

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CARBONATACIÓN SOBRE EL
COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DEL ION CLORURO EN CONCRETO

DIEGO ARMANDO BALAGUERA REINA
BLANCA ELIZABETH PORRAS ARÉVALO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2009

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CARBONATACIÓN SOBRE EL
COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DEL ION CLORURO EN CONCRETO

DIEGO ARMANDO BALAGUERA REINA
BLANCA ELIZABETH PORRAS ARÉVALO

Trabajo de Grado realizado para optar al título de Ingeniero(a) Metalúrgico(a)

Director
M.Sc. CUSTODIO VÁSQUEZ QUINTERO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2009

*A mi madre que con su amor y su luz ha guiado mi camino,
A mi padre por su fuerza y conocimiento,
A Sergio por su amistad y sus buenos consejos,
A Xime por su ternura y cariño,
Por último y no menos importante a Eli
quien ha sido mi gran apoyo en esta
etapa de mi vida*

Diego Armando Balaquera Reina

A Dios por permitirme hacer parte de una familia inigualable.

A mi Madre por ser mi inspiración, mi guía, mi ejemplo.

A mi Papá por su generosidad, esfuerzo y dedicación.

A Alejo por su altruismo, apoyo y cariño.

A Gabo por transmitirme su pasión por nuestra profesión, por su lucha y su amor por la vida.

A Diego por su ternura, tolerancia y compromiso con el presente trabajo.

A mis amigos Andrea y Orlando por su compañía, por quererme y comprenderme de la forma como lo hacen.

A Fabián y Carlos por el apoyo y la alegría.

Blanca Elizabeth Porras Arévalo

AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarnos siempre y permitirnos culminar esta etapa satisfactoriamente.

A la Universidad Industrial de Santander, Universidad de Antioquia, Colciencias y la Armada Nacional, por el apoyo económico, técnico y humano.

Agradecemos a nuestro director de proyecto, *M.Sc.* Custodio Vásquez Quintero, por su calidad humana. Y constante orientación, por compartir sus conocimientos y ofrecernos desinteresadamente su ayuda contribuyendo al aprendizaje de una manera abierta y generosa.

Queremos también agradecer al *Ph.D.* Darío Yesid Peña Ballesteros, Director de Investigaciones y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, por su confianza, enseñanzas, y amor a la investigación inculcada, además de todas las gestiones para llevar a cabo el presente proyecto.

Debemos también agradecer al *Qco. M.Sc.* Olger Mendoza, del Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Medio Ambiente, por su oportuna colaboración en el desarrollo de los análisis de cloruros.

A los técnicos de Ingeniería Metalúrgica Ambrosio Carrillo, Javier Quintana, Daniel Garavito y Mario Navarrete, por su disposición durante toda esta etapa. Así mismo, a Jairo Hernández, técnico de Ingeniería Civil, por su valiosa ayuda y orientación en la fabricación de las probetas y el desarrollo de las pruebas mecánicas de éstas.

A nuestros compañeros y amigos, quienes contribuyeron a que nuestra estancia en la UIS, fuera una extensión de nuestro hogar, a Andrea Bernal, Carlos Pabón, Fabián Oviedo y en especial a Orlando Buitrago por su amistad y ayuda incondicional con el desarrollo de nuestro proyecto. No queremos dejar de mencionar a Nancy García, Laura Corzo, Sebastián Flórez, Haroldo González, Gerson Barrera y Sergio Gualdrón, amigos que de una u otra forma, contribuyeron en algún momento.

Por último, queremos agradecer inmensamente a nuestras familias por ser nuestra mayor inspiración y ejemplo a seguir. A nuestros padres, un agradecimiento infinito por su perseverancia, sacrificio y lucha; a nuestros hermanos por su amistad, ímpetu y apoyo incondicional. Mil y mil Gracias!

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
2.	OBJETIVOS	4
2.1.	OBJETIVO GENERAL.....	4
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3.	MARCO TEÓRICO.....	5
3.1.	CONCRETO.....	5
3.1.1.	Componentes del concreto.....	5
3.1.1.1.	Cemento Portland	5
3.1.1.2.	Agregados.....	7
3.1.1.3.	Hidratación del cemento	8
3.2.	CARBONATACIÓN DEL CONCRETO	9
3.2.1.	Carbonatación acelerada.....	11
3.3.	DAÑO INDUCIDO POR CLORUROS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO	11
3.4.	PRUEBAS EMPLEADAS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL ATAQUE POR CLORUROS EN CONCRETOS.	13
3.4.1	Prueba rápida de penetración de cloruros (RCPT)	13
3.4.2	Prueba acelerada de migración de cloruros (ACMT)	14
3.4.3.	Ensayo de penetración de cloruros por inmersión	15
3.5.	Breve Repaso: Solución de la Segunda Ley de Fick para Difusión Tipo Planar.....	15
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	17
4.1.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	18
4.2.	MATERIALES Y EQUIPOS	18
4.3.	PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	21
4.3.1.	Diseño de la mezcla	21
4.3.2.	Distribución de las probetas	21
4.3.3.	Fabricación de las probetas.....	22
4.3.4.	Ensayo de compresión	24
4.3.5.	Corte de las probetas	25
4.3.6.	Recubrimiento de las probetas con pintura epóxica.....	26
4.4.	CARBONATACIÓN	26
4.4.1	Pruebas preliminares.....	27
4.4.2	Carbonatación acelerada	27

4.4.3.	Ensayo de Fenolftaleína	28
4.4.4.	Difracción de Rayos X (DRX)	28
4.4.5.	Microscopia de Barrido Electrónico (SEM)	30
4.5.	ENSAYO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS POR INMERSIÓN	31
4.5.1.	Extracción de la muestra	32
4.5.2.	Titulación potenciométrica	33
4.6.	RCPT: ENSAYO RÁPIDO DE PENETRACIÓN DEL ION CLORURO	34
4.7.	ACMT: ENSAYO DE MIGRACIÓN ACELERADA DE CLORUROS.....	36
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
5.1.	CARBONATACIÓN	37
5.1.1.	Determinación de los coeficientes de carbonatación	37
5.1.2.	Determinación de la profundidad del frente de carbonatación	39
5.1.2.1.	Profundidades del frente de carbonatación para relación a/c = 0.4	39
5.1.2.2.	Profundidades del frente de carbonatación para relación a/c = 0.5	40
5.1.2.3.	Profundidades del frente de carbonatación para relación a/c = 0.6	41
5.1.3.	Caracterización cualitativa frente carbonatado	43
5.1.3.1.	Análisis SEM y DRX muestra no carbonatada.....	43
5.2.	ENSAYO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS POR INMERSIÓN	48
5.2.1.	Determinación de la profundidad de penetración del ion cloruro.....	48
5.2.2.	Determinación del perfil de cloruros y del coeficiente de difusión.	52
5.2.3.	Determinación carga pasante pruebas ACMT y RCPT	55
6.	CONCLUSIONES.....	59
7.	RECOMENDACIONES	61
	ANEXOS.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fabricación del Cemento Portland	6
Figura 2: Proceso de carbonatación	10
Figura 3: Influencia de la humedad en el proceso de carbonatación.....	11
Figura 4: Estados del ion cloruro en el hormigón	12
Figura 5: Desarrollo experimental	17
Figura 6: Mezcla de los materiales para la elaboración de las probetas.....	23
Figura 7: Moldeo de las probetas.....	23
Figura 8: Máquina de Ensayos de concretos, Marca Trebel.....	25
Figura 9: Probetas para los ensayos mecánicos.....	25
Figura 10: Montaje para la Carbonatación Acelerada	26
Figura 11: Partes o componentes al interior de la cámara de Carbonatación	27
Figura 12: Extracción de muestras para DRX	29
Figura 13: Equipo para Microscopia de Barrido Electrónico	30
Figura 14: Extracción de las muestras	32
Figura 15: Montaje para el acondicionamiento de las probetas.....	35
Figura 16: Esquema del montaje y de la celda para RCPT	35
Figura 17: Montaje para ACMT.....	36
Figura 18: Profundidad del Frente Carbonatado, Probetas ACMT 0,4 B.....	39
Figura 19: Frente de Carbonatación, relación a/c: 0,5.....	40
Figura 20: Profundidad Frente Carbonatado, Probetas del Ensayo de inmersión, O,6 B .	41
Figura 21: Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra no carbonatada	44
Figura 22: Difractograma de la muestra no carbonatada	45
Figura 23: Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra carbonatada.	46
Figura 24: Difractograma muestra Carbonatada	47
Figura 25: Profundidad de penetración del ión cloruro Vs. Tiempo, relación a/c: 0,5	49
Figura 26: Perfil de cloruros 30 días, relación a/c: 0,4.....	52
Figura 27: Perfil de cloruros 45 días	53

Figura 28: Perfil de cloruros, 60 días	53
Figura 29: Coeficientes de Difusión Vs. Relación a/c.....	54
Figura 30: Relación entre volumen capilar y coeficiente de difusión	54
Figura 31: Carga pasante prueba ACMT	56
Figura 32: Carga pasante prueba RCPT.....	57
Figura 33: Carga pasante obtenida mediante RCPT, Relación a/c: 0,4	58
Figura 34: Carga pasante obtenida mediante ACMT, Relación a/c: 0,4	58
Figura 35: Carga pasante obtenida mediante RCPT, Relación a/c: 0,5	58
Figura 36: Carga pasante obtenida mediante ACMT, Relación a/c: 0,5	58
Figura 37: Carga pasante obtenida mediante RCPT, Relación a/c: 0,6	58
Figura 38: Carga pasante obtenida mediante ACMT, Relación a/c: 0,6	58
Figura 39: Producción mundial de cemento durante el siglo XX	II
Figura 40: Proyección del consumo de Cemento, 2020	III
Figura 41: Reporte de calidad del cemento.....	V
Figura 42: Variación de la corriente en el tiempo, durante el RCPT, Relación a/c 0,4	XI
Figura 43: Variación de la corriente en el tiempo, durante el ACMT, relación a/c 0,4.....	XI
Figura 44: Resultados prueba RCPT, a/c: 0,5.....	XIII
Figura 45: Resultados prueba ACMT, a/c : 0,5	XIII
Figura 46: Resultados prueba RCPT, a/c: 0,6.....	XV
Figura 47: Resultados prueba ACMT, a/c: 0,6	XV
Figura 48: Profundidades de penetración, relación a/c: 0,4.....	XVIII
Figura 49: Profundidades de penetración, relación a/c: 0,6.....	XVIII
Figura 50: Perfil de cloruros, 30 días, relacion a/c: 0,5.....	XX
Figura 51: Perfil de cloruros, 45 días, relación a/c: 0,5.....	XX
Figura 52: Perfil de cloruros, 60 días, relación a/c: 0,5.....	XXI
Figura 53: Perfil de cloruros, 30 días, relación a/c: 0,6.....	XXI
Figura 54: Perfil de cloruros, 45 días, relacion a/c: 0,6.....	XXII
Figura 55: Perfil de concentración 60 días, relación a/c: 0,6	XXII
Figura 56 Linealización del perfil de concentración, relación a/c: 0,4	XXIV
Figura 57: Linealización del perfil de concentración, relación a/c: 0,5	XXIV
Figura 58: Linealización del perfil de concentración, relación a/c: 0,6	XXV

