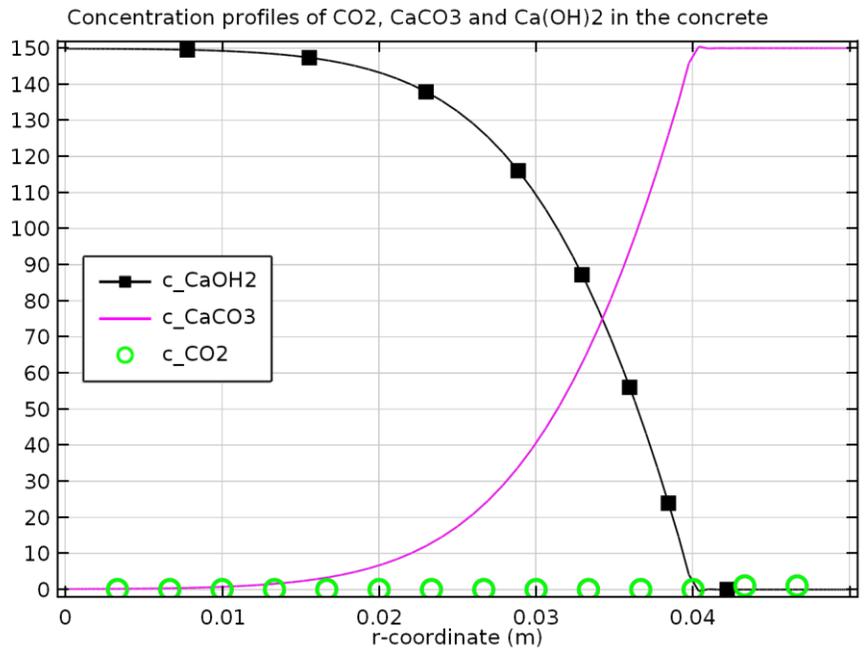


Figura 8.45. Perfiles de concentración de CaCO₃, Ca(OH)₂ y CO₂, en el concreto, después de 44 días de carbonatación.

9. Discusión y conclusiones

Para la realización del concreto hidráulico se utilizó arena de río, piedra quintilla y como agente aglutinante, cemento hidráulico MP/A-28, con una dosificación teórica resultante de 1: 1,80: 2,37 (Cemento Hidráulico: Arena: Piedra) y una relación agua/ Cemento (A/C) de 0,52, para alcanzar una resistencia de diseño de 20,59 MPa (210 kg/cm^2) a 28 días ($f'c$) como se muestra en la Tabla 8.6. Del análisis difractométrico sobre los agregados se puede indicar que en el agregado fino tiene una porción importante de Anortita (aluminosilicato de calcio) y en los agregados gruesos se encuentran sobre todo minerales como la Diopside ($\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$) y la Andesina ($(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$). En el caso del cemento se determinó la presencia de un silicato de calcio y un óxido de aluminio (tridimita) lo cual es consistente con los análisis de las fichas proporcionados por el fabricante, y que está en concordancia de un cemento puzolánico.

En cuanto a la preparación de los especímenes de estudio en total se elaboraron 100 muestras cilíndricas de 100 x 200 mm, de las cuales, dos grupos de 25 unidades (CP-01 y CP-02) fueron analizadas en la presente campaña experimental, las restantes quedan como testigos del proceso.

Los especímenes de concreto hidráulico en estudio logran sobrepasar a los 90 días la resistencia de diseño, obteniendo en promedio una resistencia de 38,60 MPa, como se muestra en la Tabla 8.16, este valor se utiliza con la finalidad de tener un punto control de las variaciones de resistencia entre las muestras de control (no carbonatadas) y las muestras expuestas a las diferentes concentraciones de CO_2 y humedad relativa.

De acuerdo a los resultados obtenidos con respecto a las resistencias a la compresión entre las muestras carbonatadas y las que no estuvieron expuestas a este proceso, se evidencia según los datos mostrados tanto en la Tabla 8.17 como en la Fig. 8.20 que las muestras carbonatadas presentan una variación de la resistencia (disminución) en promedio de 28,43% entre las muestras, lo que significa pasar de una resistencia de 47,97 MPa en promedio de las muestras no carbonatadas a 30,05 MPa en las muestras carbonatadas. Lo anterior evidencia que el proceso de carbonatación para este concreto hidráulico en particular representa una degradación de las propiedades mecánicas del concreto en estudio.

Analizando los resultados de la campaña experimental se puede hacer una constatación de los métodos analíticos que posteriormente se realizarían en las pruebas definitivas. Aunque no se tenía control de la cantidad de CO_2 adicionando, ni de la humedad, ni temperatura, se pudo estimar el grado de carbonatación presente en una muestra al exponerla durante una semana, como se observa en la Fig. 8.11, lo que también permitió validar el ensayo con fenolftaleína. Este ensayo preliminar también permitió determinar la ubicación de los especímenes en la cámara, con el objetivo de contar con un frente de carbonatación radial o axial. Se decidió carbonatar en dirección radial para estudiar el efecto de recubrimiento que produciría el CaCO_3 y su efecto sobre las propiedades mecánicas del concreto. También se evaluó la efectividad del sellado de los especímenes (Fig. 9.1), la cual se realizó con una resina epóxica y una lámina de aluminio en la cara no carbonatada, dando como resultado que dicha membrana fue impermeable hacia el ingreso de CO_2 .



Figura 9.1 Colocación y sellado de la muestras para ensayo

La toma de la muestra para los análisis también representó un problema adicional, porque inicialmente se iba a realizar por medio de raspado de la probeta mediante torneado. Esto produjo gran desgaste de la herramienta y una contaminación del material en estudio, sumado a que la cuchilla producía un desprendimiento de material y por consiguiente se adicionaba muestra que no correspondía a la profundidad estudiada. Se probó la posibilidad de extraerla por medio de perforación, dando muy buenos resultados, aunque por el diámetro de la broca, la muestra representa un valor promedio de la composición en un radio de aproximadamente 2 mm de la profundidad estudiada (fig. 8.11 (c)).

Con respecto a los resultados de los análisis difractométricos, sobre los ensayos preliminares, se pudo constatar la presencia de carbonato de calcio en la parte exterior de la muestra, aspecto esperable por tratarse de la zona de mayor grado de carbonatación, y en la parte interna se encontró la presencia de Anortita (aluminio silicato de calcio) y portlantita (hidróxido de calcio), lo que era de esperar, por lo menos este segundo componente, según las informaciones bibliográficas.

Para el caso de los análisis termogravimétricos sobre los ensayos preliminares se puede observar en la Fig. 8.13, cómo se presenta una variación de peso en un punto cercano a los 700°C, lo que es consecuente con la descomposición de la calcita, ya que a esa temperatura se genera la reacción $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Esto representa una variación de la masa generada por la reacción y desprendimiento de bióxido de carbono; y es por consiguiente un indicativo de la presencia de carbonato de calcio, generado por el proceso de carbonatación. Por otro lado en la zona de los 400-500 °C se muestra la pérdida de agua correspondiente a la presencia de la Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

En cuanto a la construcción de la cámara para la realización de las pruebas de carbonatación resulto en un gran reto, ya que a pesar de que inicialmente se había planteado la modificación de una cámara de corrosión, se decidió construir una nueva cámara con el mismo presupuesto planteado inicialmente. Esto significo planear bien los recursos y solicitar ayuda al CIEMTEC de manera que un técnico contribuyera con la soldadura de las piezas metálicas, mientras que el montaje se realizó por medio de los investigadores y asistentes. Para el diseño se partió de informaciones expuestas en los artículos estudiados, donde se plantean diferentes formas para humectar; colocación de las especímenes para lograr condiciones similares en todos los puntos de la cámara; tamaños y distribución de componentes como los ventiladores, suministro de gas, etc. Ante esta perspectiva se diseñó con criterios propios del grupo investigador, sobre todo finalidad de que este recinto pudiese ser versátil ante la posibilidad de nuevos estudios.

La selección de los materiales para la construcción de la misma obedeció al criterio de darle resistencia química, para que pueda resistir condiciones ambientales de una atmosfera de agresividad mediana a alta; por eso se construyó la estructura base con acero inoxidable AISI 304, el cual presenta una adecuada resistencia al medio ambiente; este también se le pasivo después de haber sido soldado, para mejorarle su resistencia.

El volumen aproximado de 1,68m³ se distribuye en tres niveles para la exposición y que podría albergar hasta 72 especímenes de 100 x 200mm.

Se instaló un ventilador para mantener las condiciones y que exista homogeneidad de CO₂ en cualquier punto de la cámara. Para verificar los movimientos de gases de dentro de la cámara se realizó ensayos con humo, los que permitió ubicar el ventilador en una posición adecuada, además de seleccionar uno con la potencia adecuada, ya que las primeras pruebas se realizaron con dos ventiladores de computadora, y no se lograron los resultados adecuados.

Se requirió además incorporarle un sistema de humectación para mantener las condiciones establecidas de humedad dentro de la cámara. El esquema de sistema se muestra en la Fig. 8.4. Se debió hacer varias pruebas para lograr ajustar adecuadamente el sistema. En este sistema, el aire venido del compresor, se pasa por un circuito constituido de una trampa de aceite, una trampa de humedad y un desecador con arena de sílice. Luego se bifurca en dos líneas, una se pasa directamente a la válvula reguladora y la otra se pasa a un dispositivo de humectación, donde se hace borbotear el aire en un cilindro de agua, para que se humedezca; la salida de este aire humedecido se pasa a la válvula reguladora, que automáticamente ajusta los valores de aire húmedo y aire seco para proporcionar la humedad requerida para el ensayo, que en nuestro caso fue de 65%. En la Fig. 9.2 se muestran algunos datos del sistema de control de humedad donde se evidencia la estabilidad del promedio del monitoreo de humedad en la cámara. Cabe mencionar aquí, que al inicio se dificultó la puesta a punto del sistema, ya que cuando existía algún corte eléctrico producto de una tormenta o una interrupción por mantenimiento, en la noche o en un fin de semana, todo el sistema se salía de servicio y se requería recalcular los tiempos de exposición. Esto se solucionó para las pruebas definitivas con la incorporación de una UPS que daba independencia del sistema por algunas horas.

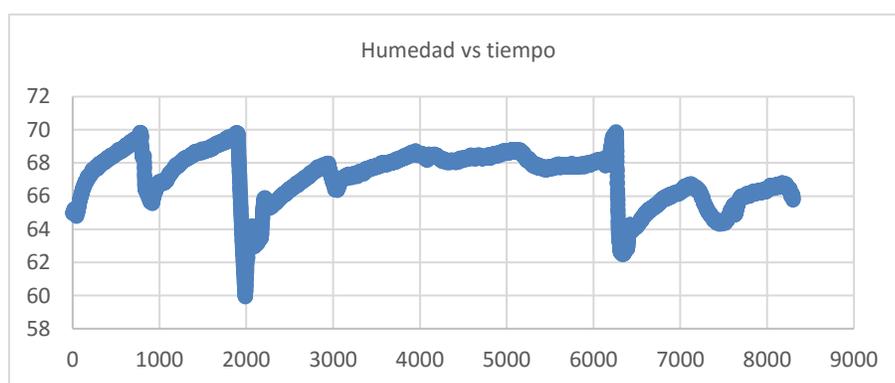


Figura 9.2. Grafico de control de humedad de la cámara en el tiempo

Por otro lado, una vez puesta en marcha la cámara de carbonatación se desarrollaron los ensayos definitivos sobre los especímenes de concreto. Para los ensayos realizados con fenolftaleína, Fig. 8.14 y Tabla 8.15, se pudo medir el avance de la carbonatación en el tiempo, brindando información fundamental para validar los resultados del modelo computacional.

Como se puede observar la carbonatación tiene un comportamiento donde al inicio se produce un grado mayor de carbonatación debido al efecto de la difusión del gas a través de los poros. La velocidad de carbonatación va disminuyendo siguiendo una relación del tipo $X=b\sqrt{t}$, donde X es la profundidad de carbonatación, donde b es el coeficiente de carbonatación y t el tiempo de carbonatación [Pap89].

Los resultados de los análisis difractométricos se muestran resumidos, para la probeta de 28 días, en la Fig. 8.16; y todos los difractogramas de todas las demás a diferentes profundidades se muestran en el apéndice 3. De estos análisis se puede observar que los componentes principales del concreto son los aluminosilicatos, principalmente la Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y la albita ($(\text{NaAlSi}_3\text{O}_8)$), en las zonas no carbonatadas; y la calcita (CaCO_3) sola o combinadas con la Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) en la zona carbonatada. Esto resulta un poco contradictorio con lo establecido en la mayoría de los trabajos bibliográficos estudiados donde se colocaba principalmente a la portlandita como el compuesto que proporciona el óxido de calcio para el proceso de carbonatación. Sin embargo hay algunos trabajos que ubican a algunos compuestos aluminosilicatos como portadores del óxido de calcio [Pap91b] y denominados C-H-S (Silicato de calcio hidratado), pero no así la Anortita. Esta variación en composición puede deberse a la presencia Anortita en el agregado fino utilizado para la elaboración del concreto en estudio (Apéndice 3)

Con los resultados de los análisis termogravimétricos, se logra determinar la variación de la cantidad de calcita en profundidad para la muestra con 44 días de exposición. Esto confirma lo obtenido en los otros ensayos. Existe una pequeña variación entre los valores de las profundidades de 15 y 20 mm, pero esto se puede relacionar con el proceso mismo de obtención de la muestra cómo se explicó en la sección de los ensayos preliminares ensayos preliminares.

Finalmente, con respecto a los resultados obtenidos aplicando la técnica con FTIR se confirma un aumento en la cantidad de carbonatos para las secciones externas de los especímenes de estudio (como se observa en la Fig.8.18 y 8.19), en estas crecen las señales entre 1400-1450 cm^{-1} y cerca de 875 cm^{-1} asociadas con carbonatos, donde se pasa de un enlace de tipo C=O a un enlace C-O. Sin embargo, aunque en algunas de las muestras la tendencia no es clara o alguna(s) muestra(s) se encuentran fuera de lo esperado; si se puede observar o confirmar el crecimiento del grado de carbonatación y por consiguiente la concentración del CaCO_3 , a medida que se profundiza en la muestra carbonatada, lo que resulta consecuente con los análisis de difracción y TGA.

Validación del modelo computacional

Las actividades experimentales llevadas a cabo para el proceso de carbonatación del concreto, que han sido descritas en el capítulo anterior, han permitido obtener una serie de datos experimentales de suma importancia para el estudio de este proceso. Las Fig. 8.15 que se refiere al avance del frente de carbonatación en el tiempo medido con el uso del indicador fenolftaleína, confirma que el mecanismo de carbonatación modifica el pH de las muestras de concreto, en cuanto las reacciones de carbonatación cambian el ambiente de básico a ácido en la región carbonatada. Paralelamente, los análisis difractométricos desarrollados mediante el uso de difracción de rayos X, evidencian la formación de calcita en la misma área carbonatada, fenómeno que va extendiéndose en el interior de las muestras, como se puede apreciar en la Fig. 8.16.

Los resultados anteriores permiten concluir, en una primera instancia, que los ensayos experimentales realizados en cámara de carbonatación acelerada han sido muy efectivos para crear las condiciones de desarrollo de las reacciones químicas de carbonatación en las muestras, dentro de los tiempos de proceso estimados del estado del arte. Igualmente, las técnicas de medición aplicadas han sido exitosas para la obtención de los datos experimentales necesarios para validar el modelo computacional. En este caso, la curva de Fig. 8.15 que brinda la posición de la interfaz que separa el área externa carbonatada desde la región interior donde aún el proceso no ha alcanzado valores sustanciales, representa un resultado fundamental para evaluar la efectividad del modelo computacional.

De acuerdo a los resultados computacionales de Fig. 8.36, el frente de carbonatación es de 12,2 mm después de 28 días de ensayos en la cámara acelerada, siendo de 3,2 mm a los 2 días y de 15,8 mm a los 44 días finalizando los experimentos, como se observa respectivamente en Fig. 8.38 y Fig. 8.39. Los cálculos numéricos preliminares del modelo de carbonatación, indican además que la posición de esta interfaz es de 4,4 mm a los 4 días, 6,3 mm a los 8 días y de 8,9 mm a los 16 días. El comportamiento del frente de carbonatación en el tiempo sigue un patrón asintótico y es representable mediante una ley de potencias, lo cual encuentra confirmación en el estado del arte [Pap89], [Pap91b]. El análisis de los valores computacionales del modelo y de los experimentos, confrontados con los resultados de la investigación teórica, indican que la modelación y simulación de los perfiles de carbonatación es bastante satisfactoria. En la Tabla 9.1 se presentan los valores de la profundidad de carbonatación calculados con el modelo computacional y los medidos experimentalmente. En la misma tabla se brindan los errores relativos de los valores computacionales, los cuales, con excepción del valor de carbonatación que se refieren a 4 y 8 días, no superan el 20,0%. Considerando que el valor experimental se obtiene registrando la profundidad indicada por la sustancia fenolftaleína con la cual se impregna la muestra y que el error de esta medición experimental está en orden del mm, de la Tabla 9.1 se puede concluir que el modelo está en capacidad de describir los fenómenos de tipo reactivo-difusivo del proceso de carbonatación del concreto.

Los análisis difractométricos de Fig. 8.16 relativos a las muestras de concreto preparadas siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 6 y analizadas antes de someterlas al proceso en cámara de carbonatación acelerada, no reportan la presencia de hidróxido de calcio.

Tabla 9.1. Profundidad de carbonatación en condiciones aceleradas: valores numéricos simulados con el modelo computacional y valores experimentales obtenidos mediante el indicador fenolftaleína

Tiempo de carbonatación (días)	Profundidad de carbonatación simulada con el modelo computacional (mm)	Profundidad de carbonatación medida con el indicador fenolftaleína (mm)	Error relativo (%)
2	3.2	4.0	20.0
4	4.4	6.0	26.7
8	6.3	8.0	21.3
16	8.9	10.0	11.0
28	12.2	13.0	6.2
44	15.8	15.0	5.3

Los difractogramas mostrados en el Apéndice 3, señalan la presencia de Anortita cuya fórmula química corresponde al alúmino-silicato-cálcico $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ y que está presente en la fracción fina de la arena usada en la preparación de la mezcla de concreto.

Sustituyendo en la reacción estándar de carbonatación dada por la Ec. 6.8 un mecanismo de carbonatación en fase acuosa entre la Anortita y el gas CO_2 , la reacción de carbonatación resultante, que origina caolinita y calcita, la cual precipita sucesivamente en las paredes de la matriz porosa, de acuerdo a los autores Oelkers et al. [Oel08] es:



La Tabla 9.2 brinda masa molar, densidad y coeficiente de difusión de las dos especies anortita y caolinita. En el caso del CO_2 se mantiene el valor del coeficiente de difusión en $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ en el concreto ensayado que presenta una relación agua/cemento del 52% (véase Tabla 8.6), humedad relativa de 65% y fracción del volumen de poros de 0,20.

Tabla 9.2. Masa molar y densidad de las nuevas especies químicas de la reacción de carbonatación 9.1

Especie	Masa molar (g/mol)	Densidad (kg/m ³)	Coefficiente de difusión (m ² /s)
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (sólido)	278.20	2740	1×10^{-9}
$\text{AlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (sólido)	258.16	2600	1×10^{-9}

Este valor de literatura es justificable, ya que el modelo preliminar ha logrado representar eficazmente el transporte de CO_2 en el medio poroso. Nuevamente se fija en 25% en volumen el valor de concentración del CO_2 en la cámara de carbonatación acelerada, que constituye el valor usado en la experimentación, siendo el resto de la mezcla gaseosa representada por aire. Para definir los valores de parámetros cinéticos y constantes de equilibrio de los nuevos mecanismos químicos de carbonatación, se usa la base de datos del software comercial Comsol Multiphysics [Com16]. Las reacciones se desarrollan en fase acuosa y por lo tanto el agua se confirma ser el solvente de la solución, donde están disueltas las otras especies de la reacción Ec 9.1. Se asumen las mismas condiciones de borde del caso del modelo preliminar, es decir simetría a lo largo del eje z , valor de la concentración del gas CO_2 igual a $10,22 \text{ mol/m}^3$ en la superficie lateral del cilindro, condiciones de flujo difusivo nulo de las especies $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{AlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ y CaCO_3 en la misma superficie y condiciones de impermeabilidad en las dos bases horizontales del cilindro. Las condiciones iniciales usadas son de 280 mol/m^3 para el $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, y concentraciones nula de CO_2 , $\text{AlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ y CaCO_3 . El modelo se asume isotérmico a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, la presión es la atmosférica y para el medio poroso se mantienen un valor de porosidad constante de 0,25 y una saturación de agua constante e igual a 0,27.