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Nomenclatura de los óxidos que componen el cemento Portland	6
Tabla 2: Tipos de Cemento.....	7
Tabla 3: Penetrabilidad del ion Cloruro, basado en la carga pasante.....	14
Tabla 4: Equipos empleados.....	20
Tabla 5: Distribución de las probetas	22
Tabla 6: Resultados ensayos de resistencia a la compresión	24
Tabla 7: Parámetros de operación DRX.....	29
Tabla 8: Distribución de las probetas para la prueba de inmersión	31
Tabla 9: Profundidades de Frente de Carbonatación [mm]	37
Tabla 10: Tiempos de Carbonatación [horas]	38
Tabla 11: Profundidades del Frente de Carbonatación, [cm].....	39
Tabla 12: Profundidad del Frente de carbonatación para las probetas de $a/c=0,4$ [cm] ...	39
Tabla 13: Profundidad del Frente de carbonatación para las probetas de $a/c = 0,5$ [cm] .	40
Tabla 14: Profundidad del Frente de carbonatación para las probetas de $a/c = 0,6$ [cm] .	41
Tabla 15: Profundidad de ingreso del Ión cloruro [mm]*	48
Tabla 16: Coeficientes de penetración.....	50
Tabla 17: Índices de penetración	50
Tabla 18: Fotografías prueba de colorimetría relación $a/c: 0,5$	51
Tabla 19: Coeficientes de Difusión.....	53
Tabla 20: Carga pasante Relación $A/C = 0,4$	55
Tabla 21: Carga pasante Relación $A/C = 0,5$	55
Tabla 22: Carga Pasante Relación $A/C = 0,6$	55
Tabla 23: Composición Química Cemento Portland Tipo I Marca Diamante [%].....	V
Tabla 24: Gravedades Específicas del Agregado	VI
Tabla 25: Otras propiedades del agregado	VI
Tabla 26: análisis Granulométrico del Agregado Fino	VI
Tabla 27: Análisis Granulométrico del Agregado Grueso	VI
Tabla 28: Diseño de la mezcla para concreto con $a/c = 0,4$	IX

Tabla 29: Diseño de la mezcla para concreto con $a/c = 0,5$	IX
Tabla 30: Diseño de la mezcla para concreto con $a/c = 0,6$	IX
Tabla 31: Corriente Medida (mA), Prueba ACMT, Relación A/C: 0,4	XII
Tabla 32: Corriente Medida (mA), Prueba RCPT, Relación A/C: 0,4	XII
Tabla 33: Corriente Medida (mA), Prueba RCPT, Relación A/C: 0,5	XIV
Tabla 34: Corriente Medida (mA), Prueba ACMT, Relación A/C: 0,5	XIV
Tabla 35: Corriente Medida (mA), Prueba RCPT, Relación A/C: 0,6	XVI
Tabla 36: Corriente Medida (mA), Prueba ACMT, Relación A/C: 0,6	XVI

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Consumo de Concreto en el mundo.....	I
Anexo 2: Reportes de Calidad de los Materiales.....	V
Anexo 3: Diseño de la Mezcla.....	X
Anexo 4: Resultados de ACMT y RCPT.....	XII
Anexo 5: Profundidades de Penetración.....	XIX
Anexo 6: Perfiles de Concentración del Ion Cloruro.....	XXI
Anexo 7: Linealización de los Perfiles de Concentración.....	XXV
Anexo 8: DRX: Análisis Cuantitativo.....	XXVII

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CARBONATACIÓN SOBRE EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DEL ION CLORURO EN CONCRETO¹

AUTOR: BALAGUERA REINA DIEGO ARMANDO, PORRAS ARÉVALO BLANCA ELIZABETH^{}**

PALABRAS CLAVES: Carbonatación, Coeficiente de Difusión, Ion Cloruro, Concreto.

RESUMEN: Este trabajo presenta el estudio de la influencia de la Carbonatación sobre la Penetración y el coeficiente de difusión del ion Cloruro, en probetas de concreto fabricadas con Cemento Portland tipo I, con 3 relaciones de a/c 0.4, 0.5 y 0.6.

Probetas con 28 días de curado, fueron sometidas a un proceso de carbonatación acelerada, con el fin de obtener dos frentes diferentes, en su orden: 5 mm (Frente A) y 10 mm (Frente B). Esta prueba se llevó a cabo en un ambiente de 25 % de CO₂ y una Humedad Relativa entre 55 - 65 %.

La profundidad de penetración del frente carbonatado fue medida mediante el ensayo de Fenolftaleína, y tanto la zona carbonatada como la no carbonatada, fueron caracterizadas mediante ensayos de Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Posteriormente, estas probetas fueron ensayadas mediante 3 métodos: Prueba Acelerada de Migración de Cloruros (ACMT), Prueba rápida de Penetración de Cloruros (RCPT) y Ensayo de penetración de cloruros por inmersión, con el fin de evaluar el ingreso del cloruro a través de la matriz cementicia, y determinar el coeficiente de difusión bajo esas condiciones mediante esta última técnica; para esto, se realizaron pruebas de colorimetría y titulación potenciométrica a muestras de estas probetas ensayadas, extraídas a 5 diferentes profundidades. De esta forma se obtuvo un perfil de concentración de cloruros, cuyos datos fueron llevados a la Segunda Ley de Fick.

De acuerdo con los ensayos realizados se observa una influencia marcada de la carbonatación, en la capacidad de penetración del ion cloruro a través de la matriz cementicia. Además, en relación con la carga pasante, se pudo corroborar, mediante comparación de cargas entre los métodos ACMT y RCPT la influencia de la temperatura en la capacidad difusiva del cloruro.

¹ Trabajo de Grado

^{**} Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: M.Sc. Custodio Vásquez Quintero.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF CARBONATION EFFECT ON CHLORIDE ION DIFFUSION COEFFICIENT OF CONCRETE*

AUTHOR: BALAGUERA REINA DIEGO ARMANDO, PORRAS ARÉVALO BLANCA ELIZABETH**

KEYWORDS: Carbonation, Chloride ion Diffusion Effective Coefficient, Chloride Ion, Concrete

ABSTRACT: Influence of carbonation on chloride ion penetration and diffusion coefficient into concrete specimens made with Portland cement type I, with three W/C ratios (0.4, 0.5 and 0.6), was evaluated in the present study. Specimens with 28 days in curing time were subjected of accelerated carbonation process, obtaining two different carbonation fronts (5 mm front A, 10 mm front B). 25 % CO₂ and 55 – 65 % relative rain environmental specimens was exposed.

Front carbonation measure depth was determinate used the phenolphthalein test and both (carbonated and no carbonated front) were characterized using X ray diffraction test and Scanning Electron Microscopy SEM.

Specimens were analyzed using three techniques: Accelerated Chloride Migration Test (ACMT), Rapid Chloride Penetration Test (RCPT) and Chloride Penetration by immersion test, evaluating the chloride penetration into of concrete, and to calculate the diffusivity coefficient using the last technique; the chloride penetration depth measurement were realized by colorimetric method and pulverized samples were extracted from the specimens to obtain chloride profiles in concrete. For each sample, the free chloride content was determined by potentiometric titrations, and the results were fit on to Fick's Second Law.

According to the tests a strong influence of carbonation over the penetration capacity of the chloride ion through the matrix of cement paste was observed, in relation with the passing charge. Besides, the influence of the temperature over the diffusiveness of the chloride ion was corroborated, by comparing the charges between the ACMT and RCPT methods.

* Work of Degree

** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Science of Materials, Director: M.Sc. Custodio Vásquez Quintero.

1 INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el área de la construcción, el material más empleado en el mundo es el concreto reforzado³, debido a sus excelentes propiedades y su costo. Este material sufre daños físicos, químicos y mecánicos, los cuales afectan su durabilidad, y contribuyen al deterioro de las estructuras.

El principal daño que sufre el concreto reforzado es el ocasionado por la corrosión⁴, el cual genera inconvenientes en la durabilidad de la estructura, y por ende altos costos de reparación y problemas de seguridad de la misma.

Es por esto que se consideró importante realizar estudios en torno a este problema asociado a la corrosión en concreto, y así contribuir al entendimiento del fenómeno, los procesos de difusión, y a la interacción de los agentes causantes de dicho daño.

Es un tema de actualidad y de alta relevancia a nivel mundial; en Estados Unidos, por ejemplo, en el 2002, el costo directo anual fue estimado en \$ 8,3 billones de dólares, donde se incluyen \$ 3,8 billones para reemplazar construcciones deficientes en la década siguiente, y \$ 4 billones para mantenimiento, costo de capital y estructuras de hormigón. Estas cifras convierten a la corrosión del refuerzo de concretos en un problema socioeconómico mundial, cuyas pérdidas se calculan en decenas de miles de millones de dólares por año en el planeta⁵.

Aun, no hay un estudio publicado acerca del impacto económico en Colombia generado por el deterioro de estructuras en concreto, sin embargo se puede

³ MOKHTAR. K. Ait. Steel corrosion in reinforced concrete Report n°2-2 Concrete in marine environment. LEPTAB La Rochelle University. Project N°197

⁴ CORNELIUS, Gerardus. Prediction of Deterioration of Concrete Bridges. DUP Science. Netherlands, 2004

⁵ NACE International – the Corrosion Society – 1440 South Creek Drive – Houston, TX 77084-4906. En: <http://www.nace.org>

afirmar que el riesgo es alto, debido a la extensión de su territorio costero de aproximadamente 2,900 km (1600 km costa Atlántica y 1300 costa Pacífica), ambiente en el cual se aceleran los procesos de corrosión en las estructuras de hormigón, por la acción directa del mar o la actividad de la brisa marina.

En el concreto reforzado, el proceso de corrosión puede ser ocasionado tanto por reacciones electroquímicas y químicas, como por difusión de sustancias agresivas y productos de las reacciones a través de la matriz cementicia.

Los dos factores principales, que causan la corrosión en el concreto reforzado son:

1. El Ion Cloruro, el cual puede estar presente desde el proceso de amasado del concreto o incluirse por difusión desde el exterior en el concreto si la estructura se encuentra en un ambiente contaminado; estos iones llegan al refuerzo de acero, lo despasivan localmente y minimizan la protección que el concreto ofrece naturalmente al metal.
2. La Carbonatación, que es considerada la reacción del dióxido de carbono atmosférico, con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto; esta reacción produce una pérdida de la alcalinidad, es decir, una disminución considerable del pH, y por tanto, la aparición del frente carbonatado (zona neutralizada), que al entrar en contacto con el acero, ocasiona una despasivación generalizada.