Ajustados los parámetros del modelo computacional a partir de los perfiles de carbonatación experimentales, se llevan a cabo las simulaciones numéricas con los parámetros sintonizados anteriormente, con el propósito de obtener el modelo final del proceso de carbonatación del concreto, validado experimentalmente. Para un tiempo de carbonatación de 28 días, la Fig. 9.3, muestra la interfaz que separa la región carbonatada de la no carbonatada, mediante los perfiles de concentración espaciales de las especies $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{AlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ y CaCO_3 . En este caso, siendo que por 1 mol de $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ se forman contemporáneamente 1 mol de $\text{AlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ y 1 mol de CaCO_3 , los

perfiles de estas últimas dos especies coinciden. De acuerdo al gráfico de Fig. 9.3, el frente de carbonatación se localiza aproximadamente en una coordenada radial igual a 3,7 cm, es decir a una distancia de 1,3 cm de la superficie exterior de la muestra de concreto cilíndrica. La Tabla 9.3 brinda los valores de la profundidad de carbonatación calculados con el nuevo modelo computacional que incorpora la reacción de carbonatación Ec 9.1, además de los valores medidos experimentalmente y de los errores relativos de los cálculos. En este caso los errores relativos son inferiores al 20%, con excepción de la profundidad calculada a los 4 días de carbonatación. Para la difusión del gas CO_2 , el grafico de Fig. 9.4 traza las curvas de concentración en correspondencia de los mismos tiempos de carbonatación de la Tabla 9.3 Se observa la penetración del CO_2 en el concreto, que aumenta para los tiempos mayores y los valores nulos de concentración en la región no carbonatada, donde aún no ha difundido. En correspondencia de los mismos tiempos de carbonatación en condiciones aceleradas, las regiones carbonatadas se brindan en la Fig. 9.5 mediante los perfiles de calcita en el concreto.

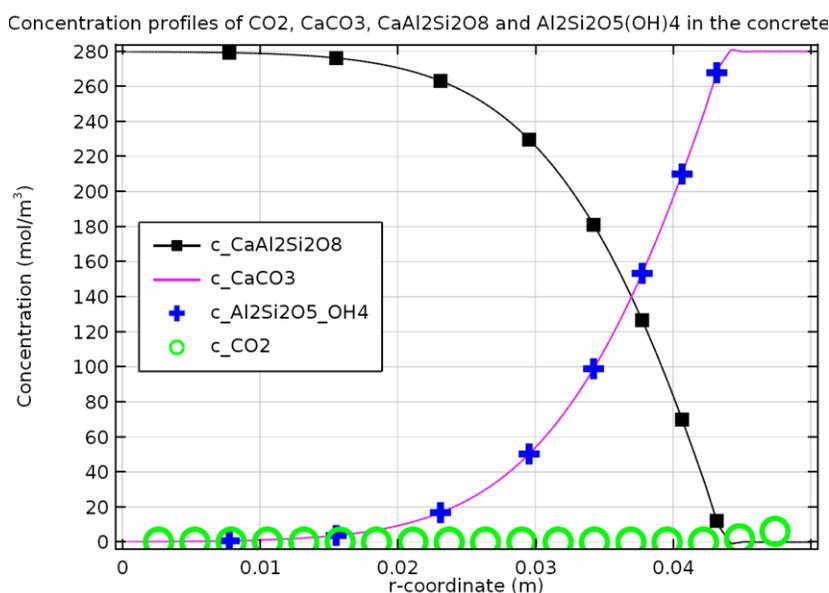


Figura 9.3. Perfiles de concentración de CaCO_3 , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ y CO_2 , en el concreto, después de 28 días de carbonatación.

Tabla 9.3. Profundidad de carbonatación en condiciones aceleradas: valores numéricos simulados con el modelo computacional y valores experimentales obtenidos mediante el indicador fenolftaleína

Tiempo de carbonatación (días)	Profundidad de carbonatación simulada con el modelo computacional (mm)	Profundidad de carbonatación medida con el indicador fenolftaleína (mm)	Error relativo (%)
2	3.3	4.0	17.5
4	4.7	6.0	21.7
8	6.6	8.0	17.5
16	9.5	10.0	5.0
28	13.0	13.0	0.0
44	16.9	15.0	12.7

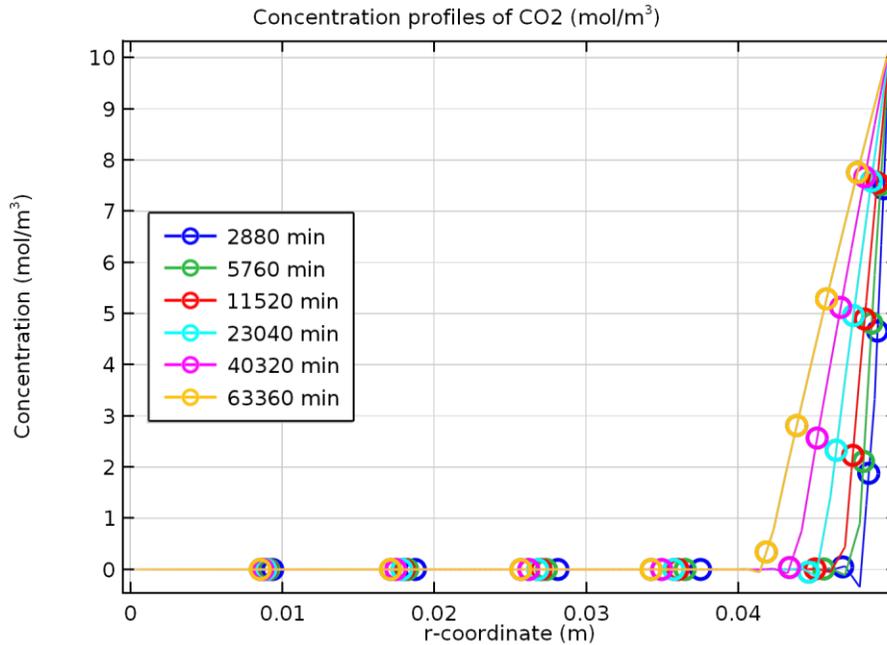


Figura 9.4. Perfiles de concentración de CO₂, en el concreto, para tiempos de carbonatación en min correspondientes a los seis tiempos de la Tabla 9.3

De acuerdo a los resultados computacionales, que se comparan satisfactoriamente con los valores medidos experimentalmente, el área carbonatada se extiende en el tiempo en el interior del concreto en función de la difusión del CO₂ y de la reacción de carbonatación dada con Ec 9.1. Los valores numéricos de la concentración de calcita indican que existe un frente de carbonatación difuso, el cual interesa un área alrededor de un valor central de la concentración de CaCO₃. De acuerdo al estado del arte este valor de referencia se puede considerar igual a 0,5 veces la concentración inicial de la especie reaccionante con el gas CO₂, en este caso la anortita y por lo tanto 140 mol/m³. Mediante las simulaciones numéricas llevadas a cabo usando el mismo modelo reactivo-difusivo final, se obtienen los resultados computacionales trazados en la Fig. 9.5. En este grafico se puede observar el patrón que describe el avance de la interfaz de carbonatación en el tiempo, con datos numéricos que son coincidentes con los valores de profundidad brindados en la Tabla 9.3. En particular, bajo condiciones aceleradas con 25% en volumen de gas CO₂ y humedad relativa del 65% en la cámara, se tiene una profundidad de carbonatación de aproximadamente unos pocos milímetros para dos días de carbonatación, la cual aumenta a casi 1,7cm para 44 días de carbonatación, bajo las misma condiciones de proceso.

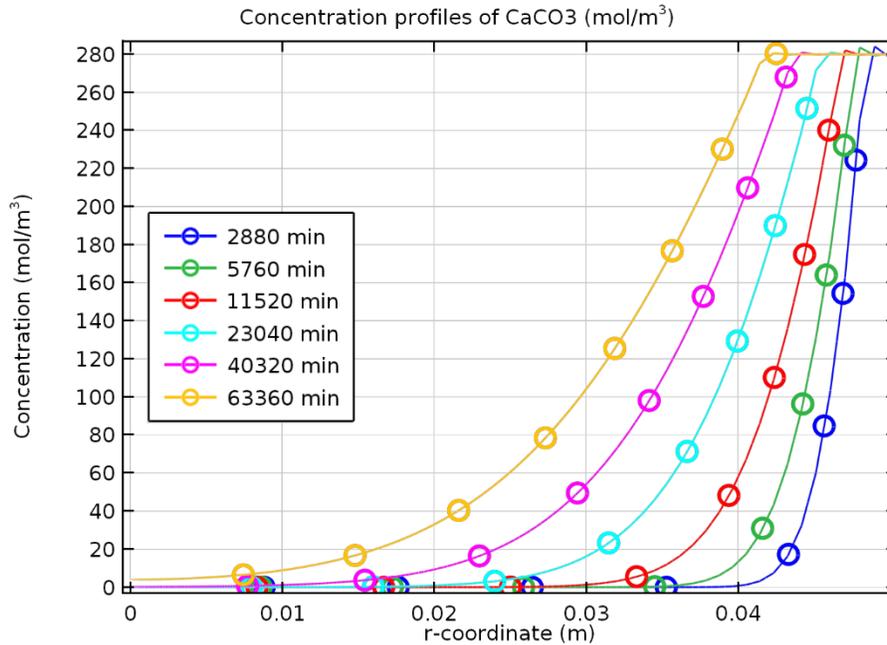


Figura 9.5. Perfiles de concentración de CaCO₃, en el concreto, para tiempos de carbonatación en min correspondientes a los seis tiempos de la Tabla 9.3

Analizando los resultados obtenidos con el trabajo experimental, los perfiles experimentales de carbonatación y los valores computacionales del modelo reactivo-difusivo desarrollado, se puede concluir que el trabajo de modelación y validación del proceso de carbonatación ha resultado ser satisfactorio y que el objetivo general, así como los objetivos específicos del proyecto han sido conseguidos. Los resultados anteriores constituyen una base importante y el estímulo necesario para la segunda etapa del proyecto de investigación, sobre la corrosión del concreto y la degradación de sus propiedades mecánicas.

10. Recomendaciones

El estudio se realizó con variables muy definidas en término de un tipo de agregado tanto fino como grueso, así como un tipo de material cementicio. Sería muy interesante el contar con un análisis más amplio debido a que el país existe una amplia gama de fuentes de agregados, con una gran variabilidad mineralógica, así como una amplia gama de materiales cementicias, lo que puede provocar diferentes comportamientos del avance de la carbonatación en los concretos costarricenses.

Respecto del trabajo experimental, una recomendación podría ser dirigida hacia la profundización de las técnicas de análisis químicos con el propósito de mejorar la cuantificación de las concentraciones de las especies interesada en el mecanismo de carbonatación.

Finalmente, para la modelación se sugiere poder investigar sobre los valores efectivos de algunas propiedades del concreto, por ejemplo porosidad, saturación con agua, coeficiente de difusión, posible presencia de anisotropías en el medio poroso, etc. con el propósito mejorar los resultados de las simulaciones numéricas.

11. Agradecimientos

Se agradece al personal administrativo y técnico de la Escuela de Ciencias e Ingeniería de Materiales y de la Escuela de Ingeniería en Construcción.

Además, los investigadores del proyecto desean manifestar reconocer el apoyo brindado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en particular la Dirección de Proyectos.

Finalmente, un agradecimiento a aquellos investigadores, estudiantes, que han brindado su cooperación en el marco del presente proyecto

12. Referencias

- [[Aci14] ACI 318 S-14, Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario, American Concrete Institute, USA, 2010.
- [Akt10] Akthar F.K. and Evans J.R.G., High porosity (>90%) cementitious foams, *Cement and Concrete Research*, **40**, 352-358, 2010.
- [Arn13] Arnold J., Kosson D.S., Garrabantes A., Meeussen J.C.L. and van der Sloot H.A., Solution of the nonlinear Poisson-Boltzmann equation: Application to ionic diffusion in cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, **44**, 8-17, 2013.
- [Asc13] ASCE, *Report card for America's infrastructure*, American Society of Civil Engineers, 2013, Reston, VA.
- [Asm02] ASM Handbook Online, Volume 17: *Nondestructive Evaluation and Quality Control- Radiographic Inspection*, revised by ASM Committee, 2002.
- [Ard18] Arduino, «ARDUINO UNO REV3,» Arduino, 2018. [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. [Último acceso: 11 Junio 2018].
- [Ada18] Adafruit®, «Adafruit Motor Shield V2 for Arduino,» Adafruit, 2016. [En línea]. Available: <https://learn.adafruit.com/adafruit-motor-shield-v2-for-arduino/overview>. [Último acceso: 11 Junio 2018].
- [Ast17] American Society for Testing and Materials, ASTM C 29 *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*, 2017.
- [Ast13a] American Society for Testing and Materials, ASTM C 33, *Standard Specification for Concrete Aggregates*, 2013
- [Ast13b] American Society for Testing and Materials, ASTM C 39, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, 2013.
- [Ast15a] American Society for Testing and Materials, ASTM C 127, *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*, 2015.
- [Ast15b] American Society for Testing and Materials, ASTM C 128, *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*, 2015.

- [Ast14] American Society for Testing and Materials, ASTM C 136, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, 2014.
- [Ast16] American Society for Testing and Materials. ASTM C192: *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*, 2016.
- [Esp17] Espinoza E. *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios*, Tesis de licenciatura, Escuela de Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica, 2017.
- [Bab04] Baumbach T., Helfen L., Schladitz K., Pernot P., Stanzik H. and Banhart J., High resolution microtomography and fast radiography for real time and in-situ characterization of porous microstructures, *16th World Conference on Non-destructive Testing*, Montreal, 30 August- 3 September, 2004.
- [Ben13] Bentz D.B., Garboczi E.J., Lu Y., Martys N., Sakulich A.R. and Weiss W.J., Modeling of the influence of transverse cracking on chloride penetration in concrete, *Cement and Concrete Composites*, **38**, 65-74, 2013.
- [Bru02] Bruno G., Girardin E., Giuliani A., Manescu A., Rustichelli F., O'Donnell B. and McHugh P.E., Residual stress analysis in aerospace MMC materials by neutron diffraction, *Applied Physics A, Materials Science & Processing*, doi:10.1007/s003390201746, 2002.
- [Cha07] Chaverri O., Chiné B. y Conejo M., Análisis de una columna desbutanizadora mediante técnica de perfilaje gamma, *Tecnología en Marcha*, **20-1**, 42-49, 2007.
- [Cha10] Chávez-Ulloa E., Perez-Lopez T., Reyes-Trujeque J., Corvo-Perez F. y Osorno-Carrillo J.B., Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada, *Revista CENIC-Ciencias Químicas*, 41, 2010.
- [Cha13] Chávez-Ulloa E., Camacho-Chab R., Sosa-Baz M., Castro-Borges P. and Perez-Lopez T., Corrosion process of reinforced concrete by carbonation in a natural environment and an accelerated test chamber, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 8, 9015 – 9029, 2013.
- [Cha15] Czarnecki L. and Woyciechowski, P., Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 63, No. 1, 2015.
- [Che04] Chen B. and Liu J., Properties of lightweight expanded concrete reinforced with steel fiber, *Cement and Concrete Research*, **34**, N.7, 1259-1263, 2004.
- [Che06] Cheng-Feng Chang and Jing-Wen Chen, The experimental investigation of concrete carbonation depth, *Cement and Concrete Research*, 36, N.9, 1760-1767, 2006.
- [Chi09] Chiné B., Metodologia di controllo dell'integrità di componenti realizzati con materiali non convenzionali, Report tecnico del OR 6: Impiego di materiali innovativi nella progettazione delle macchine utensili, Laboratorio MUSP, Piacenza, 2009.
- [ChJ02] Chi J.M., Huang R. and Yang C.C., Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method, *Journal of marine science and technology*, **10**, N.1, 14-20, 2002.

- [Com16] Comsol AB, Chemical Reaction Engineering Module, User's Guide, Version 5.2a, 2016.
- [Con08] Conejo M., Chaverri O., Chiné B. y Vargas C., Desarrollo y aplicaciones de las tecnologías de radiotrazadores y ESCANEO gamma, Control de Procesos mediante Tecnologías de Diagnóstico Isotópico, Tecnología en Marcha, **21-3**, 92-101, 2008.
- [Co218a] CO2Meter, Inc, «K33 BLG 30% CO2 + RH/T Data Logging Sensor,» CO2Meter.com, 2018. [En línea]. Available: <https://www.co2meter.com/collections/30-co2/products/k33-blg-co2-temperature-humidity-sensor>. [Último acceso: 10 Junio 2018].
- [Co218b] CO2Meter, Inc, «COZIR WR 100% CO2 Sensor,» CO2Meter.com, 2018. [En línea]. Available: <https://www.co2meter.com/collections/100-co2/products/cozir-100-percent-co2-sensor>. [Último acceso: 10 Junio 2018].
- [Deh14] Dehghanpoor A. S., Wong H.S. and Buenfeld N.R., Computational investigation of capillary absorption in concrete using a three-dimensional mesoscale approach, *Computational Materials Science*, **87**, 54-64, 2014.
- [Du13] Du X., Liu J. and Ma G., Macroscopic effective mechanical properties of porous dry concrete, *Cement and Concrete Research*, **44**, 87-96, 2013.
- [Esp17] Espinoza E. *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios*, Tesis de licenciatura, Escuela de Ingeniería en Construcción, Tecnológico de Costa Rica, 2017.
- [Fab08] Fabbri, A., Corvisier, J., Schubnel, A., Brunet, F., Fortin, J., Goffé, B., Barlet-Gouédard, V., Rimmelé, G. and Leroy, Y. (2013) Effect of Carbonation on the Hydro-Mechanical Properties of Portland Cement, in Thermo-Hydrromechanical and Chemical Coupling in Geomaterials and Applications: Proceedings of the 3 International Symposium GeoProc'2008 (eds J.-F. Shao and N. Burlion), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [Fer15] Ferretti D., Michelini E. and Rosati G., Cracking in autoclaved aerated concrete: Experimental investigation and XFEM modeling, *Cement and Concrete Research*, **67**, 156-167, 2015.
- [Fuj18] Fujikoki Corporation, «EDM electronic linear control valves,» FUJIKOKI CORPORATION, 2018. [En línea]. Available: http://www.fujikoki.co.jp/en/product/ro/pr_ro_linear.html. [Último acceso: 11 Junio 2018].
- [Gar90] García A. Ensayos no Destructivos por la Técnica de Radiografía Industria. México 1990.
- [Gho09] Ghods P., Karadakis K., Isgor O.B. and McRae G., Modeling the chloride-induced corrosion initiation of steel rebar in concrete, *Proceedings of the Comsol Conference 2009 Boston*, Boston, Ma, 2009.
- [Har66] Harland D.G., A radioactive method for measuring variations in density in concrete cores, cubes and beams, *Magazine of concrete research*, **18**, N. 55, 95-101, 1966.