Los estudios existentes se han realizado con pruebas aceleradas, en su mayoría, y se han concentrado en el daño ocasionado por los Cloruros; es por esto, que se decidió investigar el proceso de carbonatación en concretos y su efecto en la difusión de cloruros, contribuyendo al estudio de la durabilidad de este material.

Este trabajo se desarrolló como parte del proyecto de Investigación titulado "DESARROLLO METODOLÓGICO ELECTROQUÍMICO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN DE LA CORROSIVIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

SOMETIDAS A LOS AMBIENTES MARINOS DE LAS COSTAS DEL PACIFICO COLOMBIANO” bajo responsabilidad del Grupo de Investigaciones en Corrosión, financiado por Colciencias, la Armada Nacional, Universidad de Antioquia y la Universidad Industrial de Santander.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el efecto de la carbonatación sobre el coeficiente de difusión del ion cloruro en concreto.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Efectuar el proceso acelerado de carbonatación en medio acuoso, de las probetas de concreto fabricadas con relaciones a/c de 0.4, 0.5 y 0.6.
- Evaluar cualitativamente la composición química del frente carbonatado, mediante Difracción de rayos X y Microscopia de Barrido Electrónico.
- Determinar el efecto de la profundidad de la capa carbonatada en la difusión del ion cloruro en concretos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. CONCRETO

El concreto es un material de construcción, el cual se produce mediante la mezcla de dos componentes principales: La pasta de cemento y los agregados. La pasta de cemento es obtenida de la mezcla de agua y cemento; los agregados son de dos tipos, finos (arena) y gruesos (grava).

La mezcla de estos componentes, es moldeada y compactada, lo cual le confiere ciertas propiedades de rigidez, convirtiéndolo en un material sólido con considerable resistencia mecánica.

Por sus componentes y la forma de preparación, este material cuenta con una alta resistencia a la compresión, la cual es considerablemente mayor que la resistencia a la tracción; esto puede ser mejorado por presencia del acero de refuerzo.

3.1.1. Componentes del concreto

3.1.1.1. Cemento Portland ⁶

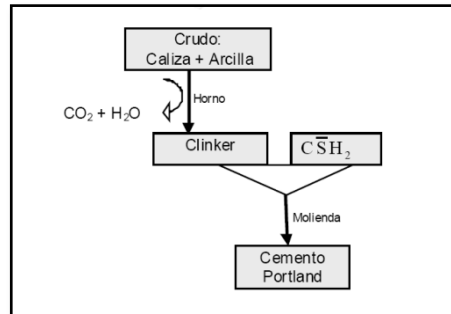
El cemento Portland es obtenido del proceso de molienda del producto de cocción de una mezcla de caliza y arcilla (clínker) y de yeso di hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), el cual actúa como regulador de fraguado (Ver Figura 1).

El clínker, es el componente alcalino del cemento, está compuesto por silicatos, aluminato y ferrito aluminato de cal; esto indica que en el crudo, es decir, el material que se cuece en el horno, se encuentran los óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio. Otros óxidos presentes en menores proporciones son los de

⁶ Rojas Noguera, María José Sánchez. Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: Estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento. Universidad de Alicante. 2004.

magnesio, sodio y potasio, los cuales no son tan deseables. Los componentes del cemento Portland y su nomenclatura, se relacionan en la Tabla 1.

Figura 1. Fabricación del Cemento Portland



Fuente: Rojas Noguera, 2004

Tabla 1: Nomenclatura de los óxidos que componen el cemento Portland

NOMBRE	OXIDO	ABREVIATURA
Cal	CaO	C
Sílice	SiO ₂	S
Alúmina	Al ₂ O ₃	A
Oxido férrico	Fe ₂ O ₃	F
Agua	H ₂ O	H
Trióxido de azufre	SO ₃	\bar{S}
Dióxido de carbono	CO ₂	\bar{C}
Magnesia	MgO	M
Oxido de sodio	Na ₂ O	N
Oxido de potasio	K ₂ O	K

Fuente: Rojas Noguera, 2004

De la Tabla 1, hay que mencionar que el trióxido de azufre, \bar{S} , nunca se encuentra como tal, sino combinado, como por ejemplo en el yeso añadido como regulador de fraguado $CaSO_4 \cdot 2H_2O = C\bar{S}H_2$. De igual forma, el dióxido de carbono se encuentra combinado, por ejemplo en el carbonato cálcico.

La clasificación de los tipos de cemento, según su aplicación, fue realizada por la ASTM, y se relaciona en la Tabla 2.

Tabla 2: Tipos de Cemento

CEMENTO	USO
Tipo I	Cemento de uso general
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente a los sulfatos
Tipo III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado
Tipo IV	Presenta calor de hidratación más bajo que el tipo III. Apto para uso masivo
Tipo V	Alta resistencia a la acción de los sulfatos (aguas freáticas y domesticas)

Fuente: ASTM C150

3.1.1.2. Agregados

Los agregados empleados en la fabricación del concreto son de tipo fino y grueso, y sus especificaciones están reguladas por la norma ASTM C-33; tales especificaciones comprenden: limpieza, clasificación, acidez, granulometría, entre otros.

Los agregados están íntimamente relacionados con la calidad y resistencia del concreto, es por esto que se considera que le confieren al concreto, estabilidad volumétrica y mayor vida útil; además influyen considerablemente en el comportamiento térmico, químico y físico del concreto⁷.

El agregado fino empleado es la arena de río, y debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Tamaño menor a 5 mm
- Contar con un Módulo de finura entre 2,3 y 3,1.
- El material que pasa por el tamiz 200 no puede ser mayor al 5 %.
- Estar libre de micas o materiales que afecten la resistencia del concreto.

⁷ DEL VALLE, Angélica et al. EL FENOMENO DE LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001.

3.1.1.3. Hidratación del cemento

Este proceso se inicia con el Fraguado, en el cual reaccionan los componentes del cemento Portland con el agua, generando así el endurecimiento del mismo. Para que esta reacción se dé ampliamente, se requiere contar mínimo con una cantidad de agua equivalente al 40 % del peso del cemento; esta relación a/c, influencia directamente la trabajabilidad del material, y a su vez la porosidad y permeabilidad del mismo. En este orden, se tiene que para una baja relación a/c, se tendrá una menor porosidad y por ende una menor difusión de oxígeno, cloruros, entre otros.

Esta relación se considera el factor más importante en la protección del acero de refuerzo, debido a que determina el volumen de vacíos capilares y su interrelación en el interior del concreto, siendo éste el vehículo para la penetración de los agentes agresivos⁸.

En el tiempo posterior al fraguado, se hace necesario mantener un ambiente completamente húmedo para garantizar la hidratación, y por ende el incremento de la resistencia mecánica del concreto. Este proceso de hidratación, siguiente al fraguado, es conocido como Curado; durante él, se induce la formación de una capa pasiva protectora en la superficie del acero, provocada por la presencia de especies alcalinas, como son KOH, NaOH y Ca(OH)₂.

Durante el proceso de hidratación ocurren las reacciones entre los minerales del cemento, Alita (C3S), Belita (C2S), Felita (C3A), y Celita (C4AF) y el agua, además, de la presencia de yeso y otros aditivos. Los productos de las reacciones son principalmente silicatos de calcio hidratados, hidróxido de calcio y sulfoaluminatos de calcio hidratados⁹.

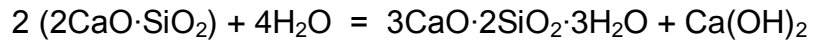
⁸ GONZALES, Manuel. La corrosión del concreto en ambiente marino. I Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción, American Concrete Institute, Capítulo Peruano, 1998.

⁹ GIRALDO M, Manuel Alejandro. Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2005

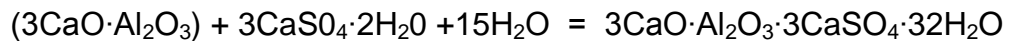
La Alita es el silicato menos estable y durante esta etapa reacciona con el agua formando Tobermorita gel (CSH) y Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).



En cuanto a la Belita, ésta también se convierte en Tobermorita y Portlandita en menor proporción y con una velocidad de reacción menor.



La reacción del aluminato de calcio con el yeso, produce Etringita.



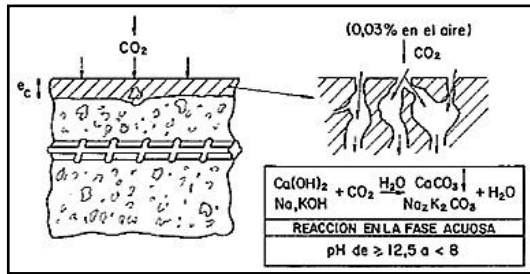
3.2. CARBONATACIÓN DEL CONCRETO

El Concreto es un material muy poroso, el cual permite la penetración en su interior del CO_2 del aire, a través de los poros. Cuando esto sucede, se produce la reacción del CO_2 con el hidróxido de calcio del hormigón (Portlandita) y los compuestos hidratados del cemento, formándose carbonato de calcio.¹⁰

Una vez todo el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, KOH y NaOH presentes en los poros han sido carbonatados, el valor de pH empieza a disminuir. Una vez el cemento ha sido carbonatado completamente se puede medir un pH menor a 9.

¹⁰ ROJAS NOGUERA, María José Sánchez. Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento. Universidad de Alicante. 2004

Figura 2: Proceso de carbonatación



Fuente: Mejía de Gutiérrez, 1999

Este proceso se caracteriza por la presencia de un frente carbonatado, como se observa en la Figura 2, el cual separa zonas de un pH diferente, una zona de pH <9 y una con pH >12. Además, este frente puede ser medido rociando fenolftaleína sobre la superficie del concreto, dando como indicación un color púrpura en la zona no carbonatada, y sin cambio de color en la zona carbonatada.

El avance de la carbonatación es un proceso lento, cuya velocidad se atenúa con el tiempo, ajustándose a una ley parabólica del tipo:

$$X_c = K_c * \sqrt{t} \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo:

X_c : Profundidad de la capa carbonatada en mm

K_c : Constante de carbonatación en mm/año^{0.5}

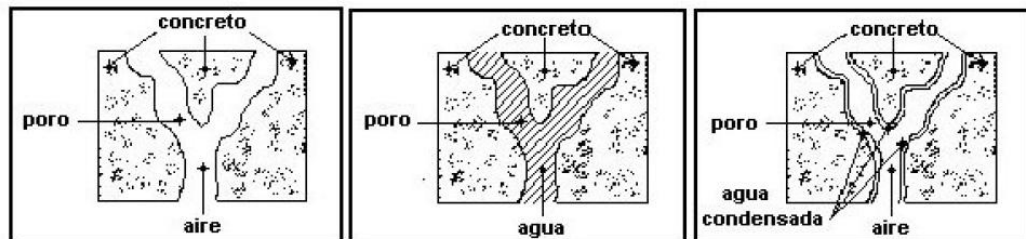
t : Tiempo (edad del hormigón)

Entre la serie de factores que afectan el proceso de carbonatación, se tienen: contenido de CO₂ en la atmósfera, permeabilidad del hormigón, cantidad de sustancia carbonatable (contenido y tipo de cemento) y humedad relativa del ambiente.

A medida que se aumenta la relación a/c se producen concretos más permeables, los cuales a su vez favorecen el proceso de carbonatación. En cuanto a la humedad, en hormigones secos o completamente saturados no es posible que se

produzca carbonatación; como se observa en la Figura 3, si el poro está completamente seco, el CO₂ difunde, pero no ocurre carbonatación debido a la ausencia de la humedad; si los poros se encuentran saturados de agua, los niveles de carbonatación son extremadamente bajos, debido a la baja difusión del CO₂ en el agua, esto es similar a lo que sucede en estructuras completamente sumergidas. Así que para obtener una penetración máxima de CO₂ se deben tener o proporcionar humedades comprendidas entre el 50% y el 70%.¹¹

Figura 3: Influencia de la humedad en el proceso de carbonatación



Fuente: Del Valle Moreno, 2001

3.2.1. Carbonatación acelerada

El proceso de carbonatación es un proceso bastante lento, de ahí que para poder realizar experimentación y determinar las características de concretos carbonatados en el laboratorio, se ha venido implementando un proceso de carbonatación acelerada.

3.3 DAÑO INDUCIDO POR CLORUROS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Los iones cloruro llegan al hormigón ya sea porque se añaden con sus componentes (aditivos, agua, etc.) durante el amasado, o porque penetran desde el exterior a través de la red de poros¹².

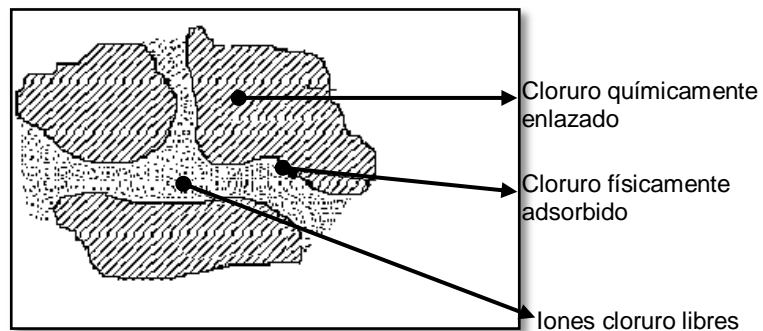
¹¹ DEL VALLE, Angélica et al. El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001

¹² Rojas Noguera, María José Sánchez. Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento. Universidad de Alicante, 2004

Una vez los iones han logrado entrar a través de la red de poros, se disuelven en el agua contenida en estos, y avanzan hacia el interior por difusión u otros mecanismos de transporte. Sin embargo, los iones cloruro disueltos en los poros pueden interaccionar con las fases sólidas del hormigón quedando inmobilizados, por tanto, el cloruro dentro del hormigón puede encontrarse en varios estados, como se observa en la Figura 4:

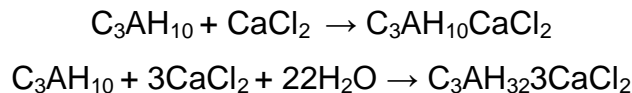
- *Cloruro libre*: permanece disuelto en el agua que contiene los poros. Se desplaza por el interior del hormigón mediante difusión u otros mecanismos.
- *Cloruro químicamente enlazado*
- *Cloruro físicamente adsorbido*

Figura 4: Estados del ion cloruro en el hormigón



Fuente: Del Valle Moreno, 2001

El mayor responsable de la unión química de cloruros con la matriz de concreto es el aluminato tricálcico C_3A , el cual reacciona con los cloruros que ingresan disueltos para formar las *sales de Freidel* $C_3AH_{10}CaCl_2$ y el tricloroaluminato hidratado $C_3AH_{32}3CaCl_2$.



La unión física de los iones cloruro al concreto se da mediante el mecanismo de adsorción, y el responsable dentro de la matriz de concreto es la Tobermorita gel, ya que presenta una amplia área superficial sobre la cual se adsorben los cloruros.

Los cloruros libres son los de mayor importancia, ya que estos pueden llegar hasta la armadura metálica y despasivar localmente e iniciar el proceso corrosivo, de ahí que sea muy importante la capacidad del concreto para ligar cloruros.

3.4. PRUEBAS EMPLEADAS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL ATAQUE POR CLORUROS EN CONCRETOS.¹³

La difusión, migración, absorción capilar, y presión hidrostática, son los principales medios por los cuales los cloruros pueden penetrar en el concreto. El método más común es la difusión, el cual consiste en un movimiento de los iones cloruro bajo un gradiente de concentración. Para que esto ocurra, el concreto deberá tener una fase continua líquida, y ésta a su vez, deberá tener un gradiente de concentración de cloruros.

Entre las técnicas más empleadas para determinar la resistencia al ataque por cloruros se encuentran:

3.4.1 Prueba rápida de penetración de cloruros (RCPT)¹⁴

En la norma AASHTO T277 (ASTM C1202), una probeta saturada en agua, de 50 mm de espesor, y 100 mm de diámetro, es sometida a 60 V durante 6 horas. La carga total que pasa es determinada y utilizada para clasificar el concreto de acuerdo al criterio establecido en la Tabla 3.

Esta prueba comúnmente utilizada, aunque inapropiadamente llamada “prueba rápida de permeabilidad de cloruros” fue originalmente desarrollada por Whiting (1981).

¹³ K.D. Stanish, R.D. Hooton and M.D.A. Thomas Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review. Universidad de Toronto

¹⁴ American Society for Testing and Materials. ASTM C1202

El nombre es inapropiado, ya que no es la permeabilidad lo que está siendo medido sino el movimiento iónico; adicionalmente es el movimiento de todos los iones, y no solo de los iones cloruro, lo cual afecta el resultado de la prueba (la carga total pasante, Q_{pas}).

Tabla 3: Penetrabilidad del ion Cloruro, basado en la carga pasante

Carga pasante (coulomb)	Penetrabilidad ion Cloruro
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baja
100-1000	Muy Baja
<100	Despreciable

Fuente: ASMT C1202

3.4.2 Prueba acelerada de migración de cloruros (ACMT)

Esta prueba se da como una versión modificada de la prueba anterior (RCPT), aplicándose una carga de 24 voltios, en una probeta de 100 mm de diámetro por 30 mm de longitud.

Fue desarrollada para medir la corriente y los iones cloruro pasantes a través de la probeta. Para este método, el coeficiente de difusión en estado estable es calculado a partir de la ecuación de Nerst–Planck, y para el estado no estacionario se calcula de acuerdo a la ecuación modificada de la Segunda Ley de Fick.

La carga pasante se determina para un ensayo de 9 horas, ya que de acuerdo a la relación entre alturas de las probetas y carga aplicada, se asumió que el tiempo de exposición para esta prueba debía ser 3/2 veces el tiempo de empleado para RCPT¹⁵.

¹⁵ YANG, CC. An electrochemical method for accelerated chloride migration test of diffusion coefficient in cement-based materials, 2003.

3.4.3. Ensayo de penetración de cloruros por inmersión¹⁶

Es un ensayo basado de la norma AASHTO T259, dado a conocer por Wee *et al.* (2000), en el cual, cilindros de concreto que son sometidas a determinados tiempos de curado, son sumergidas en un bebedero con solución de NaCl al 3%, a un tiempo establecido, (hasta 90 días).

Después de este lapso, los cilindros son retirados de la pileta, y partidos por la mitad; después de esto, una de las mitades es rociada con una solución de AgNO₃ 0,1N, para determinar la profundidad de penetración del ión cloruro, y la otra mitad es utilizada para la extracción de muestras pulverizadas a determinada distancia para el análisis de cloruros.

3.5. Breve Repaso: Solución de la Segunda Ley de Fick para Difusión Tipo Planar¹⁷

La Segunda Ley de Fick describe la difusión planar a través del eje X,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde D es el coeficiente de difusión en m²/s. Aplicando las condiciones iniciales apropiadas, la ecuación 2 puede ser resuelta para obtener la concentración de la sustancia difusiva como una función del tiempo t y la posición x .

Para el caso de la fuente de plano instantáneo, en un medio semiinfinito, se puede asumir que la cantidad total de sustancia difusiva m es inicialmente depositada en la superficie del medio semiinfinito y ninguna otra fuente de sustancia difusiva está

¹⁶ CARVALHO SIQUEIRA, Henrique. Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento portland branco e escória de alto forno, ativados químicamente. Universidad Federal de Santa Maria, RS, Brasil, 2008

¹⁷ ANDRADE, Carmen et al. A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete Part I. The instantaneous plane source diffusion case. Cement and Concrete Research N°32, 1113–1123, Spain, 2002.

presente durante el proceso de difusión. Por lo tanto las condiciones iniciales son las siguientes:

- a. La cantidad total de sustancia difusiva es constante

$$m = \int_0^{\infty} C dx \geq 0 \quad \text{Ecuación 3}$$

- b. Para puntos lejanos de la superficie la sustancia no difunde (medio semiinfinito)

$$C = 0 \text{ para } x \rightarrow \infty \text{ y } t \geq 0 \quad \text{Ecuación 4}$$

- c. Inicialmente toda la sustancia difusiva se encuentra en la superficie

$$C = 0 \text{ para } x > 0 \text{ y } t = 0 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$C \rightarrow \infty \text{ para } x = 0 \text{ y } t = 0 \quad \text{Ecuación 6}$$

Solucionando la ecuación 2 con las condiciones 3, 4, 5 y 6, se obtiene la siguiente expresión:

$$C = \frac{m}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\left(\frac{x^2}{4Dt}\right)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Esta ecuación puede ser linealizada mediante logaritmos, como se muestra a continuación:

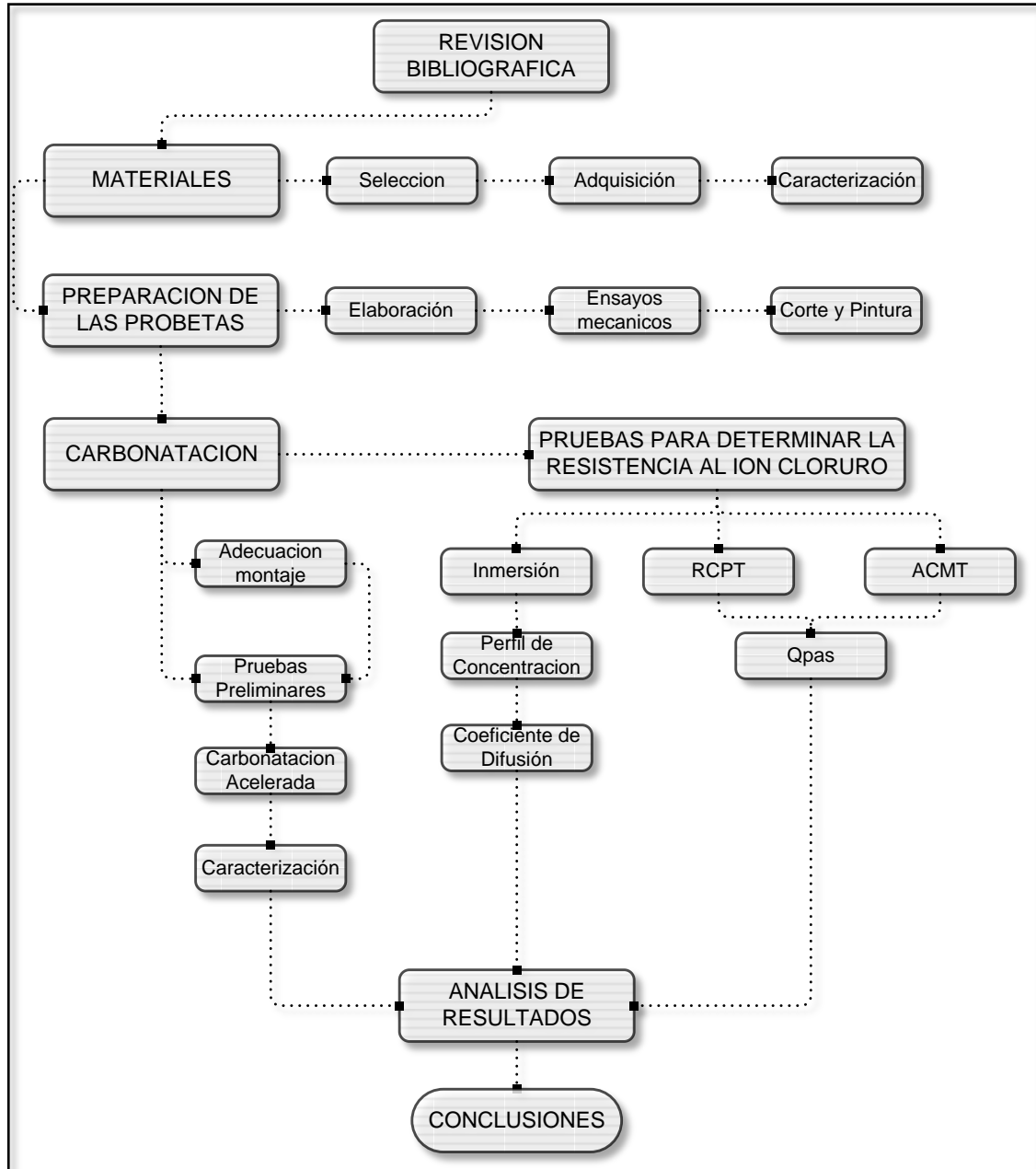
$$\ln c = \ln \frac{m}{\sqrt{\pi Dt}} - \frac{x^2}{4Dt} \quad \text{Ecuación 8}$$

Datos experimentales pueden ser aplicados en la ecuación anterior. La regresión lineal del $\ln C$ Vs. x^2 arroja una pendiente de $-1/(4Dt)$ y un intercepto con el eje de las ordenadas igual a $\ln(m/\sqrt{\pi Dt})$ de las cuales pueden ser obtenidos, el coeficiente de difusión D y la cantidad total de sustancia difusiva m .

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las etapas contempladas en la realización de la presente investigación son relacionadas en la Figura 5.

Figura 5: Desarrollo experimental



4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica se llevó a cabo en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, específicamente en sus recursos electrónicos, en la base de datos Elsevier, por ejemplo, la cual recopila información científica de revistas electrónicas. Adicionalmente, se consultaron artículos, normas ASTM, de las cuales se extrajo información valiosa para el avance de la presente investigación, en lo relacionado al desarrollo experimental de la misma.

De esta manera se determinaron algunos parámetros para la realización del proyecto, tales como los valores de relaciones de a/c, algunas condiciones para efectuar el proceso de carbonatación y las pruebas que permitían evaluar la difusión del ion cloruro, entre otros aspectos, y así convertir esta información en el punto de partida del presente trabajo.

4.2. MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales empleados para la fabricación de las probetas de concreto a las cuales se le realizaron los ensayos de inmersión, ACMT y RCPT, respectivamente, son los siguientes:

- Cemento Portland tipo I: este material fue adquirido en Cemex Colombia S.A, Planta Bucaramanga, bajo el nombre comercial de Cemento Diamante. Los análisis químicos y físicos fueron realizados y a su vez, suministrados por el fabricante y son relacionados en los anexos, donde se observa que dicho material cumple con los requisitos obligatorios por las normas NTC 121 y NTC 321.
- Agregados: como agregado fino, para la preparación de las probetas de concreto, se empleó arena de río, y como agregado grueso, se empleó grava.

Estos materiales fueron adquiridos en Prevesa, en el Km 5 Anillo vial, en el municipio de Girón.

La caracterización de los agregados se realizó en el Centro de caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander. Los análisis realizados a los materiales demostraron que éstos cumplen con todos los requisitos para la fabricación de concreto, estipulados en la norma ASTM C192 (Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory).

- Agua: el agua fue suministrada por el acueducto de Bucaramanga y sus respectivos análisis fueron realizados por esa misma entidad y son relacionados en el Anexo 2.

Para el desarrollo de las pruebas para determinar la resistencia del concreto al ion cloruro, se emplearon los siguientes reactivos:

- Cloruro de sodio
- Hidróxido de sodio
- Sal de mar
- Nitrato de plata
- Fenolftaleína
- Etanol
- Agua destilada
- Agua desionizada
- Acido nítrico
- Peróxido de hidrógeno

Los equipos empleados, con mayor frecuencia, en esta investigación, están relacionados en la Tabla 4:

Tabla 4: Equipos empleados

Nombre	Marca	Uso	Equipo
Balanza analítica	Mettler AE240	Medición de los pesos de reactivos y muestras.	
Bomba de vacío	No disponible	Preparación de las probetas para pruebas de migración de cloruros	
Conductímetro	Conductivity Meter Quick ; marca HACH Sension5	Medición de la conductividad de la solución salina de las pruebas de inmersión.	
Fuente Reguladora	Thermo EC570-90	Ensayos ACMT y RCPT. Se trabajó fijando un Voltaje y se tomaban los datos de corriente	
Medidor de Vacío	SUN, Engine Vacuum	Preparación de las probetas para pruebas de migración de cloruros	
pHmetro	pH 744 Meter	Verificar el pH de la solución de la prueba de inmersión.	

Fuente: Los autores

4.3. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

4.3.1. Diseño de la mezcla

Partiendo de la relación proporcionada por el fabricante del cemento, es decir, Cemex, se tiene que para fabricar un 1 m^3 de hormigón, relación a/c: 0.4, las proporciones a utilizar son las siguientes:

- Agua 210 kg
- Cemento 525 kg
- Arena 787 kg
- Grava 848 kg

Con base en esta relación se desarrollaron los cálculos de las proporciones a utilizar para la fabricación de las probetas, teniendo en cuenta los requerimientos dimensionales de las mismas relacionados a continuación.

- Dimensiones de las probetas fabricadas: Diámetro: 7,5 cm; longitud: 15 cm.
- Volumen de 1 probeta: $V_1 = 662,679 \text{ cm}^3 = 662,679 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
- Número de probetas fabricadas: $n = 35$ cilindros
- Volumen total de concreto: $V_T = V_1 * n = 0,023194 \text{ m}^3$

Las tablas que muestran cada uno de los pesos empleados en la elaboración de las probetas, de las tres relaciones a/c, se encuentran en el Anexo 3.

4.3.2. Distribución de las probetas

La Tabla 5 muestra la forma en la cual se distribuyeron las probetas para cada uno de los ensayos.

Tabla 5: Distribución de las probetas

	Prueba	Tipo de probetas	N° Probetas		
			0,4	0,5	0,6
Distribución de las Probetas	Compresión	Cilíndricas	3	3	3
	Carbonatación	Pruebas Preliminares	3	3	3
	RCPT	Probetas (Discos) No Carbonatados	1(2)	1(2)	1(2)
		Probetas (Discos) Carbonatados	2(4)	2(4)	2(4)
		Testigos de Carbonatación	1(2)	1(2)	1(2)
	ACMT	Probetas (Discos) No Carbonatados	1(2)	1(2)	1(2)
		Probetas (Discos) Carbonatados	2(4)	2(4)	2(4)
		Testigos de Carbonatación	1(2)	1(2)	1(2)
	Prueba de inmersión	Probetas No Carbonatadas	6	6	6
		Probetas Carbonatadas	12	12	12
		Testigos de Carbonatación	2	2	2
				34	34

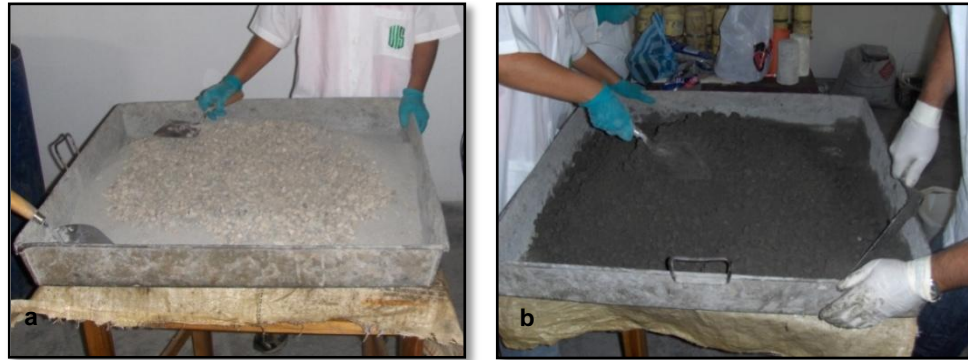
Fuente: Los autores

4.3.3. Fabricación de las probetas

Las probetas fueron fabricadas en el Centro de Caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en el Edificio Álvaro Beltrán Pinzón.

Inicialmente se pesaron cada uno de los materiales en la balanza analítica mostrada en Tabla 4, de acuerdo al diseño de la mezcla (Anexo 3); se depositaba la arena y el cemento, los cuales se mezclaban por un determinado tiempo hasta homogenizar; a continuación se agregaba la grava tal como se observa en la Figura 6a, seguida por el agua y se mezclaba vigorosamente, hasta obtener una pasta manejable y homogénea, como se aprecia en la Figura 6b.