- [Hay65] Hayden W., Moffatt W.G. and Wulff, *The structure and properties of materials, Vol. III Mechanical Behavior*, 1965, John Wiley and Sons, New York.
- [Hel00] Helfen L., Baumbach T., Banhart J., Stanzick H., Cloetens P., Ludwig W. and Baruchel J., High resolution radiography and tomography for light materials and devices, Proc. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, AIPnD (Ed.), October 2000, Rome.
- [Hil15] Hills T.P., Gordon F., Florin N.H. and Fennell P.S., Statistical analysis of the carbonation rate of concrete, *Cement and Concrete Research*, **72**, 98-107, 2015.
- [Hus10] Hussain R.R and Ishida T., Development of numerical model for FEM computation of oxygen transport through porous media coupled with micro-cell corrosion model of steel in concrete structure, *Computers and Structures*, **88**, 639-647, 2010.
- [Hyv10] Hyvert N., Sellier A., Duprat F., Rougeau P. and Francisco P., Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation, *Cement and Concrete Research*, **40**, 1582-1589, 2010.
- [Ite13] ITEAD Studio, «Electronic Brick of Temperature Sensor,» iteadstudio.com , 2013.
- [Lia02] Liang M.T., Qu W. and Liang C.H., Mathematical modeling and prediction method of concrete carbonation and its applications, *Journal of marine science and technology*, **10**, N.2, 128-135, 2002.
- [Lin03] Linares D. y Sánchez M., Construcción, operación, y puesta en funcionamiento de una cámara de carbonatación acelerada, *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, 26(1), 34-44, 2003.
- [Luy12] Lu Y., Garboczi E., Bentz D. and Davis J., Modeling the chloride transport in cracked concrete: a 3D image based microstructure simulation, *Proceedings of the Comsol Conference 2012 Boston*, Boston, Ma, 2012.
- [Jaś09] Jaśniok M. and Zybur A., Modeling the carbonated concrete realkalization, *Journal of civil engineering and management*, **15**, N.2, 159-168, 2009.
- [Kad05] Kadashevich I., Schneider H.J. and Stoyan D., Statistical modeling of the geometrical structure of the system of artificial pores in autoclaved aerated concrete, *Cement and Concrete Research*, **35**, N. 8, 1495-1502, 2005.
- [Kwo10] Kwon S.J. and Song H.W., Analysis of carbonation behavior in concrete using neural network algorithm and carbonation modeling, *Cement and Concrete Research*, **40**, 119-127, 2010.
- [Mor98] Morcillo M., Almeida M.E.M., Rosales B.M., Uruchurtu J. y Marrocos M., Corrosion y Protección de metales en las atmósferas en Iberoamérica-Parte 1, *Programa CYTED*, Madrid, 1998.
- [Mor14] Morandau A., Thiery M. and Dangla P., Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, *Cement and Concrete Research*, **56**, 153-170, 2014.
- [Mun98] Muñoz F.M., Componentes principales de las mezclas de concreto., Editorial de la Universidad de Costa Rica, 1998.

- [Nev98] Neville A.M., Tecnología del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Editorial Limusa, México, 1998.
- [Oel08] Oelkers E.H., Gislason S.R. and Matter J., Mineral carbonation of CO₂, *Elements*, **4**, 333-337, 2008.
- [Ozt03] Öztürk T., Kroggel O. and Grübl P., Propagation of ultrasound in concrete-spatial distribution and development of the Young's modulus, *Intern. Symp. Non-destructive testings in civil engineering 2003*, September 16-19, Berlin, 2003.
- [Pap89] Papadakis V.G., Vayenas C.G. and Fardis M.N., A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation, *American Inst. of Chemical Engineers*, **35**, N.10, 1639-1650, 1989.
- [Pap91a] Papadakis V.G., Vayenas C.G. and Fardis M.N., Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem, *Chemical Engineering Science*, **46**, N.5/6, 1333-1338, 1991.
- [Pap91b] Papadakis V.G., Fardis M.N. and Vayenas C.G., Fundamental Modeling and experimental investigation of concrete carbonation, *ACI Materials Journal*, **88**, N.4, 363-373, 1991.
- [Pap92a] Papadakis V.G., Fardis M.N. and Vayenas C.G., Hydration and carbonation of pozzolanic cement, *ACI Materials Journal*, **89**, N.2, 119-130, 1992.
- [Pap92b] Papadakis V.G., Fardis M.N. and Vayenas C.G., Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation, *Materials and Structures*, **25**, 293-304, 1992.
- [Pha13] Pham S. T., Experimental Investigation and Modelling of Carbonation Process in Cement Materials, *The Open Civil Engineering Journal*, **7**, 116-125, 2013.
- [Pil09] Piller M., Schena G., Nolich M., Favretto S., Radaelli F. and Rossi E., Analysis of hydraulic permeability in porous media: from high resolution X-ray Tomography to direct numerical simulation, *Transport in Porous Media*, **80**, N.1, 57-78, 2009.
- [Pca04] Portland Cement Association (PCA), *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, 2004.
- [Rad13] Radu F.A., Muntean A., Pop I.U., Suciú N. and Kolditz O., A mixed finite element discretization scheme for a concrete carbonation model with concentration-dependent porosity, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 246, 74-85, 2013.
- [Sal10] Salvo L., Suéry M., Marmottant A., Limodin A. and Bernard D., 3D imaging in material science: application of X-ray tomography, *Comptes Rendus Physique*, **11**, 641-649, 2010.
- [Stat06] Statgraphics, *Diseños de Mezclas* 2006.
- [Tal12] Talukdar S., Banthia N. and Grace J., Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change- Part 1: Experimental results and model development, *Cement and Concrete Composites*, **34**(8), 924-930, 2012.

- [Ter08] Tersuya I. and Chun-He L., Modeling of carbonation based thermos-hygro physics with strong couplind of mass transport and equilibrium in micro-pore structure concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6, N°2, 303-316, 2008.
- [The18] <https://www.thermofisher.com/es/es/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-basics.html>, recuperado el 15 de junio 2018
- [Tut82] Tuutti K., Corrosion of steel in concrete, Swedish Cement and Concrete Institute RIT-Stockholm, 1982.
- [Var05] Vargas C., Chaverri O., Chiné B. y Conejo M., Control de Procesos mediante Tecnologías de Diagnóstico Isotópico, en *Tecnología en Marcha*, **18-2**, ET, 107-116, 2005.
- [Vil07] Villain G., Thiery M. and Platret G., Measurement methods of carbonatation profiles in concrete: thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry, *Cement and Concrete Research*, **37**, 1182-1192, 2007.
- [Wan10] Wang X., Nguyen M., Stewart M., Syme M. and Leitch A., *Analysis of climate change impacts on the deterioration of concrete infrastructure. Part 1: Mechanisms, Practices, Modeling and Simulations - A Review*, 2010, CSIRO, Canberra.
- [Zha15] Zha X., Yu M., Ye J. and Feng G., Numerical modeling of supercritical carbonation process in cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, **72**, 10-20, 2015.
- [Zhi13] Zhiguon N. and Ri Y., Experimental investigation of concrete carbonation under different conditions, *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)*, **2**, N.4, 114-117, 2013.

13. Apéndices

13.1. Apéndice 1

Formato
P-CO-OP-06-00-03
Informe de Resultados de Ensayo del Laboratorio
Holcim (Costa Rica) S.A.

Fecha: 01/04/2016
Versión: 5
Página: 1 de 1

		INFORME DE RESULTADOS	
Mec: Junio		Comprobativo: 817	
Periodo: 1 al 30 Junio 2017		Página: 1/1	
Fecha de Informe: 04/07/2017		 Laboratorio de Ensayo Alcance de Acreditación N° LE-095 Acreditado a partir del: 13/01/2012 Alcance disponible en www.eca.or.cr	
Producto: Cemento			
Tipo: MP/A-28			
Identificación Cliente: INDUSTRIAL			
Holcim (Costa Rica) S.A. cuenta con un sistema de Gestión Integrado (SGI) de Calidad, Ambiente y CHSG. Nuestros Operaciones en Planta Cemento están certificadas según Normas: ISO 9001:2008 Gestión de Calidad ISO 14001:2004 Gestión de Ambiente ISO 18001:2007 Gestión de Salud y Seguridad Ocupacional ISO 14084:2008 Gestión Cero de Efecto Invernadero			

Información General		Información Cliente	
Laboratorio:	Control Calidad, Holcim (Costa Rica) S.A.	Cliente:	
Dirección Laboratorio:	Planta Cemento Holcim (Costa Rica) S.A., Agua Caliente, Cartago Costa Rica	Dirección:	
email:	www.holcim-co@holcim.com	email:	
Teléfono:	(506) 2285-2800	Teléfono:	
Fax:	(506) 2285-2100	Fax:	

Parámetro (+)	Resultado	Unidad Medida	Reglamento RTCR 479/2015	Parámetro (-)	Resultado	Unidad Medida	Reglamento RTCR 479/2015	Parámetro (+)	Resultado	Unidad Medida	Reglamento RTCR 479/2015
SC2*	31,24	%	NI	SC2** Um = 0,2	14,7	MPa	NI	Contenido Asa** Um = 0,4	7	%	< 12
Mg2*	2,09	%	≤ 6,0	SC2** Um = 0,2	23,7	MPa	> 13	Expansión Autoclave** Um = 0,002	0,05	%	< 0,8
SC2*	2,43	%	≤ 4,0	SC2** Um = 0,3	39,8	MPa	> 20	Expansión Bateria Mortero** Um = 0,003	0,01	%	< 0,02
Residue Insoluble** Um = 0,25	NI	%	NI	SC2** Um = 0,5	39,2	MPa	> 28	Expansión Alcali-Amparo** 14 días	NI	%	NI
Perdida Fuego*	3,9	%	NI	SC2** Um = 0,05	29,7	%	NI	Calor Hidratación 7 Día*	NI	kJ/kg	NI
Blaine** Um = 85	419	m2/kg	NI	SET B** Um = 4	108	Minutos	> 45	Calor Hidratación 28 Día*	NI	kJ/kg	NI
Fines < 45 μm** Um = 0,5	1,7	%	NI	SET FN** Um = 4	210	Minutos	< 420	Densidad x Sulfitos 180 Día*	NI	%	NI
AC*	50,0	%	NI	Densidad** Um = 0,05	2,08	g/cm3	NI	Densidad x Sulfitos 365 Día*	NI	%	NI
Los resultados de los análisis químicos están calculados en porcentaje en peso. Ensayos según Normas: Blaine, INTE 06-11-08 Consistencia Normal, ASTM C 187 Tiempo de Fregado, INTE 06-11-05 (ASTM C 191) Perdida de Fuego, INTE 06-11-02 (ASTM C 114) Residue Insoluble, INTE 06-11-02 (ASTM C 114) Expansión por Autoclave, INTE 06-11-03 (ASTM C 151) Expansión Bateria de mortero en agua, ASTM C 1038 Cantidad por resistencia a los sulfatos, ASTM C 912 Densidad, ASTM C 186 Resistencia a la Compresión, INTE 06-02-20 (ASTM C 109) Fines en modo < 45 μm, INTE 06-11-10 (ASTM C 450) Cera de Hidratación, ASTM C 186 Contenido de Asa, INTE 06-11-04 (ASTM C 185) Agregado, ASTM 227								Nombre: Jose Antonio Mejias Firma: Coordinador Control Calidad			
* Ensayo No Acreditado ** Ensayo y muestra Acreditado según alcance N° LE-095, ver alcance en www.eca.or.cr								Nombre: Estefany Muñoz Zamora Firma: Control Calidad			
(H) Agua Cemento del mortero. (1D) Resistencia a la compresión a la edad de 1 día. (3D) Resistencia a la compresión a la edad de 3 días. (7D) Resistencia a la compresión a la edad de 7 días. (28D) Resistencia a la compresión a la edad de 28 días. (CN) Consistencia Normal de la pasta. SET B** Tiempo de fragua inicial. SET FN** Tiempo de fragua final. NI= No Indica UC= Incertidumbre expandida del ensayo, tomando en cuenta la variabilidad de la producción.								Interpretaciones Adicionales: Cemento industrial MP/A-28 cumple de acuerdo a las especificaciones del reglamento RTCR 479/2015			
(H) Agua Cemento del mortero. (1D) Resistencia a la compresión a la edad de 1 día. (3D) Resistencia a la compresión a la edad de 3 días. (7D) Resistencia a la compresión a la edad de 7 días. (28D) Resistencia a la compresión a la edad de 28 días. (CN) Consistencia Normal de la pasta. SET B** Tiempo de fragua inicial. SET FN** Tiempo de fragua final. NI= No Indica UC= Incertidumbre expandida del ensayo, tomando en cuenta la variabilidad de la producción.								Observaciones Adicionales: Composición de las fases del clinker: C2S=42,2%, C3A 8,3%, C2S +12,2%, C4AF 40,3%. La determinación de las fases de clinker se calcula por Rigou.			

Realizado por:
Estefany Muñoz Zamora
Técnico Control Calidad

Revisado por:
Jose Mejias
Coordinador Control Calidad

Aprobado por:
Leo Cotti
Director Técnico

13.2. Apéndice 2

Diseño de mezclas de Concreto / Investigación

Vg. Manual Using Concrete Design

f'c (kg/cm²)

210,00

Determinación de TMA

12,50

Revisión de distribución de bases

Concreto a utilizar f'c (MPa) **20,59**

Concreto a utilizar f'c (kg/cm²) **12,50**

Comprobación de resistencia **100%**

Comprobación de verificación de proyecto hidráulico

Cuadro A. Resumen de agregados seleccionados para el diseño de mezcla propuesto.

Material	M.F	Gbs	Gbs8	G8	PU masivo seco Suelto (kg/m ³)	%w	%w Compactado (kg/m ³)	% D	Tamaño máximo nominal (mm)
Arenia	3,05	2,39	2,20	2,22	1500,00	0,00	1710,00	8,00	2,00
Piedra	-	2,63	2,57	2,61	1450,00	0,00	1560,00	2,10	9,20
Cemento (MPIA-28)	-	-	-	2,95	1475,00	0,00	-	-	-

Comportamiento de hinchamiento de la arena en estudio

%	h	h ₀	h ₁	h ₂	h ₃	DV
10%	0,00	2,70	0,00	0,00	0,00	0,00
20%	0,00	2,70	0,00	0,00	0,00	0,00
30%	0,00	2,70	0,00	0,00	0,00	0,00
40%	0,00	2,70	0,00	0,00	0,00	0,00
50%	0,00	2,70	0,00	0,00	0,00	0,00

Diseño:

1. Selección de pesos unitarios

Arenia **1500,00**

Piedra (kg/m³) (peso seco suelto) **1450,00**

Piedra (kg/m³) (peso seco compactado) **1450,00**

Cemento (kg/m³) (peso seco suelto) **1475,00**

Cemento (kg/m³) (peso seco compactado) **1475,00**

2. Determinación de la resistencia de diseño

f'c (kg/cm²) **21,00**

f'c (MPa) **28,99**

3. Determinación de peso de agua y porcentaje de aire

TMA (mm) **12,50**

Amortiguamiento (mm) **De 75 a 100**

Exposición N/A

Peso de Agua (kg) **216,00**

% Aire **0,03**

Volumen de aire (m³) **0,22**

4. Determinación de A/C

f'c (MPa) **28,99**

Volumen de resistencia en Aire Inicial **30,00**

A/C **0,57**

5. Determinación de Cantidades de Cemento

Peso del Cemento (kg) **381,97**

Gravedad esp del cemento **2,95**

Volumen de cemento V_c (m³) **0,13**

6. Determinación de las cantidades de agregado grueso

V_g (m³) **0,24**

M_g (kg) **3,20**

Volumen volumétrico para **0,53**

Porcentaje de MP **0,53**

Volumen (m³) **0,13**

Peso (kg) **830,70**

Volumen (m³) **0,32**

7. Determinación de las cantidades de agregado fino

V_f (m³) **0,31**

Peso (kg) **673,83**

8. Corrección por humedad

Material	W ₁ (%)	W ₂ (%)	W ₃ (%)	W ₄ (%)	W ₅ (%)	W ₆ (%)	W ₇ (%)	W ₈ (%)	W ₉ (%)	W ₁₀ (%)
Arenia	0,03	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Piedra	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Corrección de la cantidad de agua **197,45**

Resumen de Diseño de Mezcla

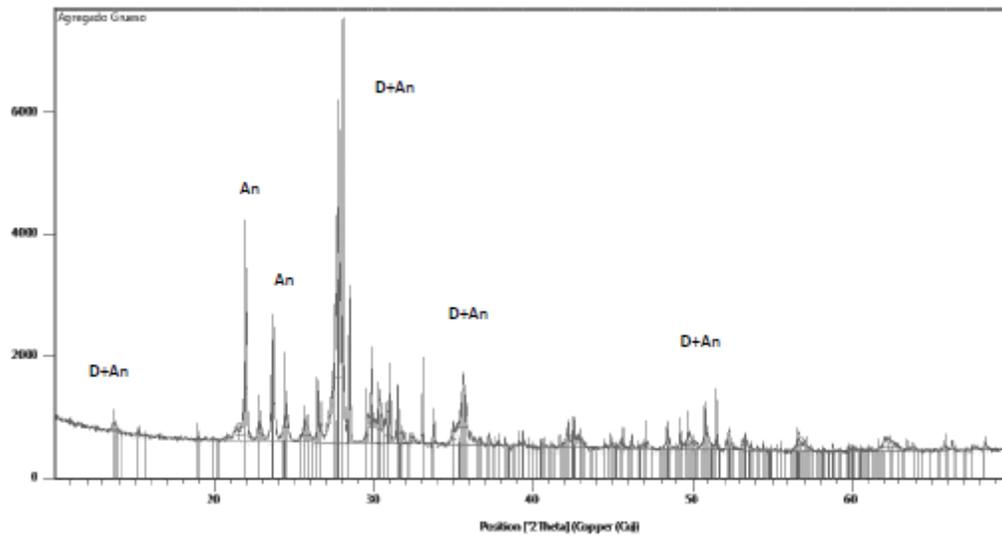
Material	W ₁ (%)	W ₂ (%)	W ₃ (%)	W ₄ (%)	W ₅ (%)	W ₆ (%)	W ₇ (%)	W ₈ (%)	W ₉ (%)	W ₁₀ (%)
Arenia	0,03	0,08	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Piedra	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Agua	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Peso cemento A (kg/m³) **217,85**

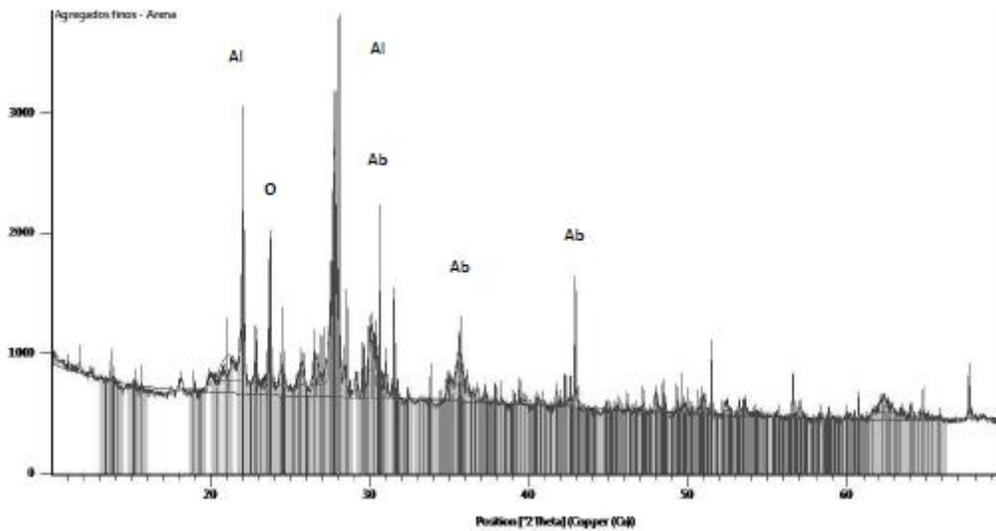
6.1 Determinación de cantidad aproximada de agregado fino por método de Pico específico del concreto esparado