Figura 6: Mezcla de los materiales para la elaboración de las probetas



Fuente: Los autores

Posteriormente, esta pasta se vertía en los moldes de PVC, como se observa en la Figura 7, siguiendo las recomendaciones de apisonado establecidas en la norma ASTM C192, para la preparación de probetas de concreto en el laboratorio.

Figura 7: Moldeo de las probetas



Fuente: Los autores

Se procedió a dejar 24 ± 1 horas de fraguado en los moldes a temperatura ambiente. A continuación se desmoldaban las probetas y se sumergían en agua fresca durante 28 días.

4.3.4. Ensayo de compresión

Posterior al tiempo de curado se realizaron pruebas de compresión a 3 probetas por cada una de las relaciones a/c, con el fin de comprobar que el concreto fabricado cumplía los requerimientos de Resistencia Mecánica, esto es, una resistencia superior a 5000 psi para la relación a/c: 0,4.

Estos ensayos se realizaron en la máquina de ensayos Trebel (Figura 8), propiedad del Centro de Caracterización de Materiales de Construcción de la UIS, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados ensayos de resistencia a la compresión

Relación a/c	R _{C1} (Kg/cm ²)	R _{C2} (Kg/cm ²)	R _{C3} (Kg/cm ²)	R _{Cp} (Kg/cm ²)	R _{Cp} (psi)
0,4	407,52	384,88	362,24	384,88	5461.76
0,5	282,98	294,32	294,32	290,54	4124.77
0,6	215,08	203,76	215,08	211,30	3001.13

Fuente: Los autores

Para estos ensayos, la preparación de las probetas de concreto consistía únicamente en depositar una sustancia a base de azufre, que permitiera obtener unas superficies planas y paralelas, y por lo tanto, lograr un contacto uniforme con las matrices de la máquina. La apariencia de las probetas a ensayar se muestra en la Figura 9a.

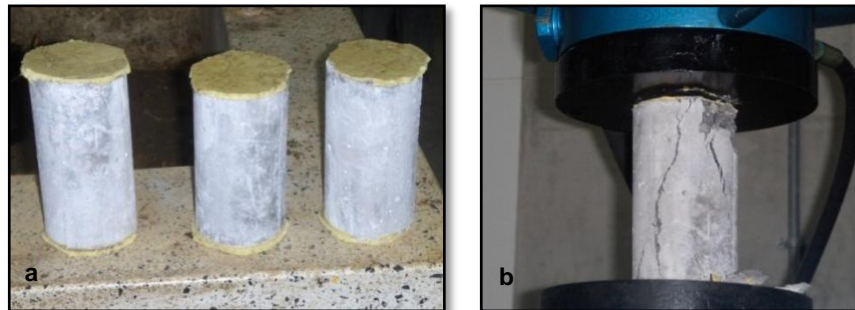
Las muestras fueron ensayadas de acuerdo con el "Método para ensayos de cilindros de concreto a la compresión" (designación C-39 de la ASTM) y los testigos de la prueba son mostrados en la Figura 9b.

Figura 8: Máquina de Ensayos de concretos, Marca Trebel



Fuente: Los autores

Figura 9: Probetas para los ensayos mecánicos



Fuente: Los autores

4.3.5. Corte de las probetas

Las probetas designadas para las pruebas ACMT y RCPT, fueron maquinadas, de acuerdo a los requerimientos dimensionales de cada uno de estos ensayos (30 mm de alto y 50 mm de alto respectivamente); con el fin de eliminar heterogeneidades propias del proceso de preparación, los discos fueron tomados de la parte central de los cilindros.

4.3.6. Recubrimiento de las probetas con pintura epóxica

Para los procedimientos de carbonatación acelerada y las pruebas posteriores, las probetas fueron recubiertas con pintura epóxica, del tipo epoxi-poliamida marca Pintuco; esto con el fin de asegurar un frente de carbonatación uniforme y una posterior difusión unidireccional del ion cloruro.

Las probetas fueron expuestas a dos capas de pintura, con un tiempo de 18 horas entre capas, y un posterior tiempo de curado de 7 días antes de la exponerlas al procedimiento de carbonatación acelerada.

4.4. CARBONATACIÓN

Para la realización de la carbonatación acelerada se adaptó la cámara de niebla salina, del Grupo de Investigaciones en Corrosión (GIC) de la Universidad Industrial de Santander. Por tanto se hizo necesario adicionar un flujo de CO₂, y el ingreso de agua en presencia de aire comprimido, con el fin de generar el ambiente húmedo que requiere la realización de este proceso. El montaje para este procedimiento se muestra en las Figuras 10 y 11.

Figura 10: Montaje para la Carbonatación Acelerada



Fuente: Los autores

Figura 11: Partes o componentes al interior de la cámara de Carbonatación



Fuente: Los autores

4.4.1 Pruebas preliminares

En esta etapa se determinaron los tiempos y los flujos adecuados, guiados por la información recopilada, teniendo en cuenta las necesidades del proyecto. Se realizaron 3 pruebas en las cuales se introdujeron en cada una, una probeta de cada relación agua cemento para tiempos de carbonatación de 3, 6, y 12 horas, con un 25% de CO₂ y una humedad relativa entre 55 y 60 %.

4.4.2 Carbonatación acelerada

Una vez determinadas las constantes de carbonatación, se procedió a determinar los tiempos para obtener dos frentes de carbonatación diferentes, los cuales, fueron definidos como 5 ± 1 mm (Frente A) y 10 ± 1 mm (Frente B). Teniendo en cuenta que generalmente, en concretos con dos años de exposición a condiciones ambientales, se obtiene una profundidad de carbonatación de 1 a 2 mm¹⁸.

¹⁸ CORNELIUS, Gerardus. Prediction of Deterioration of Concrete Bridges. DUP Science. Netherlands, 2004

Durante el tiempo de la prueba se procuró que las condiciones de operación se mantuvieran constantes, trabajando a una temperatura ambiente. Tales condiciones fueron:

- % de CO₂: 25 ± 1 %
- Humedad Relativa entre 55 – 60 %

4.4.3. Ensayo de Fenolftaleína

Con el fin de determinar el espesor de la capa carbonatada, se roció una solución 1 % de fenolftaleína en alcohol de 70°, sobre las probetas de concreto.

Las zonas con un pH inferior a 9 no cambiaron de color, y son atribuidas a las Áreas Carbonatadas o Frente de Carbonatación de las muestras, mientras que, las zonas con un pH superior a 9, tomaron un tono rosa intenso. Inmediatamente se midió el espesor del frente de carbonatación, con ayuda de un calibrador pie de rey con una precisión de 0,05 mm, antes de su reacción con el CO₂ de los alrededores. Este método se basó en la norma RILEM CPC-18¹⁹.

4.4.4. Difracción de Rayos X (DRX)

Mediante el DRX se buscó determinar los compuestos cristalinos presentes tanto en la fase carbonatada como en la no carbonatada. La preparación de las muestras para efectuar este procedimiento, consistió en obtener una muestra de la zona carbonatada y la zona no carbonatada (Figura 12), las cuales fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38 µm (400 mesh). El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un porta muestra de aluminio mediante la técnica de llenado lateral.

¹⁹ CARRASCO, María Fernanda, Evaluación de estructuras de hormigón. Universidad Tecnológica Nacional, 2007.

Figura 12: Extracción de muestras para DRX



Fuente: Los Autores

El análisis se realizó en un difractómetro de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX III B, propiedad del Laboratorio de Difracción de Rayos X, de la Universidad Industrial de Santander.

Las condiciones empleadas (Tabla 7) durante el análisis, fueron:

Tabla 7: Parámetros de operación DRX

Parámetros	Datos
Voltaje	40 (KV)
Corriente	30 (mA)
Rendijas (Slits) DS	1.0°
RS	0.3mm
SS	1.0°
Muestreo	0.02° 2theta
Rango de Medición	2-70° 2theta
Radiación	CuK α 1
Monocromador	Grafito
Tiempo de barrido	A pasos
Tiempo de muestreo	2 segundos

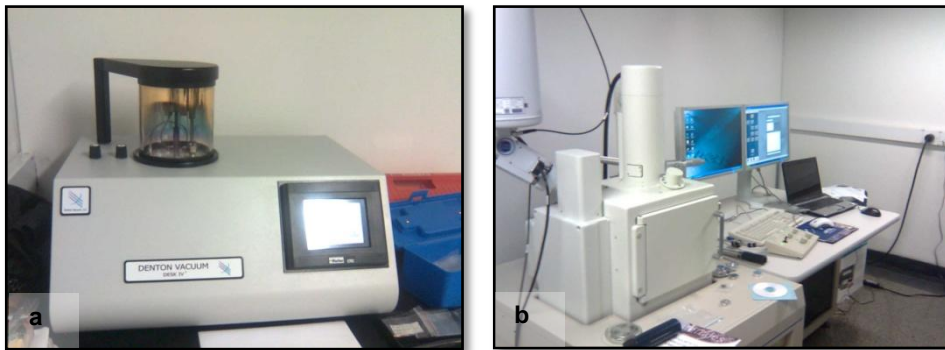
El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

El análisis cuantitativo de las fases encontradas se realizó mediante el refinamiento por el Método de Rietveld del perfil observado habiéndole agregado a la muestra una cantidad conocida de un estándar interno (*Aluminum oxide*, - 100mesh, 99%. *Corundum*, α -phase. Aldrich No. 23,474-5) correspondiente al 20%.

4.4.5. Microscopia de Barrido Electrónico (SEM)²⁰

La técnica de microscopia electrónica de barrido fue implementada con el propósito de evaluar la morfología de la fase carbonatada y de la no carbonatada, y por tanto observar el efecto de la reacción de la Portlandita con el dióxido de carbono en la estructura del concreto. El acondicionamiento de las muestras para SEM consistió, en primera instancia, en extraer una probeta de cada una de las fases, para posteriormente pulirlas con diferentes lijas (150, 400 y 600) y con varios abrasivos de alúmina (1, 0.3 y 0.05 micras), hasta obtener el acabado espejo en la superficie.

Figura 13: Equipo para Microscopia de Barrido Electrónico



Fuente: Los autores

A continuación, estas probetas se exponían a vacío en el equipo que se observa en la Figura 13a, se metalizaban con oro y finalmente se procedía a la observación en el equipo mostrado en la Figura 13b.

²⁰ GIRALDO M, Manuel Alejandro. EVOLUCIÓN MINERALÓGICA DEL CEMENTO PORTLAND DURANTE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2005

Este análisis fue realizado en el laboratorio de Ciencia de las Superficies, en la Sede de Investigación Universitaria de la Universidad de Antioquia.