TMA	Peso Cemento (kg/m ³)	Peso Agua (kg)	Peso Cemento (kg/m ³)	Peso Agua (kg)
12,50	217,85	217,85	217,85	217,85
15,00	217,85	217,85	217,85	217,85
17,50	217,85	217,85	217,85	217,85
20,00	217,85	217,85	217,85	217,85
22,50	217,85	217,85	217,85	217,85
25,00	217,85	217,85	217,85	217,85
27,50	217,85	217,85	217,85	217,85
30,00	217,85	217,85	217,85	217,85
32,50	217,85	217,85	217,85	217,85
35,00	217,85	217,85	217,85	217,85
37,50	217,85	217,85	217,85	217,85
40,00	217,85	217,85	217,85	217,85
42,50	217,85	217,85	217,85	217,85
45,00	217,85	217,85	217,85	217,85
47,50	217,85	217,85	217,85	217,85
50,00	217,85	217,85	217,85	217,85
52,50	217,85	217,85	217,85	217,85
55,00	217,85	217,85	217,85	217,85
57,50	217,85	217,85	217,85	217,85
60,00	217,85	217,85	217,85	217,85
62,50	217,85	217,85	217,85	217,85
65,00	217,85	217,85	217,85	217,85
67,50	217,85	217,85	217,85	217,85
70,00	217,85	217,85	217,85	217,85
72,50	217,85	217,85	217,85	217,85
75,00	217,85	217,85	217,85	217,85
77,50	217,85	217,85	217,85	217,85
80,00	217,85	217,85	217,85	217,85
82,50	217,85	217,85	217,85	217,85
85,00	217,85	217,85	217,85	217,85
87,50	217,85	217,85	217,85	217,85
90,00	217,85	217,85	217,85	217,85
92,50	217,85	217,85	217,85	217,85
95,00	217,85	217,85	217,85	217,85
97,50	217,85	217,85	217,85	217,85
100,00	217,85	217,85	217,85	217,85

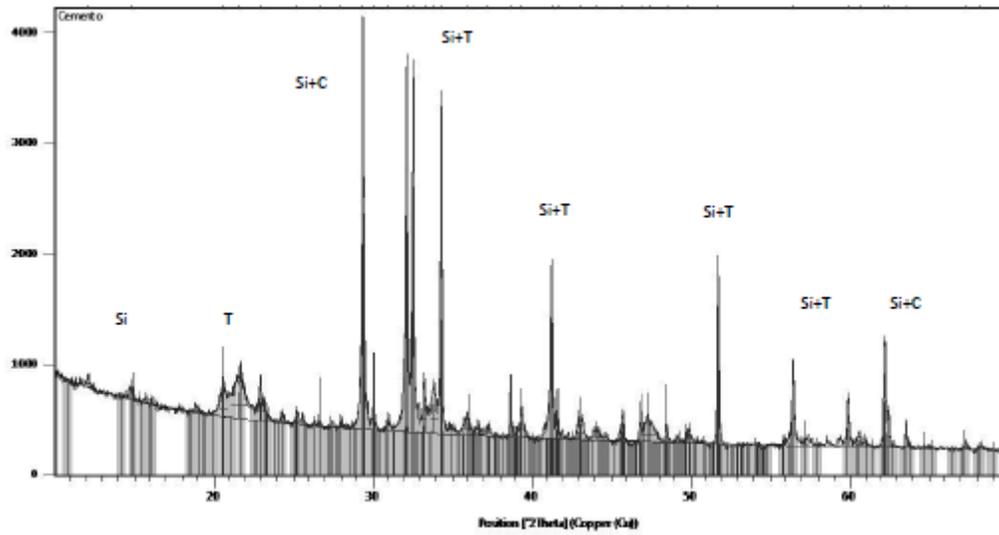
13.3. Apéndice 3



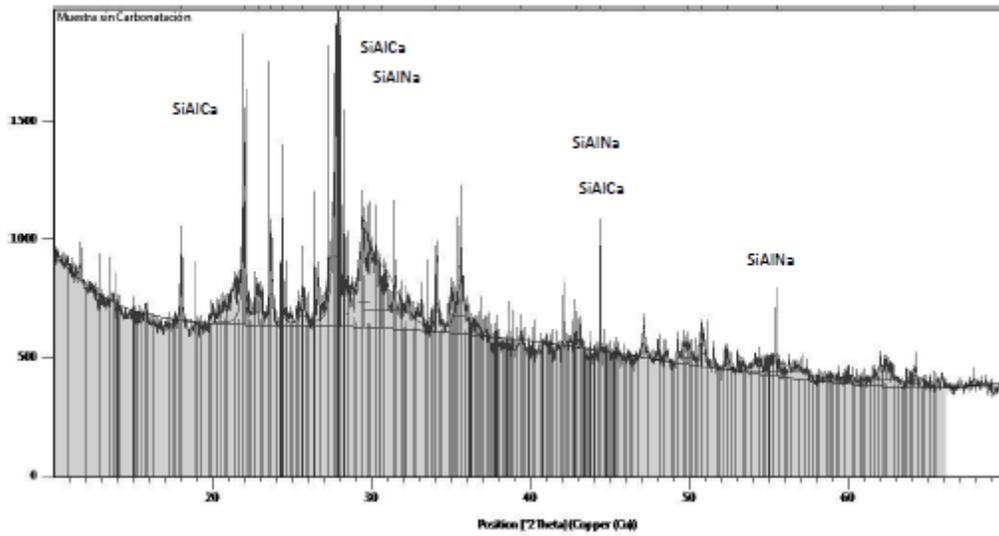
Difractograma de agregados gruesos (piedra): D: Diopside ($\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$), An: Andesine ($(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$)



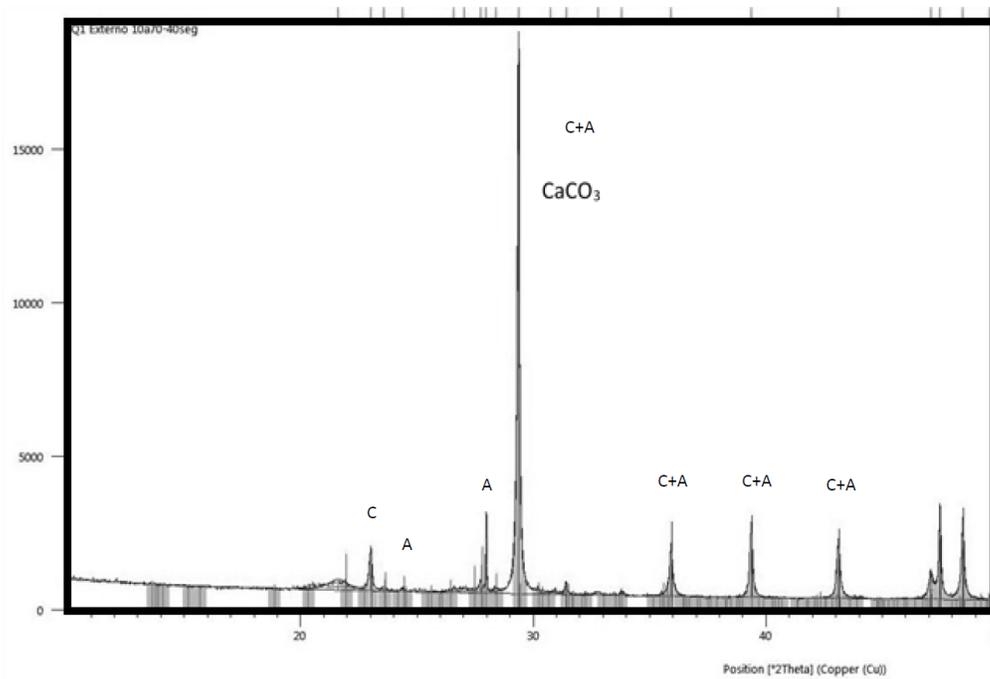
Difractograma de agregados finos (arena): O: Ortoclase (KAlSi_3O_8), Ab: Polimorfo de la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y Al: Aluminio silicato de calcio sodio (Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$))



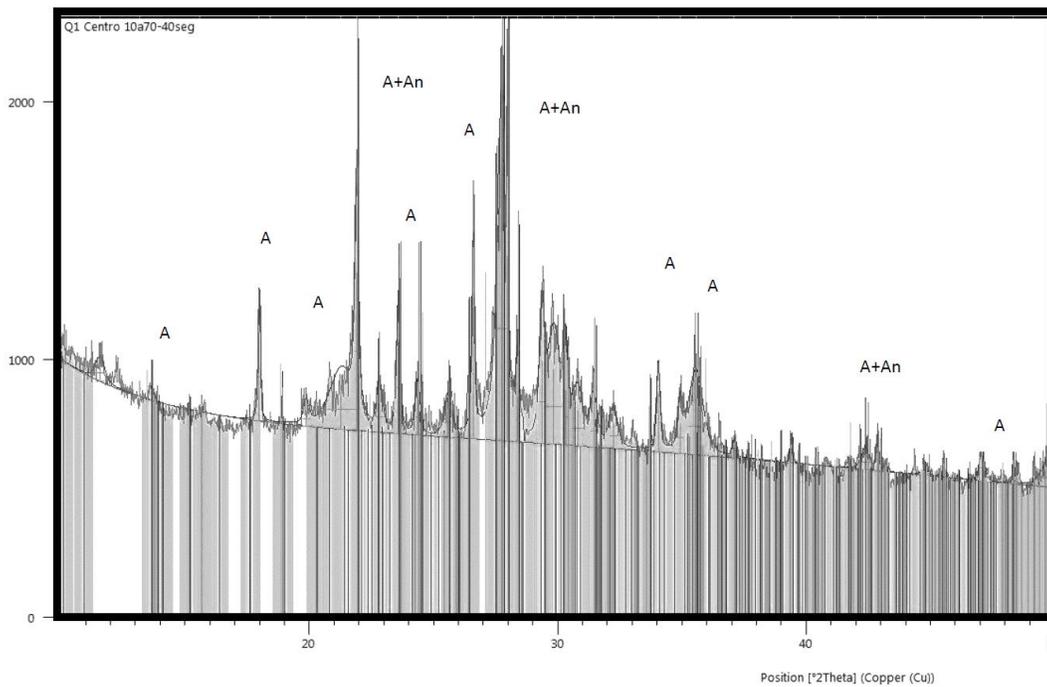
Difractograma de cemento; Si: Silicato de calcio; T: Tridimita (SiO₂)



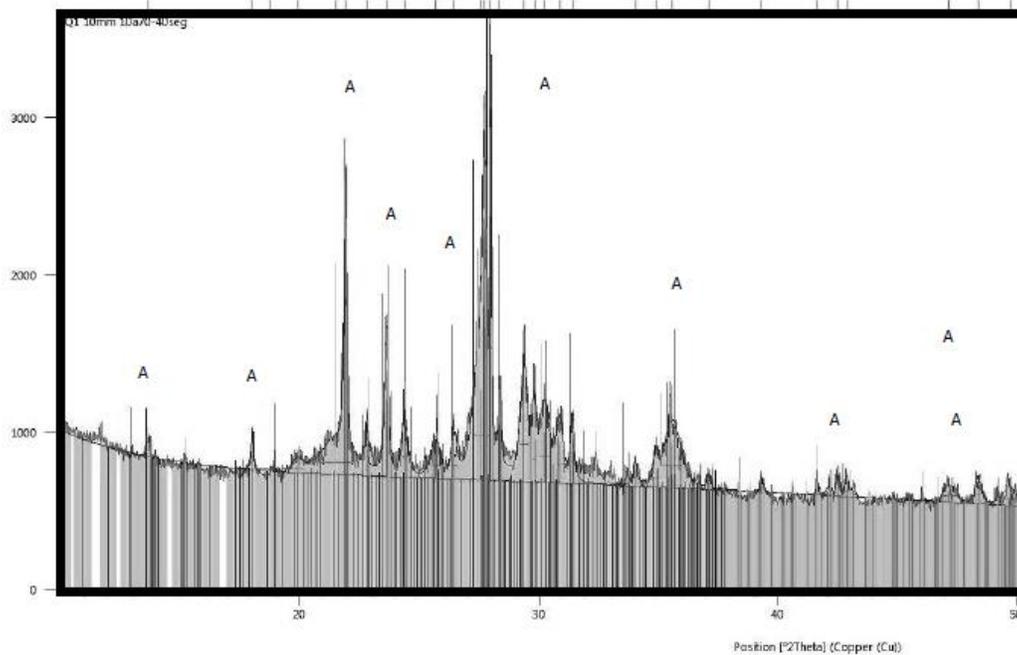
Difractograma de muestra sin carbonatar; SiAlCa: Aluminio silicato de calcio; SiAlNa: Aluminio silicato de sodio (Anortita (CaO·Al₂O₃·2SiO₂))



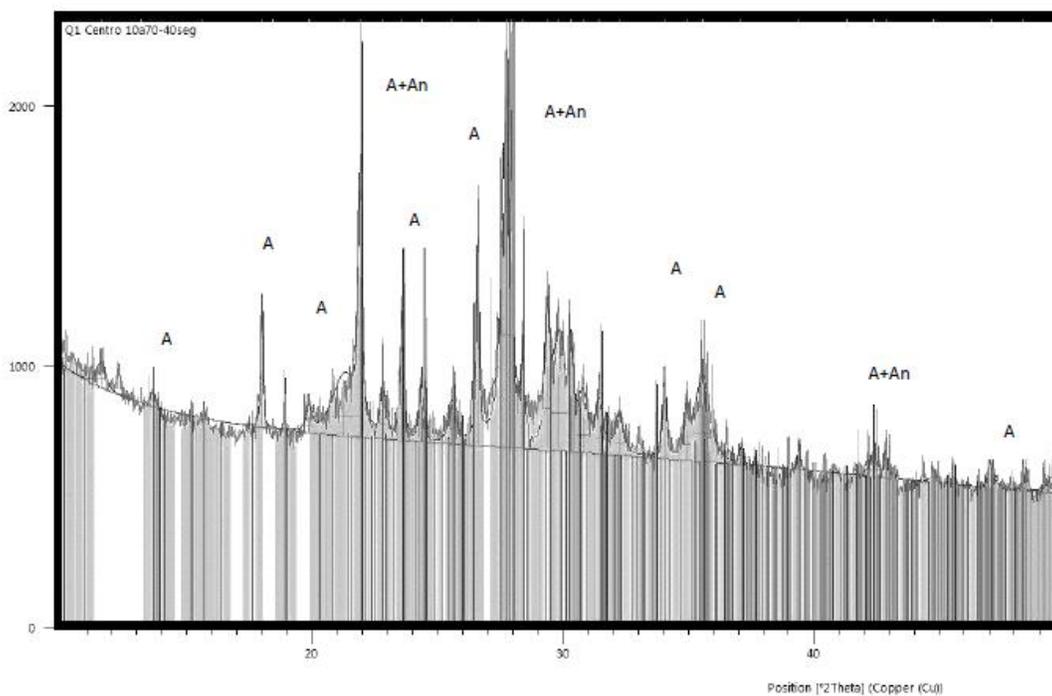
Difractograma de probeta Q1 (dos días de exposición) en su parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



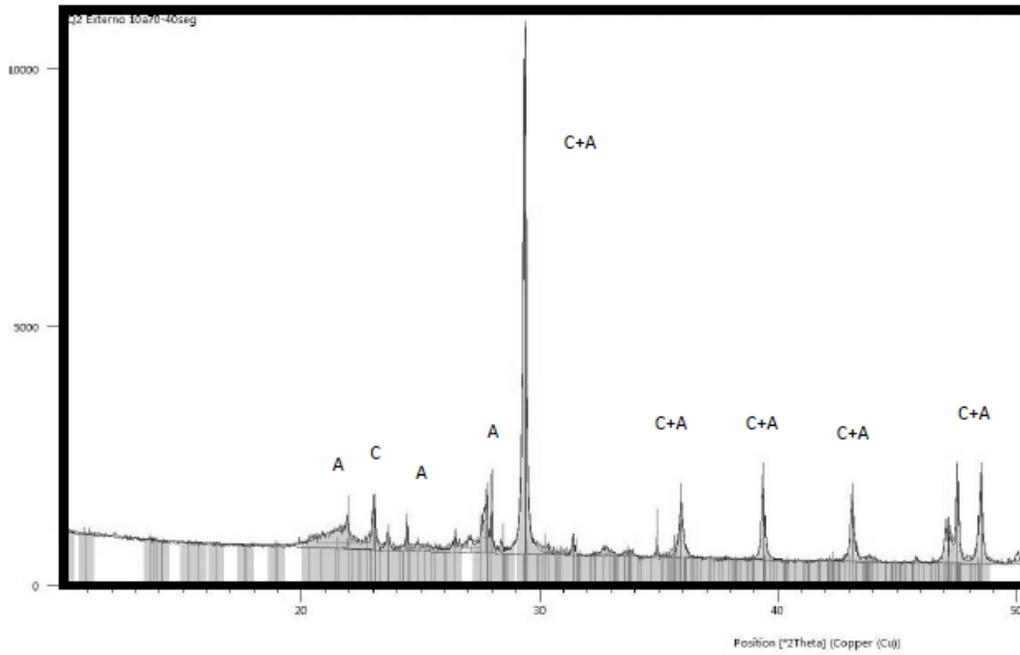
Difractograma de probeta Q1 (dos días de exposición) a 5 mm de parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).



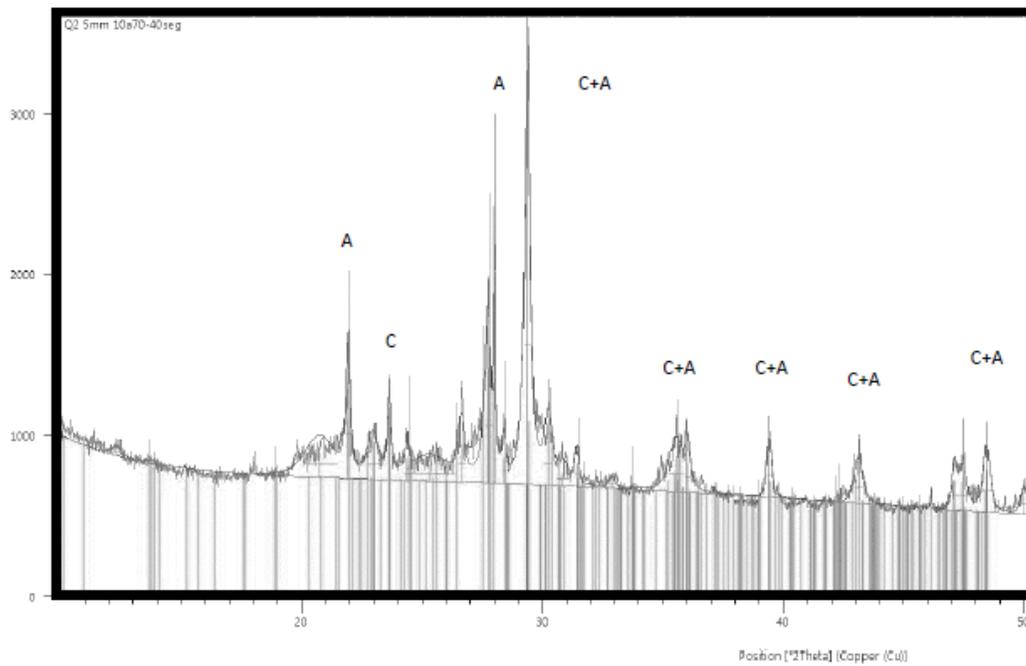
Difractograma de probeta Q1 (dos días de exposición) a 10 mm de parte externa A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).