4.5. ENSAYO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS POR INMERSIÓN

La prueba de inmersión se realizó en un estanque de geometría cuadrada de 2 x 2 m, éste fue llenado hasta un nivel de 20 cm, con una solución de sal marina al 3 % y fue mantenido a esta altura durante la prueba.

Se sumergieron cilindros de 75 mm de diámetro por 150 mm de alto, anteriormente recubiertos con pintura epóxica en su cuerpo y en una de sus caras.

El análisis de cloruros para la sal marina empleada, fue realizado en el GIMBA (Grupo en Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente) y se determinó que el porcentaje de cloruros en la muestra (sal de mar) era de 58.46 + -0.35 %.

Se sumergieron 18 probetas por cada relación agua cemento distribuidas como muestra la Tabla 8, de acuerdo a los días de inmersión:

Tabla 8: Distribución de las probetas para la prueba de inmersión

Relación a/c \ Tiempo [días]	0,4	0,5	0,6
30	6	6	6
45	6	6	6
60	6	6	6

Una vez las probetas completaron su tiempo de inmersión, fueron extraídas para posteriormente realizar las pruebas de colorimetría y tomar las respectivas muestras para determinar el perfil de concentración de cloruros.

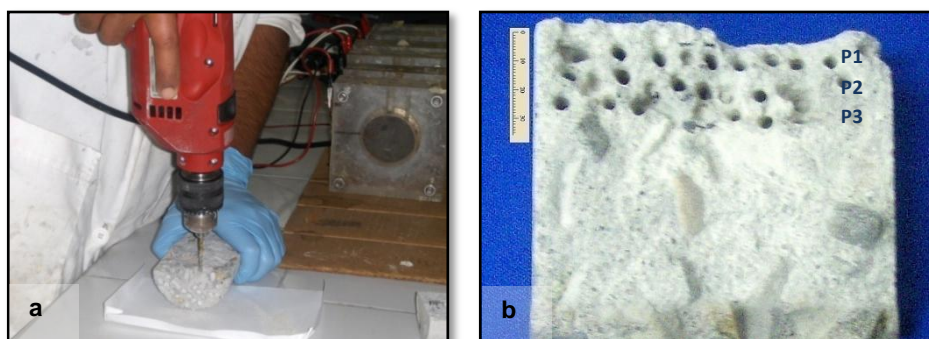
4.5.1. Extracción de la muestra

El método de extracción de muestras para determinar cloruros libres en el concreto, está descrito en la norma ASTM C1218 (Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete).

Al extraer las probetas, fueron partidas longitudinalmente, con el fin de realizar la extracción de las muestras en una de estas mitades. Dichas muestras fueron obtenidas con un taladro de percusión marca PERLES de 600 W perforando respectivamente a 3, 4 y 5 profundidades (Ver Figura 14a), para las probetas de 30, 45 y 60 días de inmersión, de acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas de colorimetría, los cuales daban un indicio acerca de la profundidad alcanzada por el ion cloruro.

La extracción se realizó en intervalos entre 0 – 10 mm (P1), 10 – 20 mm (P2), 20 – 30 mm (P3), 30 – 40 mm (P4) y 40 – 50 mm (P5) como se observa en la Figura 14b, para una probeta de 30 días de inmersión; hasta obtener una muestra de $5 \pm 0,25$ g. A continuación, esta muestra de concreto fue pasada por tamiz # 20, pesada y empacada en bolsa de cierre hermético, para su posterior análisis.

Figura 14: Extracción de las muestras



Fuente: Los autores

4.5.2. Titulación potenciométrica

Mediante este procedimiento se obtuvo el contenido de cloruros libres (solubles en agua) en determinada muestra de concreto, y de esta manera se pudo construir el perfil de concentración del ion cloruro a través de la matriz cementicia. Este procedimiento está descrito en las Normas ASTM C1218 y ASTM C114.

Para este análisis, la muestra pulverizada se sometió a una digestión por medio de una dilución en 50 ml de agua destilada, seguida de una ebullición durante 5 min. Posteriormente se dejó reposar durante 24 h, se filtró y se aciduló el filtrado con una solución de ácido nítrico (1:1). A continuación, se agregó una solución de peróxido de hidrógeno al 30 %, se llevó a ebullición durante unos segundos y se filtró nuevamente, esta vez, a través de un papel de filtro grueso. Seguidamente, se adicionaron 2 ml de cloruro de sodio. Se llevó la solución a un agitador magnético, se introdujeron los electrodos y se agitó suavemente; consecutivamente se agregó periódicamente una solución patrón de Nitrato de Plata, registrando los valores de potencial y el volumen empleado de dicha solución, hasta llegar al punto de equivalencia²¹.

Los equipos empleados para la titulación potenciométrica fueron: Titulador automático Metrohm 751 GPD Titrino con electrodo selectivo de anillo de plata y pH-metro Metrohm 691.

Este análisis fue realizado en el Grupo en Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente, de la Universidad Industrial de Santander.

²¹ Lizarazo, Juan Manuel. Ensayos típicos en la determinación de la durabilidad del concreto. Universidad Nacional de Colombia

4.6. RCPT: ENSAYO RÁPIDO DE PENETRACIÓN DEL ION CLORURO²²

Este ensayo fue relacionado por Whiting (1981) y tiene por objeto estudiar los mecanismos de transporte de los iones cloruros dentro del hormigón.

Mediante este método descrito en la norma ASTM C1202, se determinó la penetrabilidad del ion cloruro de las probetas de concreto de 50 mm de espesor y 75 mm de diámetro, por medio de la carga pasante a través de las mismas. Se evaluó el comportamiento de concretos con 3 relaciones a/c y a su vez con dos frentes de carbonatación. El tiempo de la prueba fueron 6 horas.

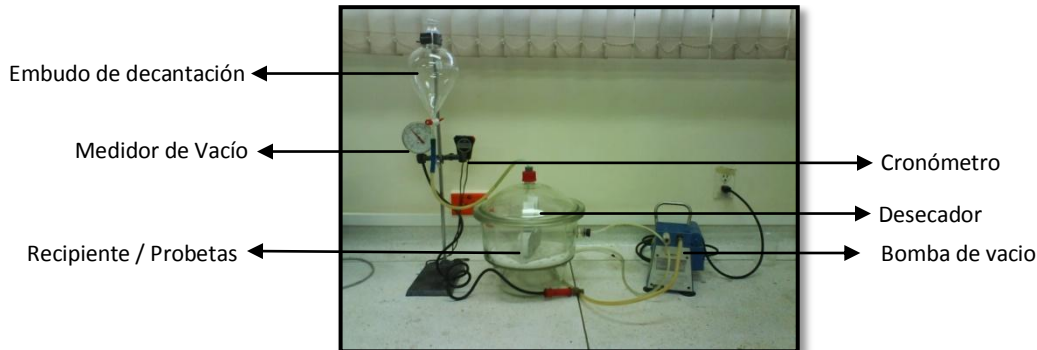
Debido a que se aplica un potencial de 60 V, se genera un flujo del ion cloruro a través de la matriz cementicia; por tanto los cloruros migran hacia la celda anódica (Reservorio de NaOH).

La preparación de las probetas para este ensayo, consistió en realizar previamente un procedimiento de vacío, donde la presión debía disminuir a menos de 50 mmHg, en un desecador, que a su vez contenía un recipiente con la probeta, evitando el contacto de las caras de la probeta con las paredes del recipiente; el montaje para dicha preparación es mostrado en la Figura 15.

Bajo este ambiente las probetas permanecían 3 horas; al completar este tiempo, con la bomba de vacío encendida, se agregaba por el embudo de decantación agua desaireada hasta cubrir completamente las probetas, y se dejaban durante 1 hora; después se apagaba la bomba y se dejaba durante 18 ± 2 horas más en el montaje.

²² AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration ASTM C1202 – 97. Philadelphia, USA, 1997.

Figura 15: Montaje para el acondicionamiento de las probetas

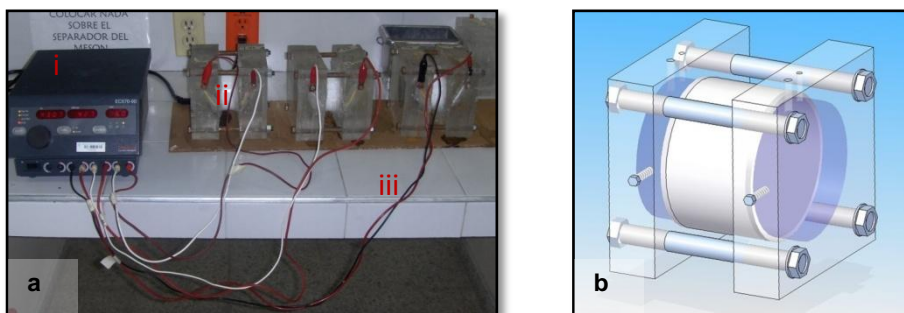


Fuente: Los autores

El montaje requerido para el ensayo RCPT se puede observar en la Figura 16a y estaba conformado por:

- i. Fuente reguladora: esta fuente permitía fijar un voltaje constante de 60 V y así medir la corriente pasante, permitía el desarrollo de cuatro ensayos simultáneos.
- ii. Celdas de difusión: estas celdas fueron construidas en acrílico. Constan de dos reservorios, uno con una solución NaOH al 0,3 N (Celda anódica) y el otro con una solución NaCl al 3 % p/v (Celda catódica). Además contaba con dos rejillas de acero inoxidable 304 que actúan como electrodos, (Ver Figura 16b).
- iii. Cables conectores # 14: unen cada uno de los reservorios a la fuente reguladora.

Figura 16: Esquema del montaje y de la celda para RCPT



Fuente: Los autores

4.7. ACMT: ENSAYO DE MIGRACIÓN ACELERADA DE CLORUROS²³.

Este ensayo es una modificación del método descrito en la norma ASTM C1202. Fue desarrollado con el fin de obtener la carga pasante y los iones cloruros acumulados pasantes a través de la probeta de concreto.

Dentro de las variaciones más significativas se encuentran el espesor de las probetas (30 mm) y el voltaje (24 V); estas modificaciones fueron propuestas por Yang (2003) con el fin de disminuir el efecto Joule.

El tiempo de prueba recomendado para ACMT (9 horas) fue de 3/2 el tiempo de prueba empleado en el RCPT (6 horas), teniendo en cuenta dos aspectos: El voltaje aplicado en ACMT es 24/60 veces el voltaje del RCPT, y el espesor de las probetas fue 30/50 veces el espesor del disco ensayado en la prueba de RCPT

Aspectos como el acondicionamiento y la preparación de las probetas se realizaron al igual que en el RCPT; el montaje para esta prueba se observa en la Figura 17.