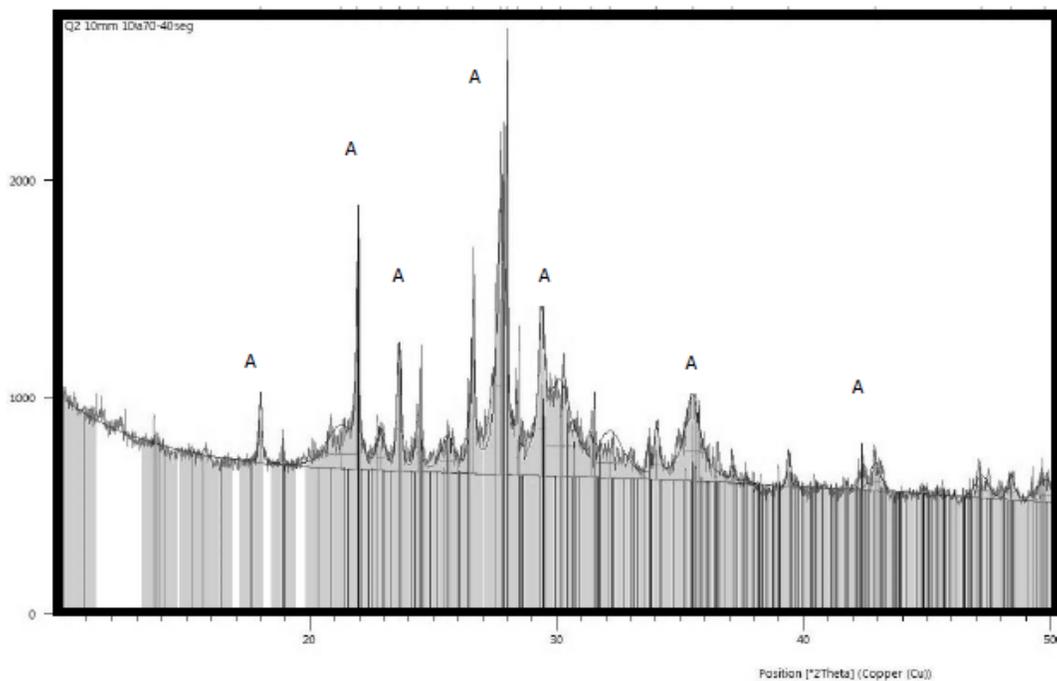
Difractograma de probeta Q1 (dos días de exposición) centro de probeta A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y An: Andesina $(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$



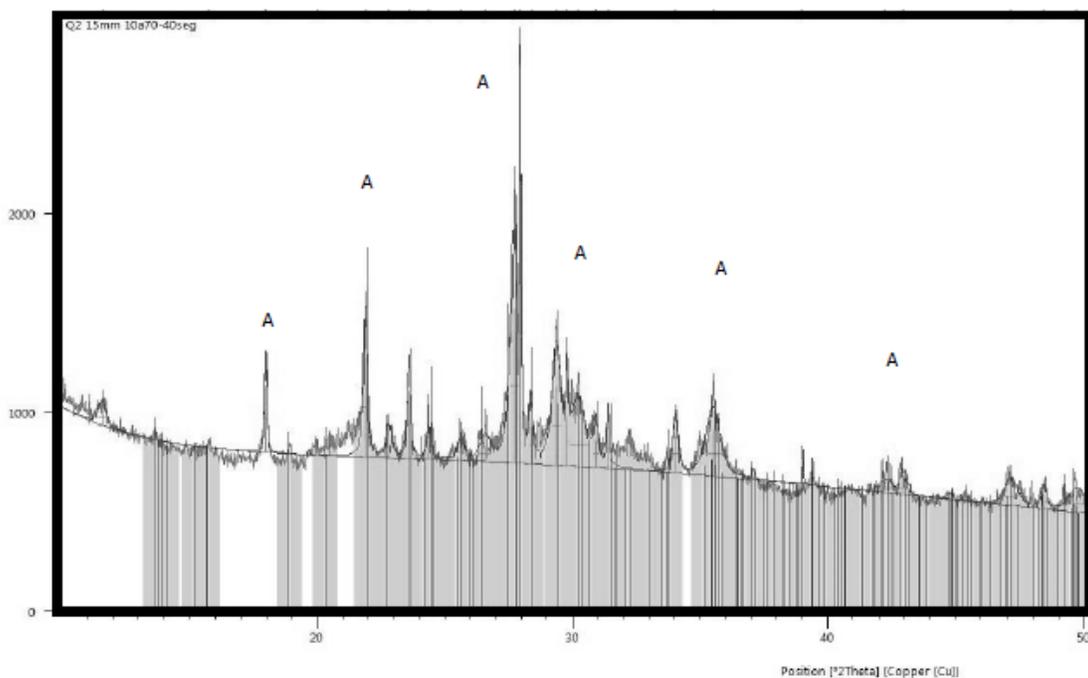
Difractograma de probeta Q2 (cuatro días de exposición) en su parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



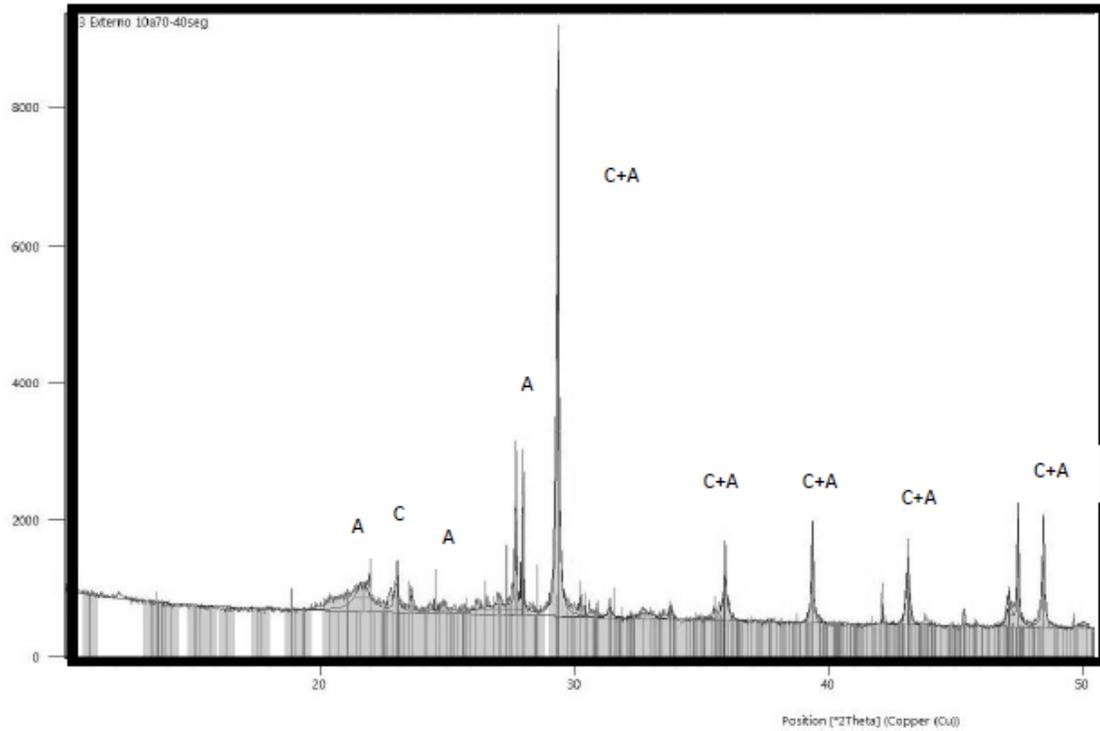
Difractograma de probeta Q2 (cuatro días de exposición) a 5 mm de parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



Difractograma de probeta Q2 (cuatro días de exposición) a 10 mm de parte externa A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y Anortita con Na intercambiado



Difractograma de probeta Q2 (cuatro días de exposición) a 15 mm de parte externa A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y Anortita con Na intercambiado



Difractograma de probeta Q3 (ocho días de exposición) en su parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

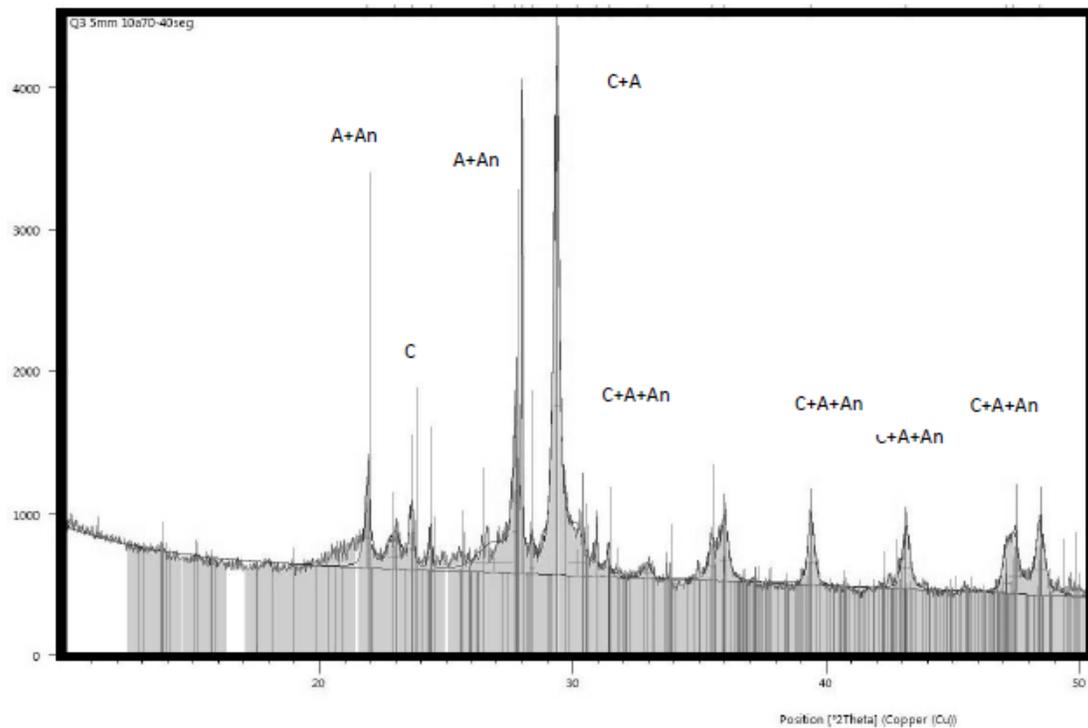
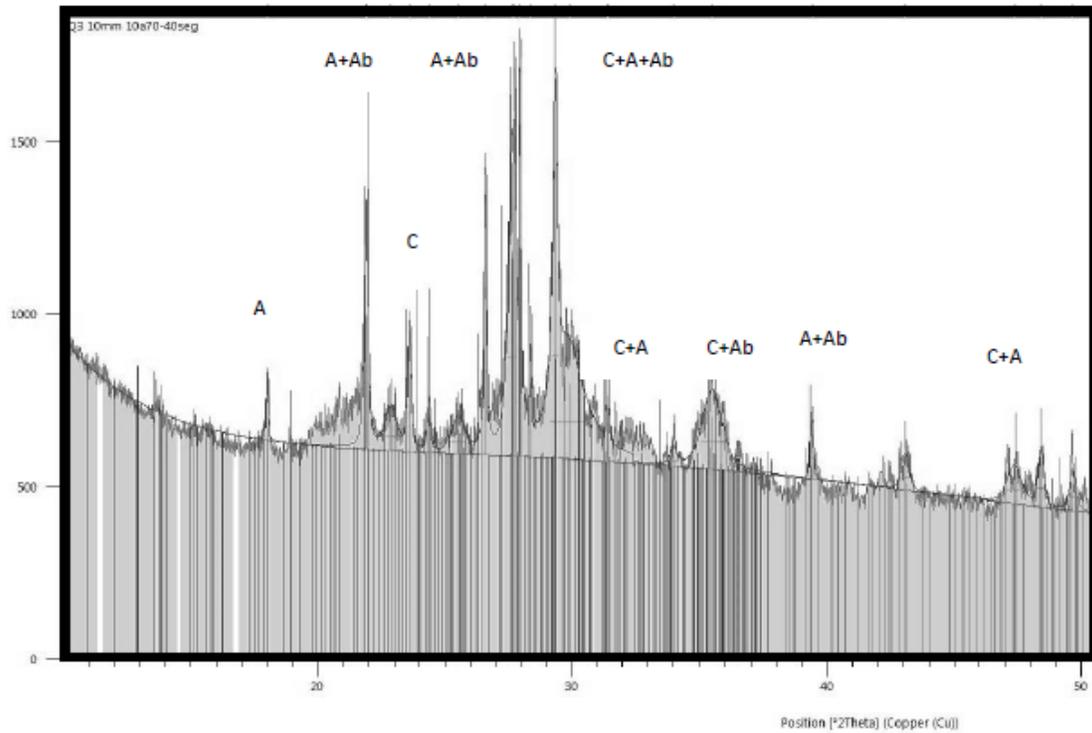
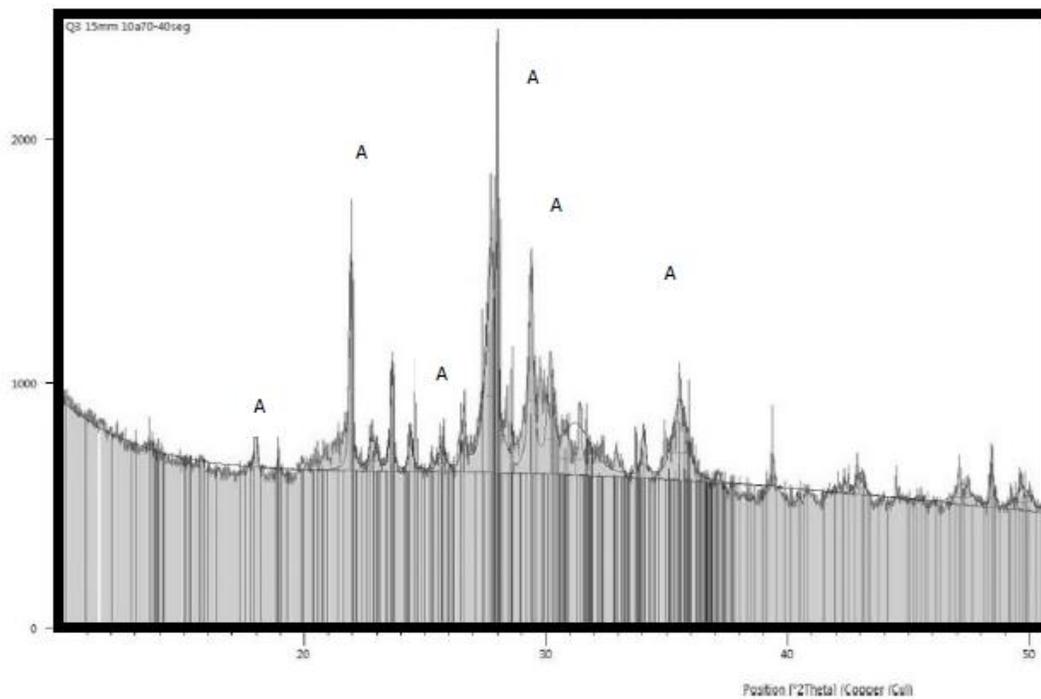


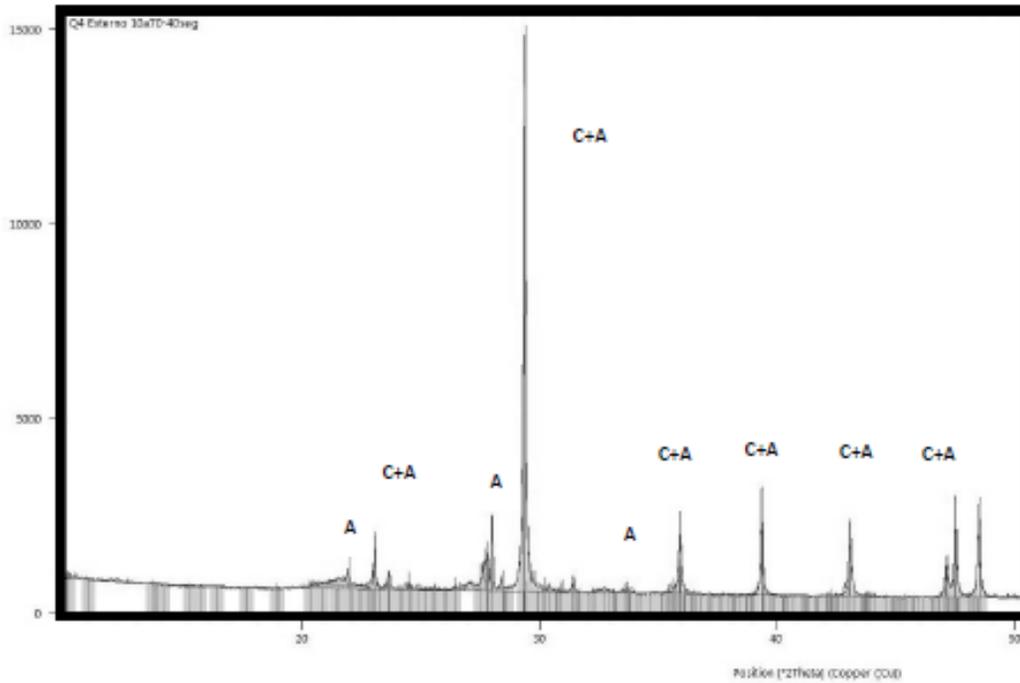
Figura. N° Difractograma de probeta Q3 (ocho días de exposición) a 5 mm de parte externa C: Calcita (CaCO_3), A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y An: Andesina



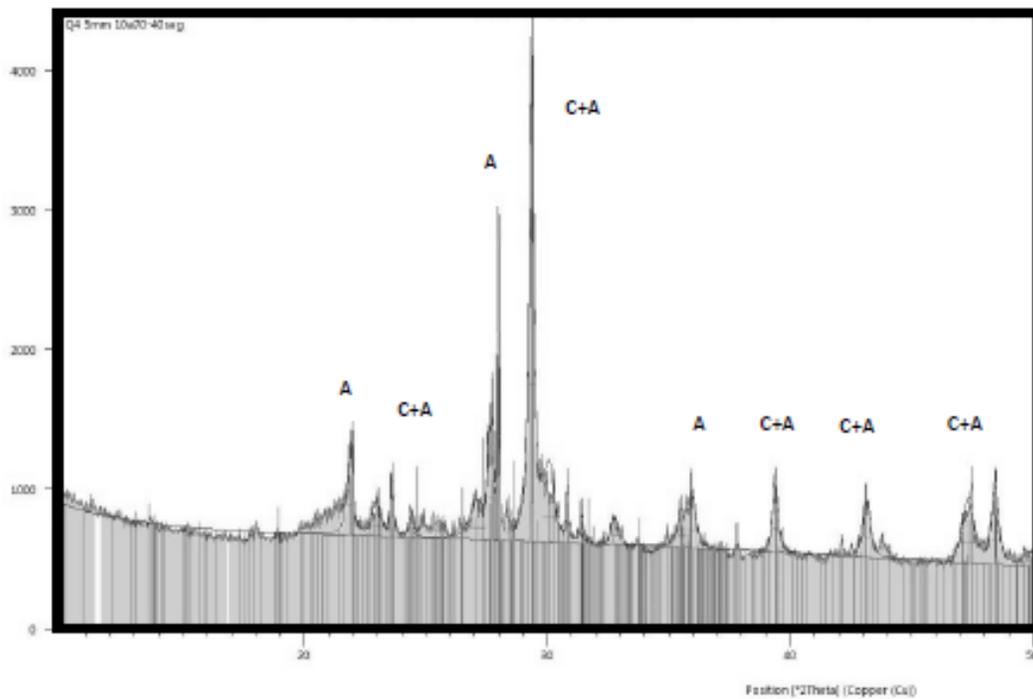
Difractograma de probeta Q3 (ocho días de exposición) a 10 mm de parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y Ab: Albita baja ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$) parcialmente sustituida por Ca.



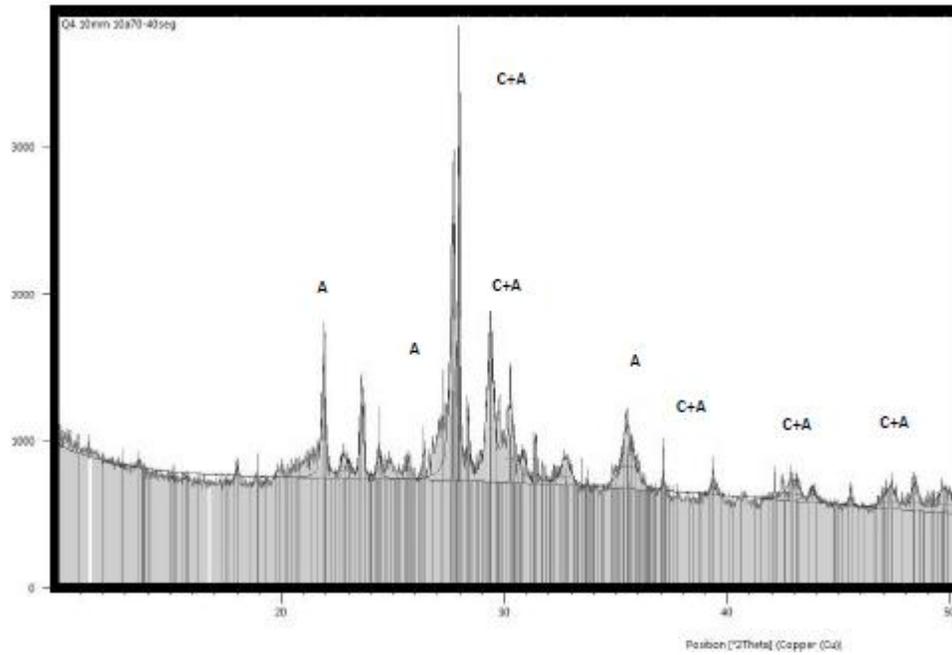
Difractograma de probeta Q3 (ocho días de exposición) 15 mm de parte externa A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



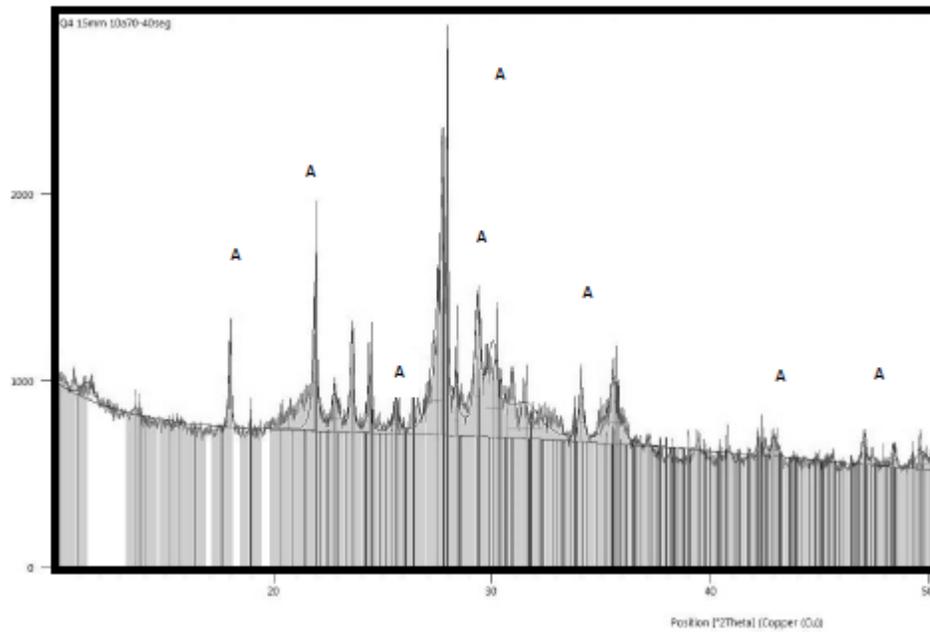
Difractograma de probeta Q4 (dieciséis días de exposición) en su parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



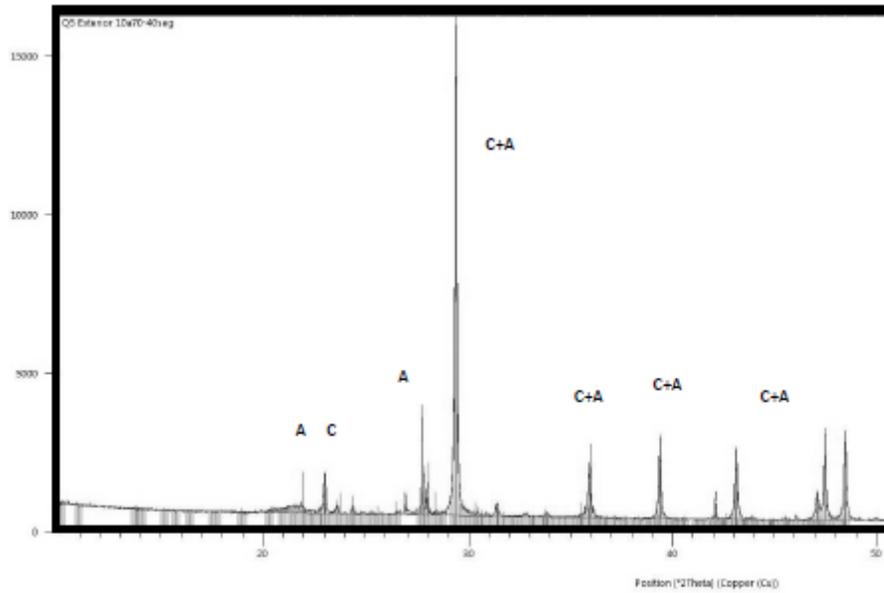
Difractograma de probeta Q4 (dieciséis días de exposición) a 5 mm de parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



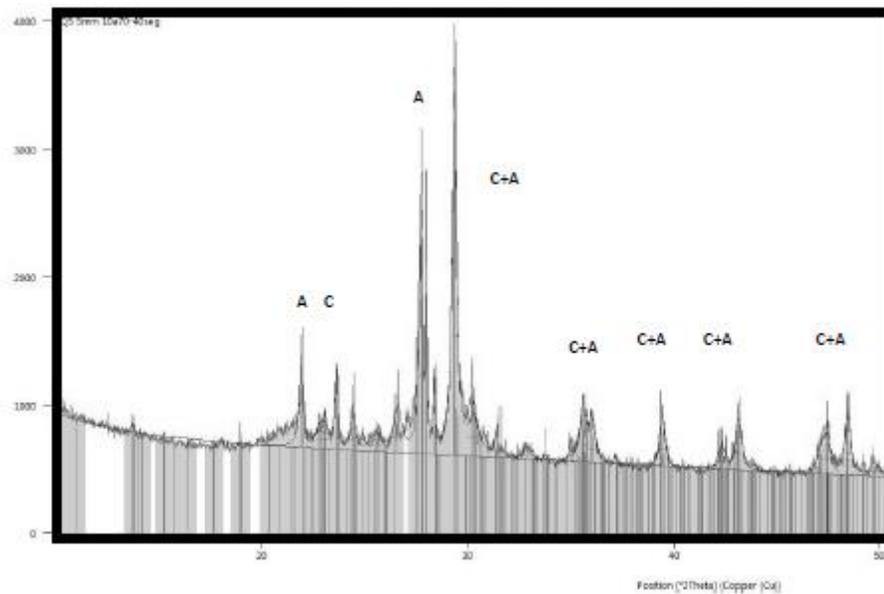
Difractograma de probeta Q4 (dieciséis días de exposición) a 10 mm de parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



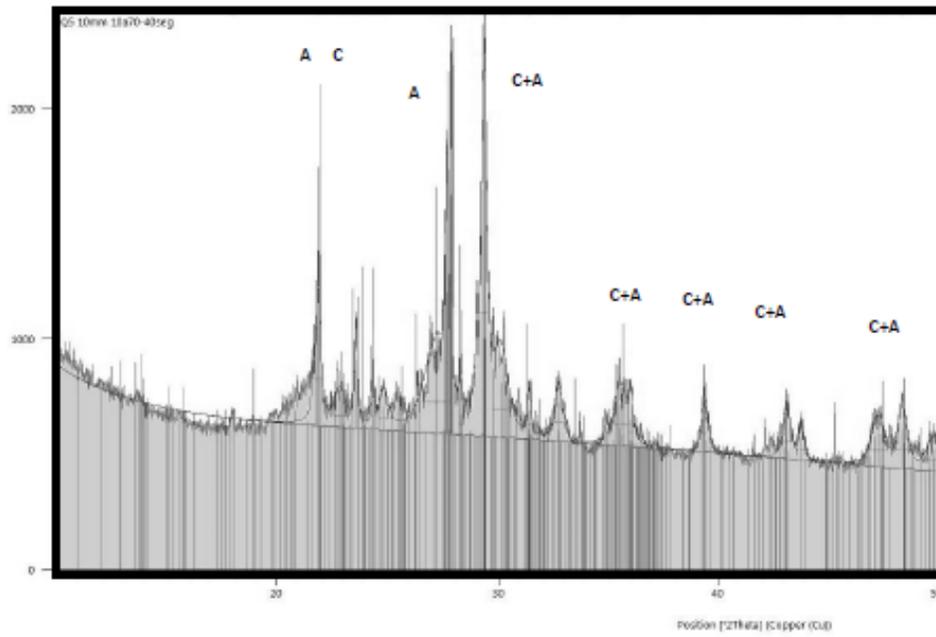
Difractograma de probeta Q4 (dieciséis días de exposición) centro de la muestra A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



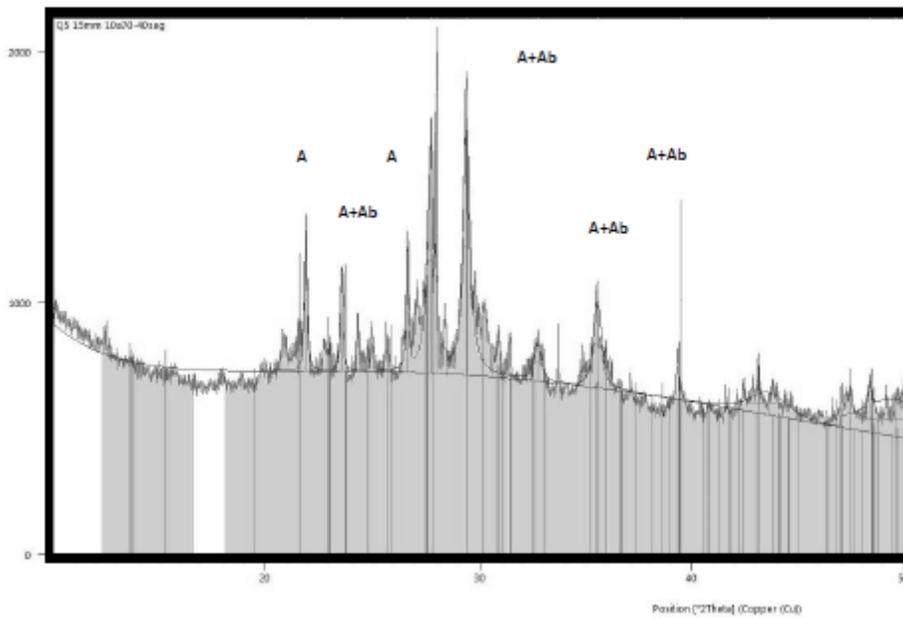
Difractograma de probeta Q5 (veintiocho días de exposición) en su parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



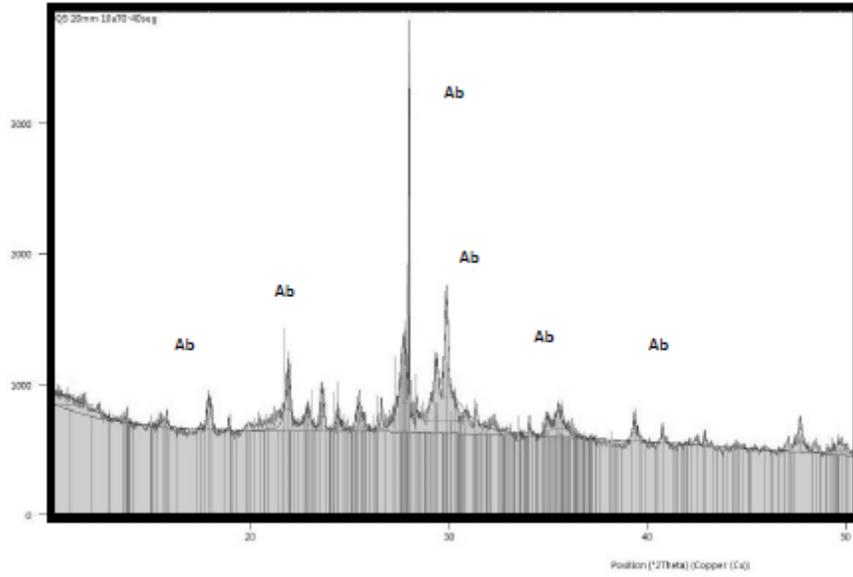
Difractograma de probeta Q5 (veintiocho días de exposición) a 5 mm de parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



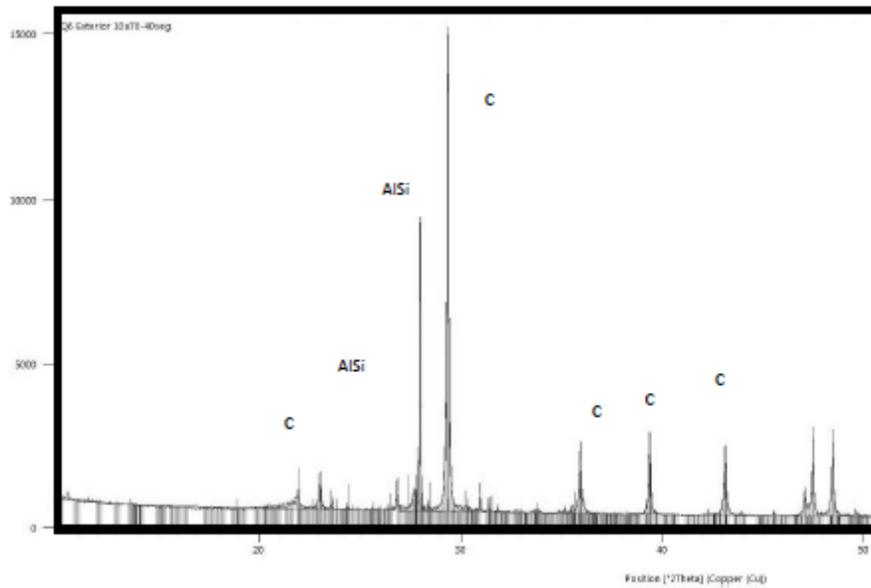
Difractograma de probeta Q5 (veintiocho días de exposición) a 10 mm de parte externa C: Calcita (CaCO_3) y A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)



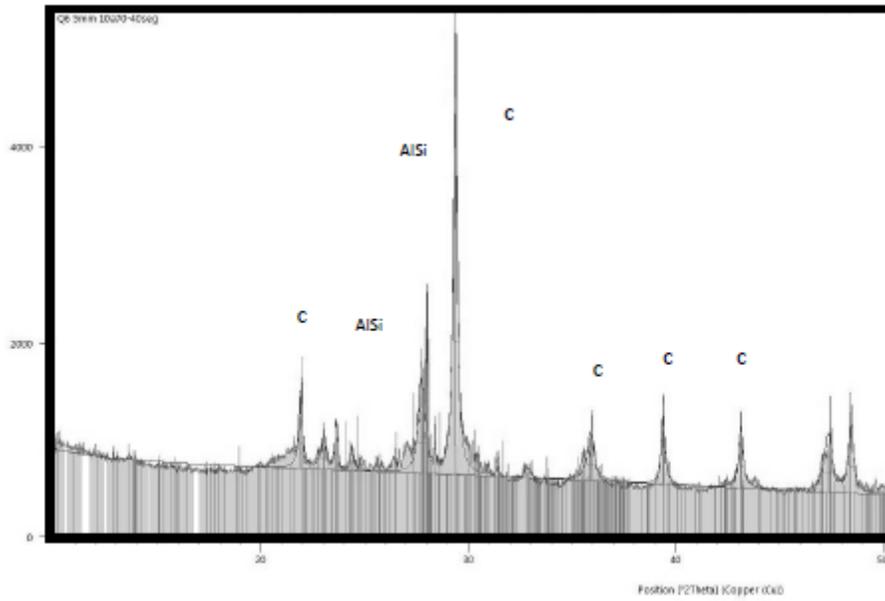
Difractograma de probeta Q5 (veintiocho días de exposición) a 15 mm de parte externa de probeta A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y y Ab: Albita baja ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$)



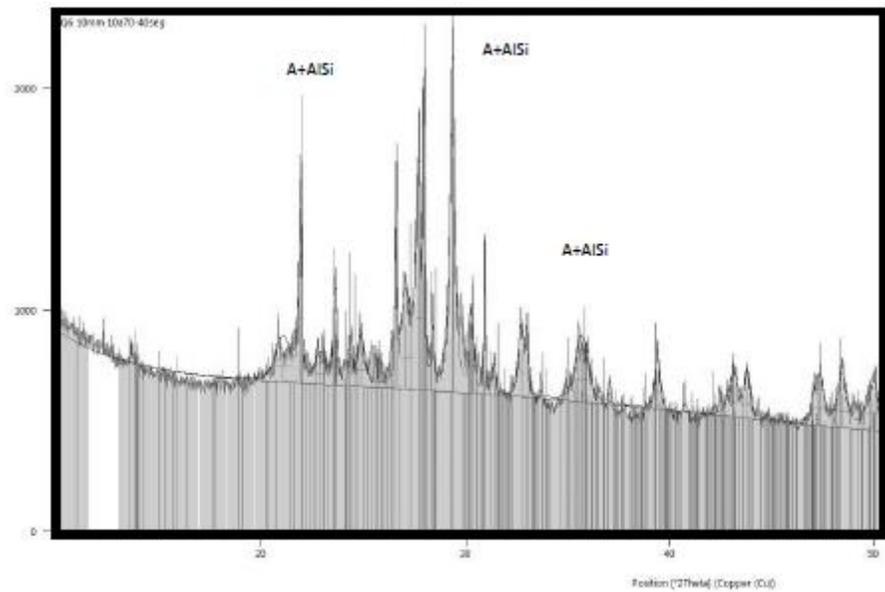
Difractograma de probeta Q5 (veintiocho días de exposición) a 20 mm de parte externa de probeta
 Ab: Albita alta ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$)



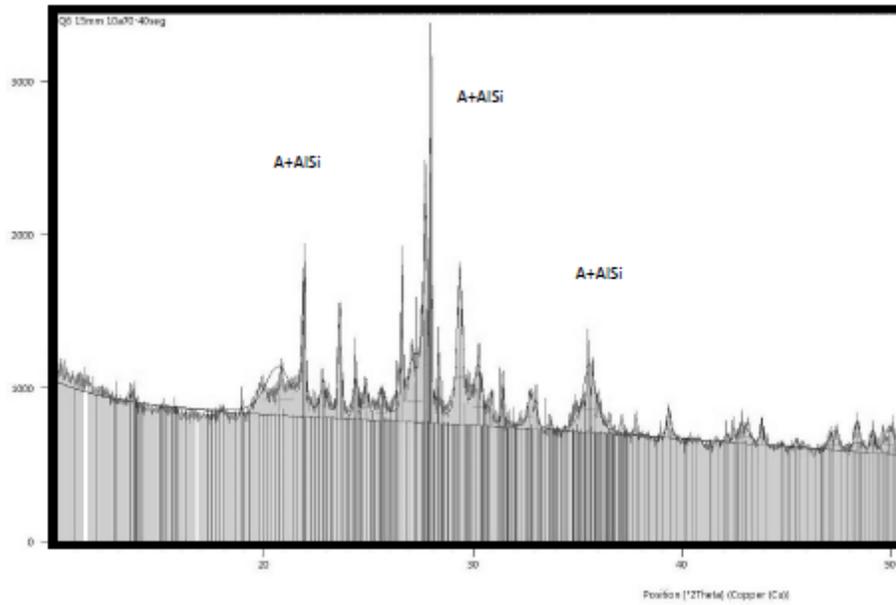
Difractograma de probeta Q6 (cuarenta y cuatro días de exposición) en su parte externa C: Calcita
 (CaCO_3) y AlSi: Aluminio Silicado de calcio-sodio



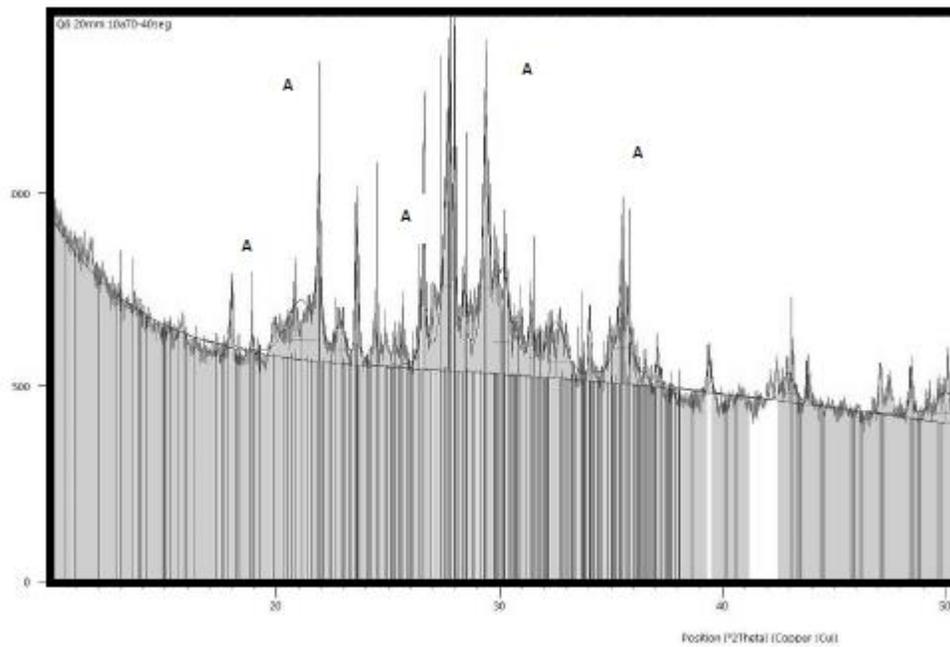
Difractograma de probeta Q6 (cuarenta y cuatro días de exposición) a 5 mm de parte externa C: Calcita (CaCO_3) y AlSi: Aluminio Silicado de calcio-sodio



Difractograma de probeta Q6 (cuarenta y cuatro de exposición) a 10 mm de parte externa C: Calcita (CaCO_3) y AlSi: Aluminio Silicado de calcio-sodio



Difractograma de probeta Q6 (cuarenta y cuatro días de exposición) a 15 mm de parte externa A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y AlSi: Aluminio Silicado de calcio-sodio



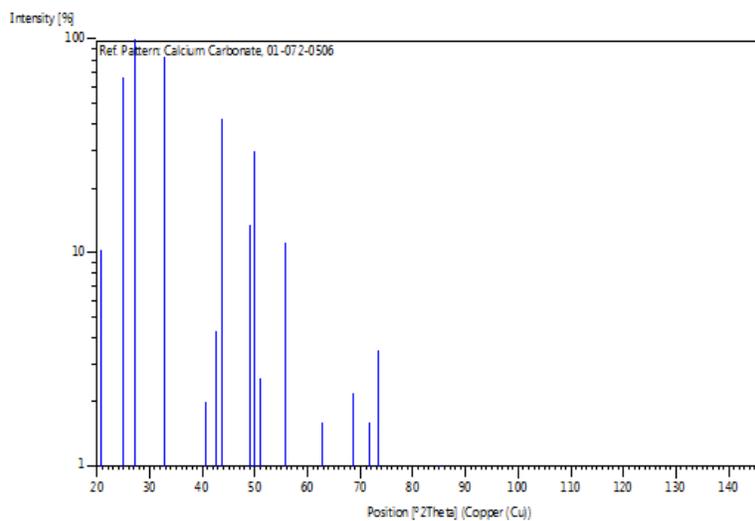
Difractograma de probeta Q6 (cuarenta y cuatro días de exposición) a 20 mm de parte externa A: Anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)

Name and formula

Reference code:	01-072-0506
Mineral name:	Vaterite, syn
Compound name:	Calcium Carbonate
PDF index name:	Calcium Carbonate
Empirical formula:	CCaO ₃
Chemical formula:	Ca (CO ₃)

Crystallographic parameters

Crystal system:	Hexagonal
Space group:	P63/mmc
Space group number:	194
a (Å):	4.1300
b (Å):	4.1300
c (Å):	8.4900
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	120.0000
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	125.41
Z:	2.00
RIR:	1.14

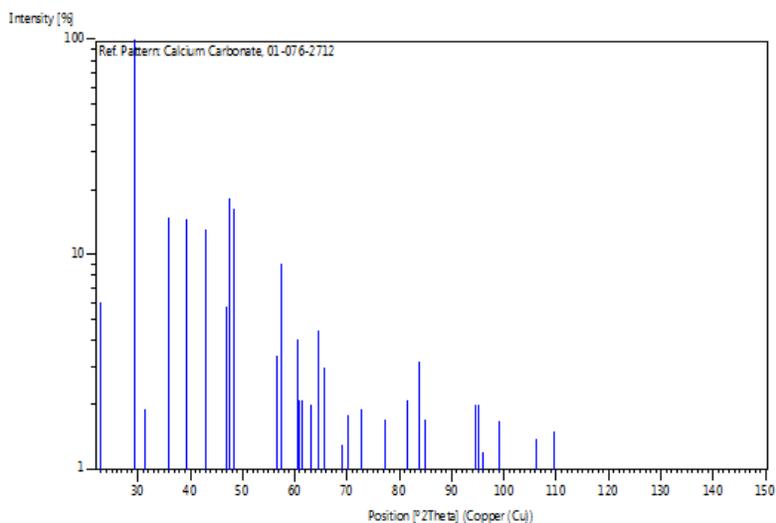


Name and formula

Reference code:	01-076-2712
Mineral name:	Calcite, syn
Compound name:	Calcium Carbonate
PDF index name:	Calcium Carbonate
Empirical formula:	CCaO ₃
Chemical formula:	Ca (CO ₃)

Crystallographic parameters

Crystal system:	Rhombohedral
Space group:	R-3c
Space group number:	167
a (Å):	4.9910
b (Å):	4.9910
c (Å):	17.0680
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	120.0000
Volume of cell (10 ⁶ pm ³):	368.20
Z:	6.00
RIR:	3.44



Name and formula

Reference code: 98-000-9835

Mineral name: Albite high
Compound name: Albite high
Common name: Albite high

Chemical formula: $\text{Al}_1\text{Na}_1\text{O}_8\text{Si}_3$

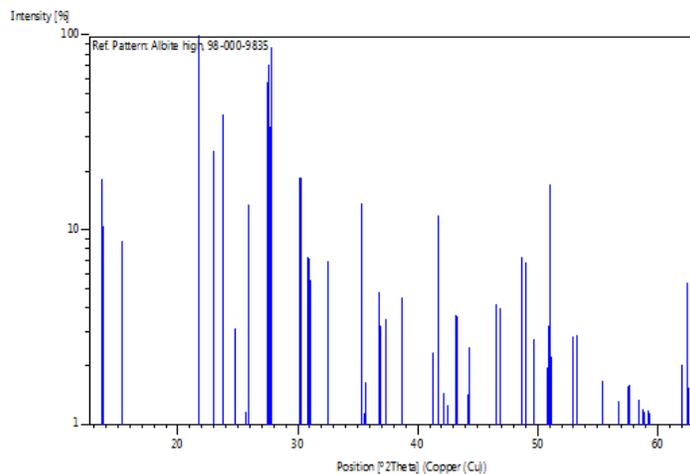
Crystallographic parameters

Crystal system: Anorthic
Space group: P -1
Space group number: 2

a (Å): 7.1450
b (Å): 7.6890
c (Å): 7.6890
Alpha (°): 114.8590
Beta (°): 103.6450
Gamma (°): 103.7420

Calculated density (g/cm³): 2.53
Volume of cell (10⁶ pm³): 344.23
Z: 4.00

RIR: 0.66



Name and formula

Reference code: 98-002-2023

Mineral name: Anorthite
Compound name: Anorthite
Common name: Anorthite

Chemical formula: $\text{Al}_2\text{Ca}_1\text{O}_8\text{Si}_2$

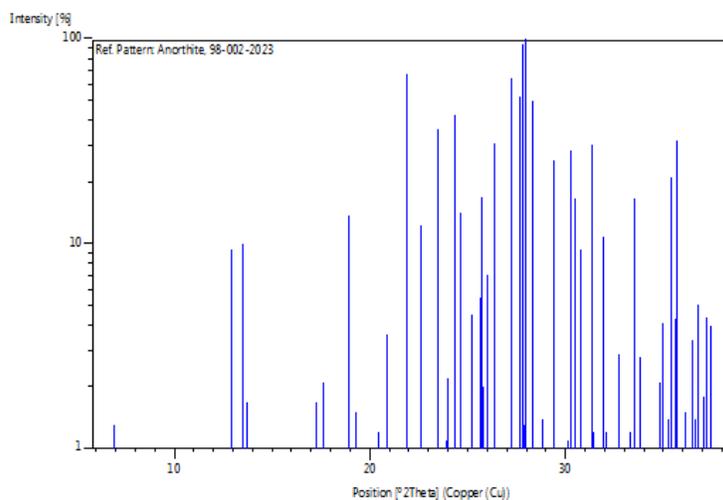
Crystallographic parameters

Crystal system: Anorthic
Space group: P -1
Space group number: 2

a (Å): 8.2230
b (Å): 12.9150
c (Å): 12.9500
Alpha (°): 86.3350
Beta (°): 80.9320
Gamma (°): 88.9800

Calculated density (g/cm³): 2.73
Volume of cell (10⁶ pm³): 1355.28
Z: 8.00

RIR: 0.53



Name and formula

Reference code: 98-003-4870

Mineral name: Albite low
Compound name: Albite low
Common name: Albite low

Chemical formula: $\text{Al}_1\text{Na}_1\text{O}_8\text{Si}_3$

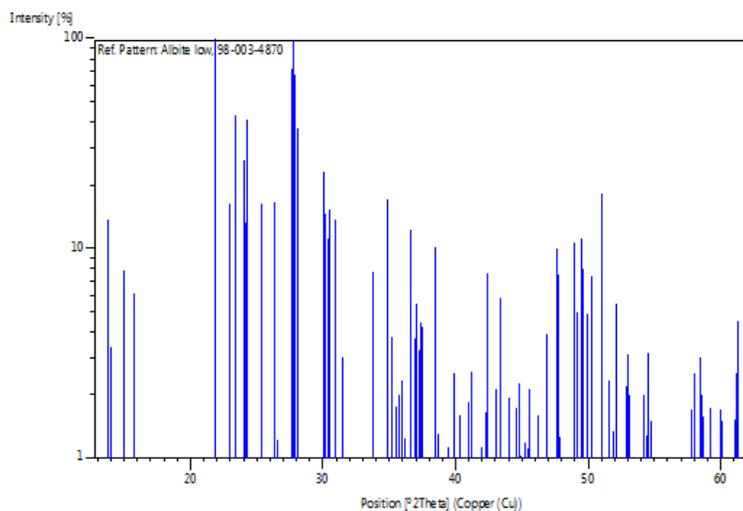
Crystallographic parameters

Crystal system: Anorthic
Space group: P -1
Space group number: 2

a (Å): 7.1690
b (Å): 7.4680
c (Å): 7.7480
Alpha (°): 114.7600
Beta (°): 107.0330
Gamma (°): 100.6310

Calculated density (g/cm³): 2.58
Volume of cell (10⁶ pm³): 336.87
Z: 4.00

RIR: 0.64



Name and formula

Reference code: 98-008-6329

Mineral name: Anorthite (annealed)
Compound name: Anorthite (annealed)
Common name: Anorthite (annealed)

Chemical formula: $\text{Al}_2\text{Ca}_1\text{O}_8\text{Si}_2$

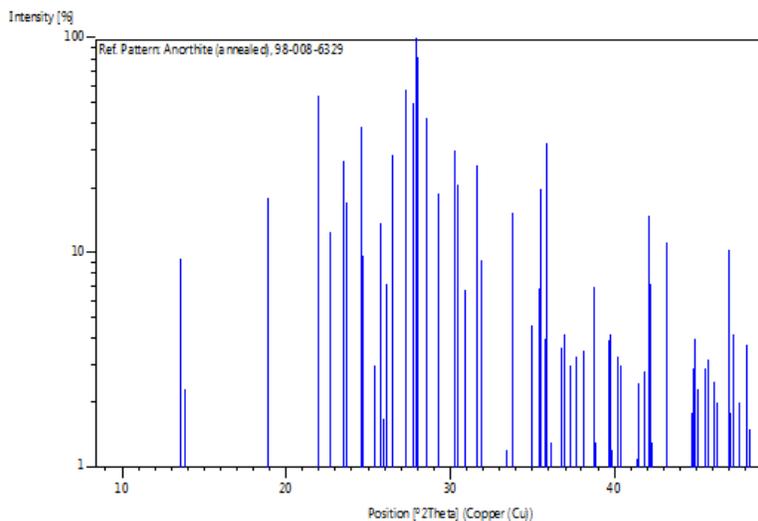
Crystallographic parameters

Crystal system: Anorthic
Space group: P -1
Space group number: 2

a (Å): 8.1810
b (Å): 8.7650
c (Å): 9.4530
Alpha (°): 89.7630
Beta (°): 83.0530
Gamma (°): 84.2480

Calculated density (g/cm³): 2.76
Volume of cell (10⁶ pm³): 669.46
Z: 8.00

RIR: 0.62



Name and formula

Reference code: 98-008-6333

Mineral name: Anorthite (annealed)
Compound name: Anorthite (annealed)
Common name: Anorthite (annealed)

Chemical formula: $\text{Al}_{1.98}\text{Ca}_{0.98}\text{Na}_{0.02}\text{O}_8\text{Si}_{2.02}$

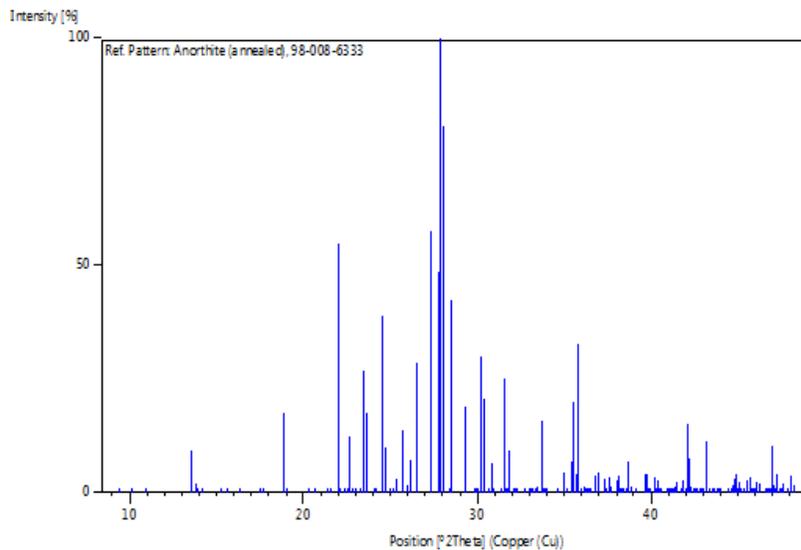
Crystallographic parameters

Crystal system: Anorthic
Space group: P -1
Space group number: 2

a (Å): 8.1850
b (Å): 8.7700
c (Å): 9.4540
Alpha (°): 89.7670
Beta (°): 83.0760
Gamma (°): 84.2330

Calculated density (g/cm³): 2.75
Volume of cell (10⁶ pm³): 670.25
Z: 8.00

RIR: 0.62



Name and formula

Reference code: 98-020-2228

Mineral name: Portlandite
Compound name: Portlandite
Common name: Portlandite

Chemical formula: $\text{H}_2\text{Ca}_1\text{O}_2$

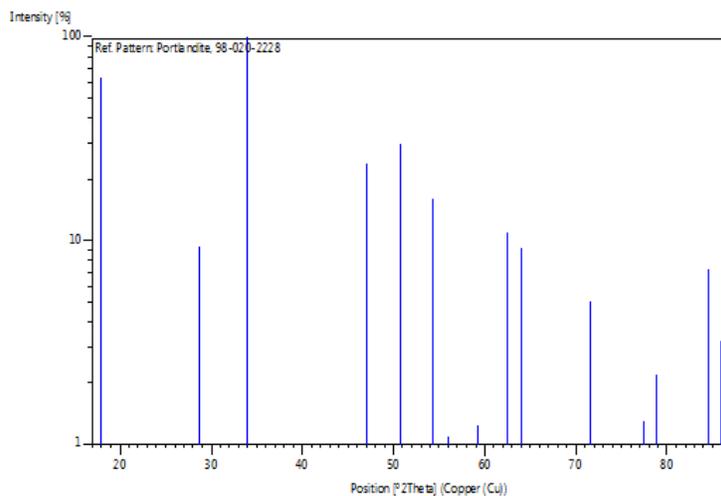
Crystallographic parameters

Crystal system: Hexagonal
Space group: P -3 m 1
Space group number: 164

a (Å): 3.5970
b (Å): 3.5970
c (Å): 4.9280
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 120.0000

Calculated density (g/cm³): 2.23
Volume of cell (10⁶ pm³): 55.22
Z: 1.00

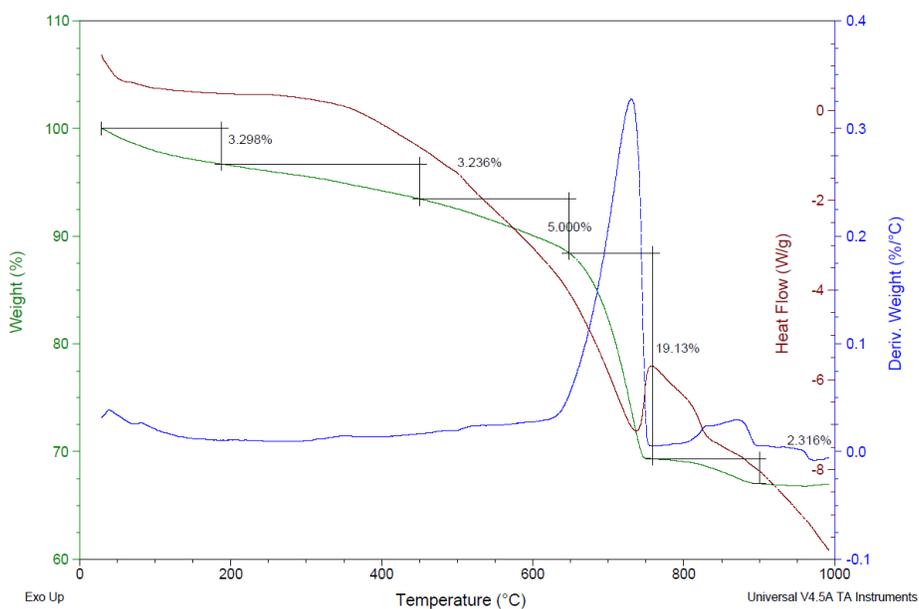
RIR: 3.55



Sample: Q6_externo
Size: 7.9480 mg
Method: Ze

DSC-TGA

File: C:\...\Asistencia\Q6_externo.001
Operator: RSTARBIRD
Run Date: 09-May-2018 13:27
Instrument: SDT Q600 V20.9 Build 20

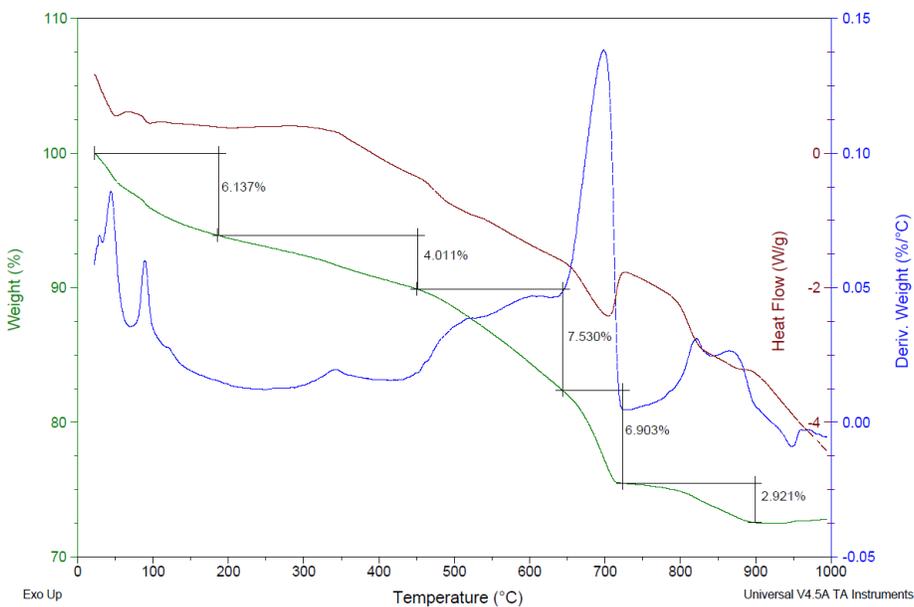


Curva derivada de ensayo termogravimétrico de muestra Q6 en zona externa

Sample: Q6_5mm
Size: 8.7930 mg
Method: Ze

DSC-TGA

File: C:\...\Asistencia\Q6_5mm.001
Operator: RSTARBIRD
Run Date: 04-May-2018 09:24
Instrument: SDT Q600 V20.9 Build 20

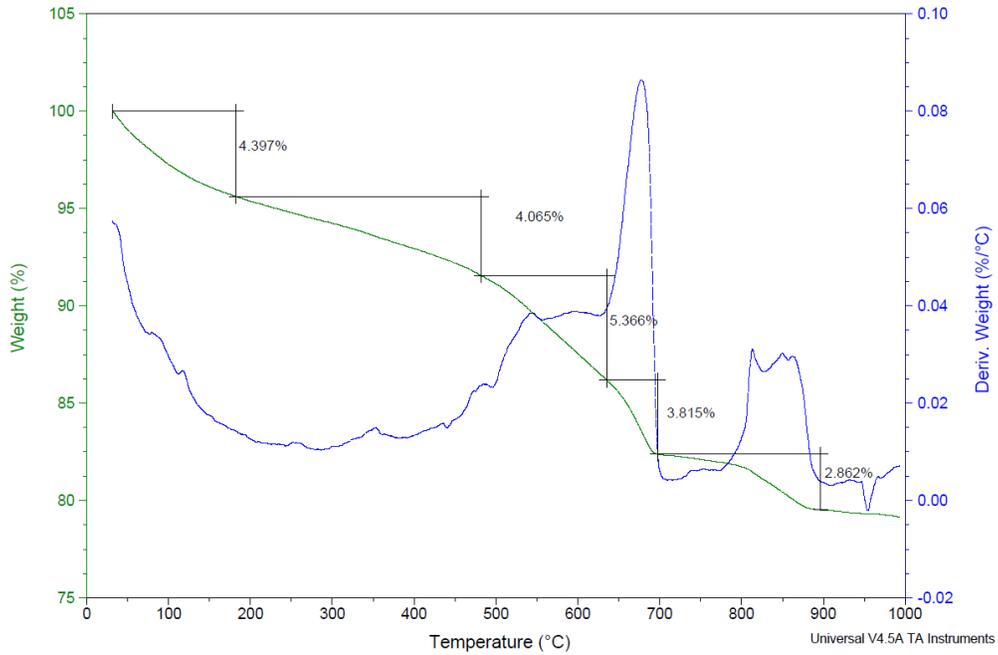


Curva derivada de ensayo termogravimétrico de muestra Q6 a 5 mm de profundidad

Sample: Q6_10mm
Size: 7.8430 mg
Method: Ze

DSC-TGA

File: C:\...\Asistencia\Q6_10mm.001
Operator: RSTARBIRD
Run Date: 04-May-2018 11:38
Instrument: SDT Q600 V20.9 Build 20

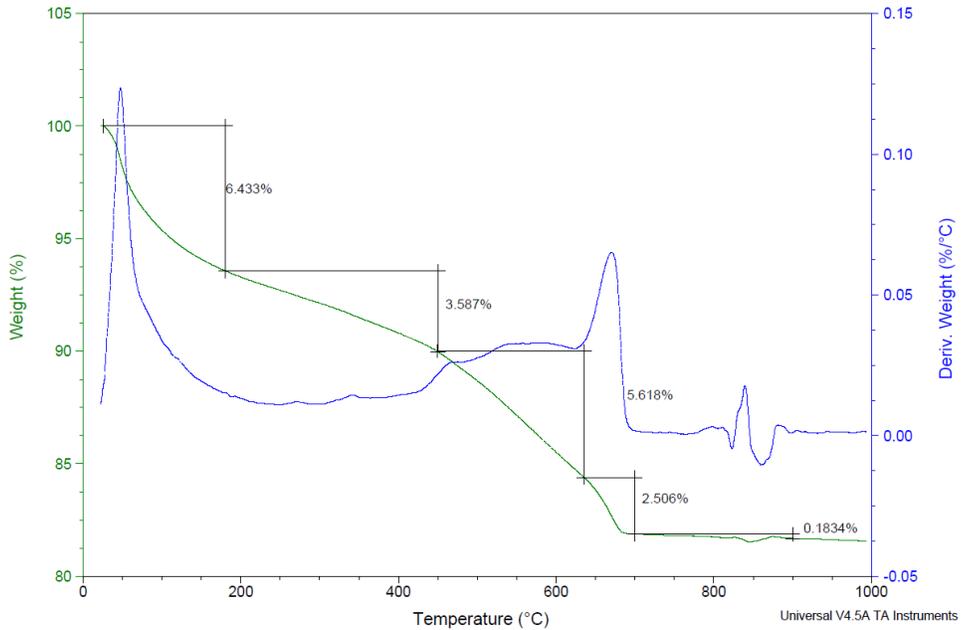


Curva derivada de ensayo termogravimétrico de muestra Q6 a 10 mm de profundidad

Sample: Q6_15mm
Size: 9.1540 mg
Method: Ze

DSC-TGA

File: C:\...\Asistencia\Q6_15mm.001
Operator: RSTARBIRD
Run Date: 09-May-2018 08:53
Instrument: SDT Q600 V20.9 Build 20

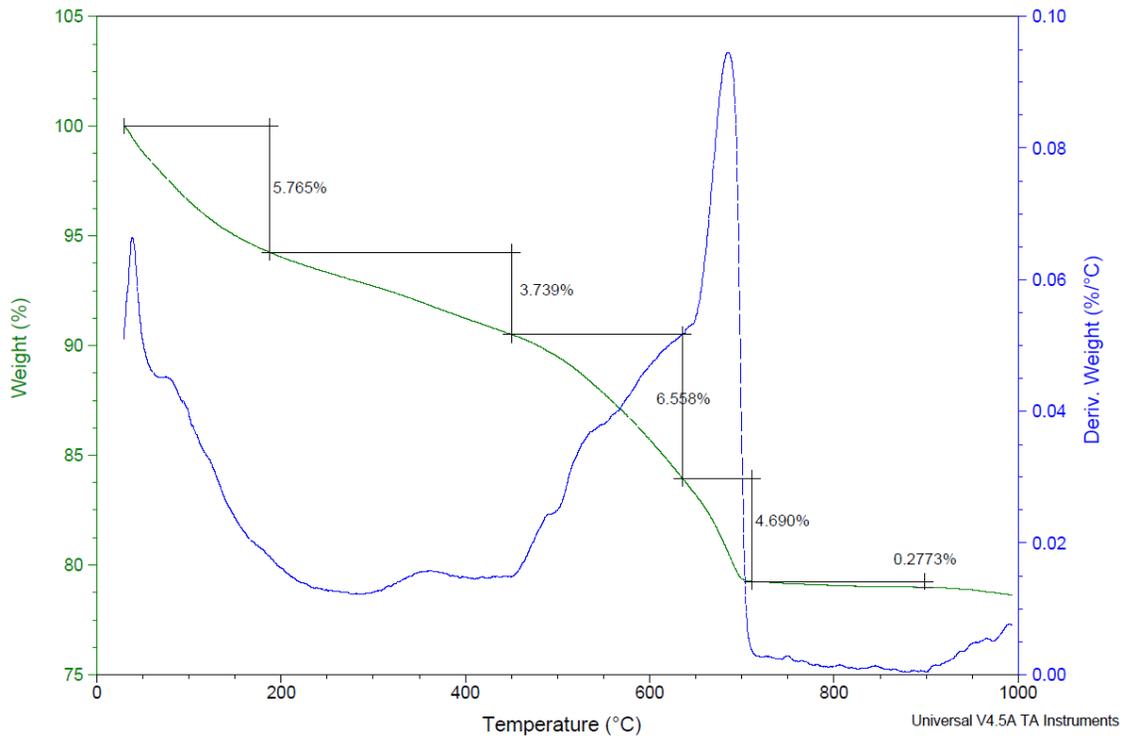


Curva derivada de ensayo termogravimétrico de muestra Q6 a 15 mm de profundidad

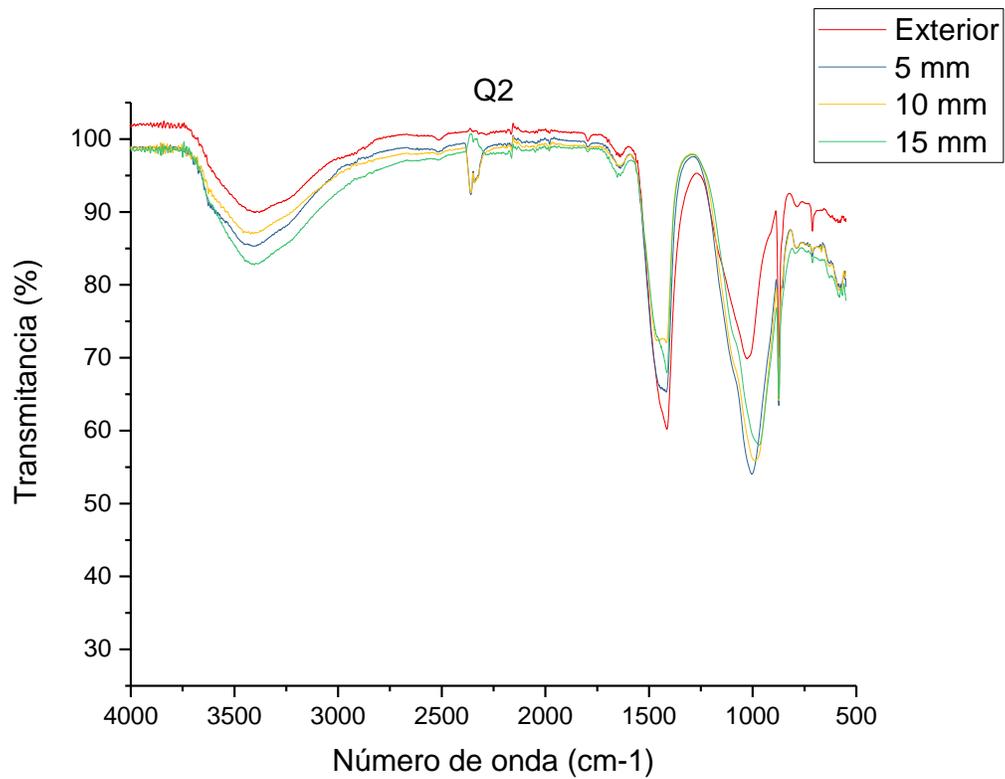
Sample: Q6_20mm
Size: 9.5970 mg
Method: Ze

DSC-TGA

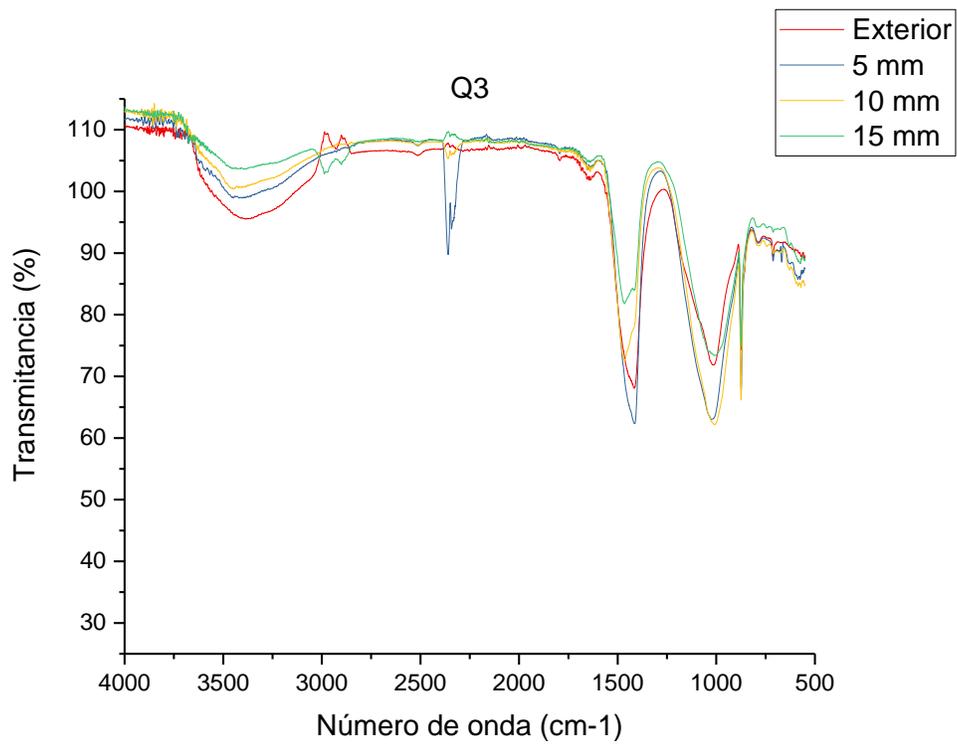
File: C:\...\Asistencia\Q6_20mm.001
Operator: RSTARBIRD
Run Date: 09-May-2018 11:07
Instrument: SDT Q600 V20.9 Build 20



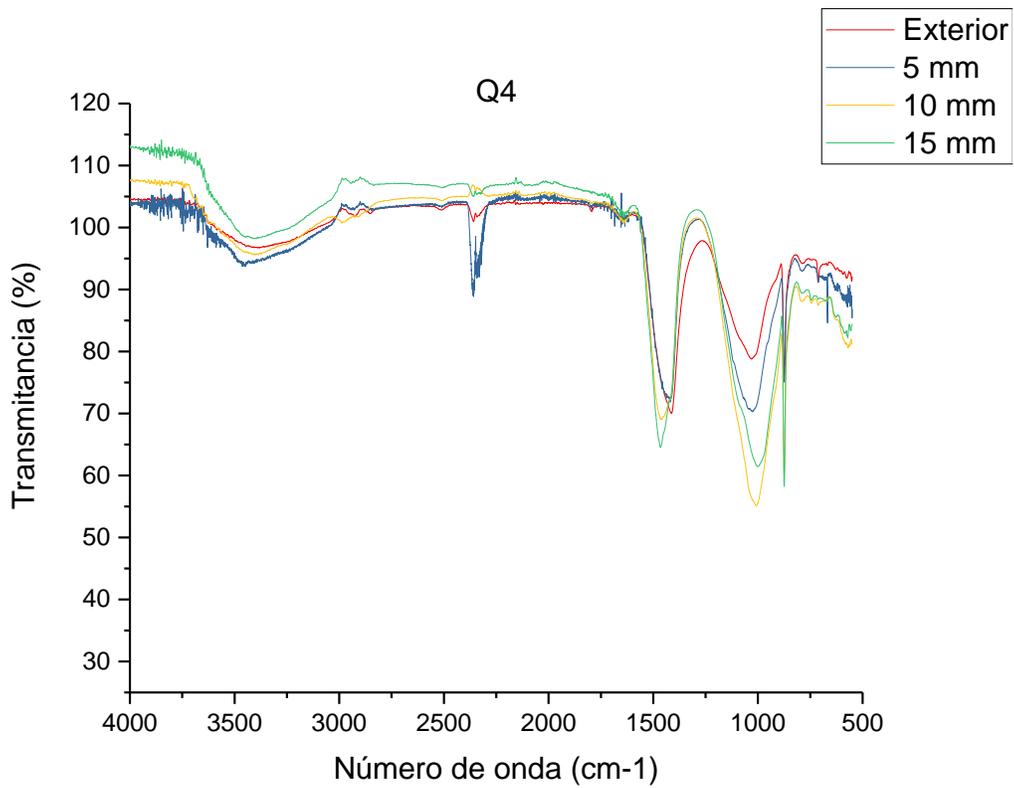
Curva derivada de ensayo termogravimétrico de muestra Q6 a 20 mm de profundidad



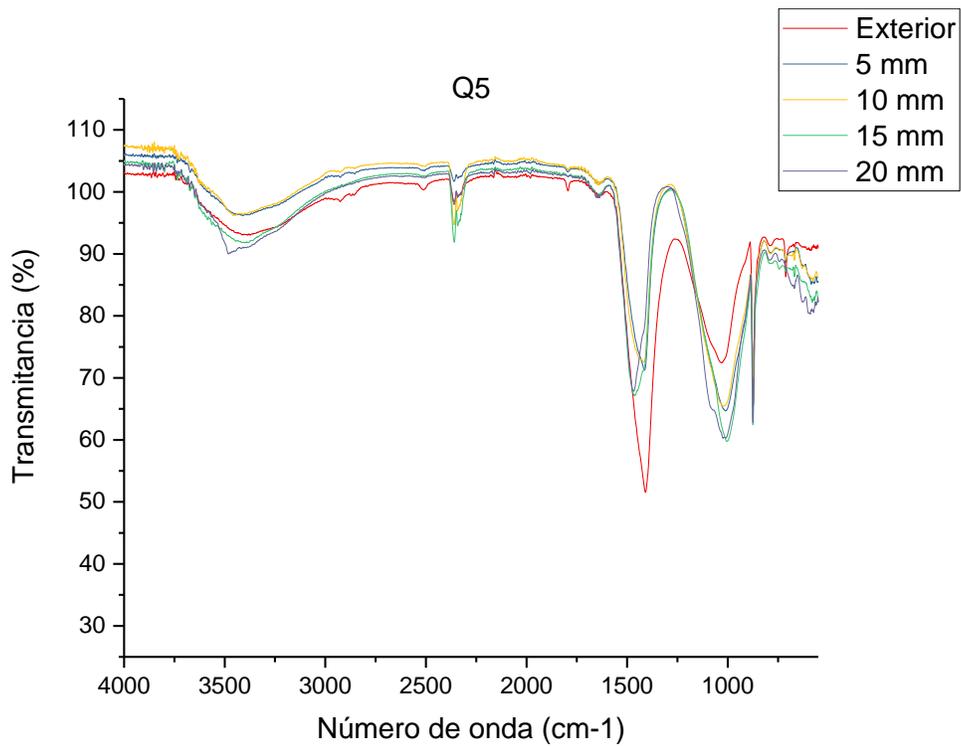
Espectroscopias FTIR para la probeta de 4 días en función de profundidad de carbonatación



Espectroscopias FTIR para la probeta de 8 días en función de profundidad de carbonatación



Espectroscopias FTIR para la probeta de 16 días en función de profundidad de carbonatación



Espectroscopias FTIR para la probeta de 28 días en función de profundidad de carbonatación