Figura 17: Montaje para ACMT



Fuente: Los autores

²³ YANG, CC. An electrochemical method for accelerated chloride migration test of diffusion coefficient in cement-based materials. Material, Chemistry and physics. Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan, 2003

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. CARBONATACIÓN

5.1.1. Determinación de los coeficientes de carbonatación

Dentro de las pruebas preliminares se realizó la carbonatación a 3, 6 y 12 horas, respectivamente, después de la cual se realizó el ensayo de fenolftaleína y fueron medidas las profundidades de carbonatación que se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9: Profundidades de Frente de Carbonatación [mm]

Relación a/c Tiempo (h)	0,4	0,5	0,6
3	2	2,3	3,1
6	3	3,4	4,3
9	3,5	4,1	5,2

* Promedio de 4 puntos.

Fuente: Los autores

De acuerdo a la ecuación,

$$X_c = K_c * \sqrt{t}$$

Se calcularon los coeficientes de carbonatación para cada uno de los tiempos obteniendo los siguientes resultados:

- Para 0,4 a/c

$$K_{C(3h)} = 5,6569 \text{ mm/día}^{1/2}$$

$$K_{C(6h)} = 6,0000 \text{ mm/día}^{1/2}$$

$$K_{C(9h)} = 5,7154 \text{ mm/día}^{1/2}$$

$$K_{C_{prom}} = 5,7908 \text{ mm/día}^{1/2}$$

- Para 0,5 a/c

$$K_{C(3h)}=6,5053 \text{ mm/ día}^{1/2}$$

$$K_{C(6h)}=6,8000 \text{ mm/ día}^{1/2}$$

$$K_{C(9h)}=6,6953 \text{ mm/ día}^{1/2}$$

$$K_{C_{prom}}=6,6669 \text{ mm/ día}^{1/2}$$

- Para 0,6 a/c

$$K_{C(3h)}=8,7681 \text{ mm/ día}^{1/2}$$

$$K_{C(6h)}=8,6000 \text{ mm/ día}^{1/2}$$

$$K_{C(9h)}=8,8182 \text{ mm/ día}^{1/2}$$

$$K_{C_{prom}}=8,7287 \text{ mm/ día}^{1/2}$$

De acuerdo a los coeficientes obtenidos y teniendo en cuenta las profundidades de los frentes utilizados en la investigación, Frente A (5 ± 1 mm), y Frente B (10 ± 1 mm), se determinaron los siguientes tiempos de carbonatación para cada una de las relaciones a/c, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas preliminares; tales tiempos están relacionados en la Tabla 10:

Tabla 10: Tiempos de Carbonatación [horas]

RELACIÓN a/c	FRENTE A	FRENTE B
0,4	18	69
0,5	14	54
0,6	8	32

Fuente: Los autores

Como se puede ver en los resultados, a medida que aumenta la relación a/c aumenta el coeficiente de Carbonatación, es decir, disminuye la resistencia del concreto a la difusión del CO₂ a través de la matriz cementicia. Así mismo, se observó que los tiempos de ensayo disminuyen al incrementar la relación a/c.

5.1.2. Determinación de la profundidad del frente de carbonatación

Tabla 11: Profundidades del Frente de Carbonatación, [cm]

RELACIÓN a/c	0,4		0,5		0,6	
Perfil	A	B	A	B	A	B
Profundidad	0,53	1,03	0,56	1,00	0,64	1,02
D.E.	± 0,03	± 0,01	± 0,02	± 0,02	± 0,07	± 0,04

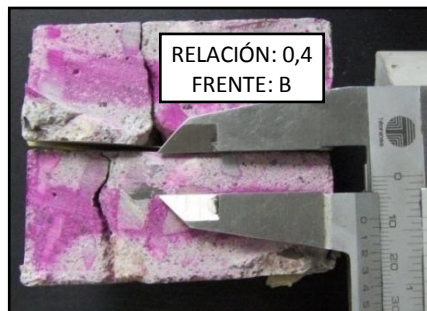
5.1.2.1. Profundidades del frente de carbonatación para relación a/c = 0.4

Tabla 12: Profundidad del Frente de carbonatación para las probetas de a/c=0,4 [cm]

PERFIL	A		B	
Probeta	Cilindro*	Disco*	Cilindro	Disco
T1	0,5	0,7	1	1,1
T2	0,5	0,5	1,1	1
T3	0,6	0,5	0,9	1,2
T4	0,5	0,7	1,2	1
T5	0,5	0,5	1	0,9
T6	0,4	0,4	0,9	1
T7	0,6	0,6	1,1	0,9
T8	0,5	0,5	1	1,2
Pre-Promedio	0,51	0,55	1,03	1,04
Prom ± DE	0,53 ± 0,03		1,03 ± 0,01	

Siendo: Cilindro, las probetas para el ensayo de inmersión y Disco, las probetas empleadas en las pruebas ACMT y RCPT

Figura 18: Profundidad del Frente Carbonatado, Probetas ACMT 0,4 B



Fuente: Los autores

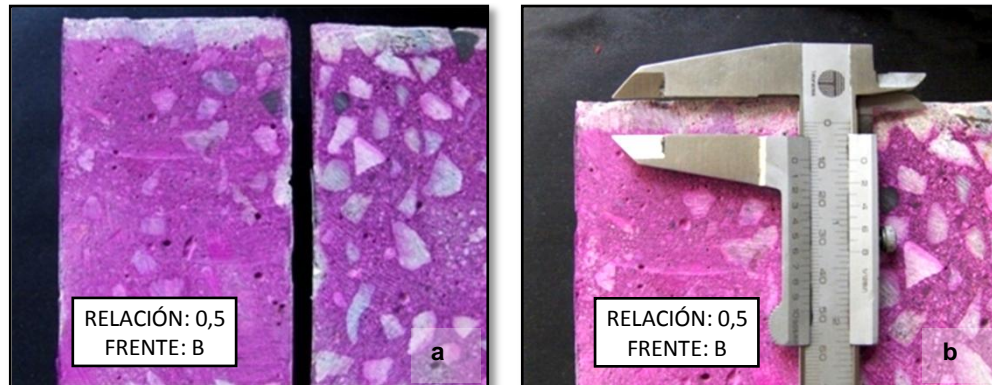
5.1.2.2. Profundidades del frente de carbonatación para relación a/c = 0.5

Tabla 13: Profundidad del Frente de carbonatación para las probetas de a/c = 0,5 [cm]

PERFIL	A		B	
	Cilindro	Disco	Cilindro	Disco
T1	0,55	0,6	1,1	0,9
T2	0,6	0,7	0,9	1
T3	0,5	0,5	1,1	1,2
T4	0,7	0,5	1	1,1
T5	0,6	0,7	0,9	1
T6	0,5	0,5	1	0,9
T7	0,45	0,6	1,1	0,8
T8	0,5	0,5	1	1
Pre-Promedio	0,55	0,56	1,01	0,98
Prom ± DE	0,56 ± 0,02		1 ± 0,02	

Siendo: Cilindro, las probetas para el ensayo de inmersión y Disco, las probetas empleadas en las pruebas ACMT y RCPT

Figura 19: Frente de Carbonatación, relación a/c: 0,5



Fuente: Los autores

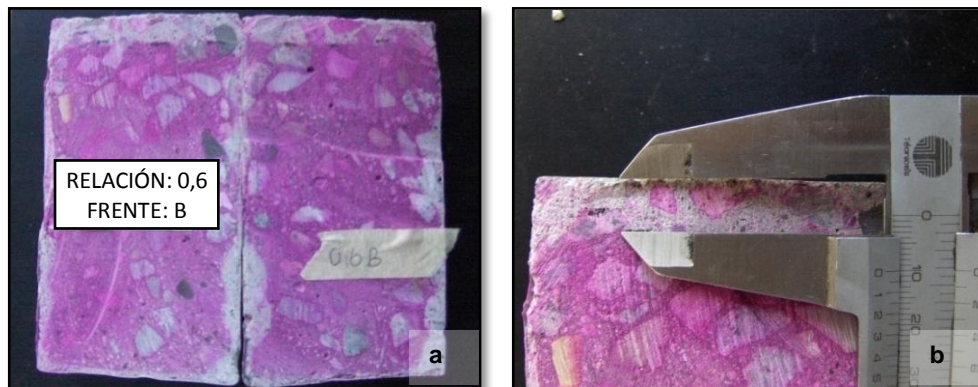
5.1.2.3. Profundidades del frente de carbonatación para relación a/c = 0.6

Tabla 14: Profundidad del Frente de carbonatación para las probetas de a/c = 0,6 [cm]

PERFIL	A		B	
	Cilindro	Disco	Cilindro	Disco
T1	0,6	0,7	1,1	0,8
T2	0,5	0,8	1,15	1
T3	0,8	0,6	1,2	1,1
T4	0,7	0,8	0,8	1,1
T5	0,7	0,5	1,1	0,9
T6	0,6	0,4	0,9	1
T7	0,4	0,8	1,1	0,8
T8	0,4	0,9	1	1,2
Pre-Promedio	0,59	0,69	1,04	0,99
Prom ± DE	0,64 ± 0,07		1,02 ± 0,04	

Siendo: Cilindro, las probetas para el ensayo de inmersión y Disco, las probetas empleadas en las pruebas ACMT y RCPT

Figura 20: Profundidad Frente Carbonatado, Probetas del Ensayo de inmersión, 0,6 B



Fuente: Los autores

Las mediciones del frente de carbonatación de los cilindros fueron tomadas como se observa en las Figuras 18 a la 20; tomando 8 puntos de medición en cada probeta testigo; tales mediciones son reportadas en las Tablas 12, 13 y 14.

Con base en estos valores, se obtuvo un promedio de las mediciones tomadas en cada cilindro, para posteriormente calcular el promedio de estas dos mediciones, tanto la del cilindro como la del disco, y así reportar un valor de profundidad de carbonatación para cada relación a/c, con su respectiva desviación estándar.

En la Tabla 11, se observan los valores de las profundidades de carbonatación de las probetas para cada una de las 3 relaciones a/c de los dos frentes obtenidos bajo un 25 % de CO₂, en la cámara de carbonatación.

Con los tiempos de exposición determinados en las pruebas preliminares, se lograron obtener los dos frentes de carbonatación requeridos para la investigación, Frente A y Frente B, tanto en los cilindros como en los discos de concreto, con el fin de determinar la influencia de la carbonatación en la difusión del ion cloruro mediante las diversas pruebas propuestas.

Estos tiempos de exposición fueron menores para la mezcla de mayor relación a/c (a/c=0.6); En las Figuras 18 a la 20, se puede apreciar la profundidad de carbonatación de los cilindros, después de realizar el ensayo de fenolftaleína al 1 % donde se observa un avance bastante uniforme del frente carbonatado a través de la matriz cementicia.

Se observa la presencia de zonas carbonatadas en el cuerpo de los cilindros, especialmente con relación a/c= 0.6, debido a la presencia de algunas porosidades, las cuales presentaron dificultad para ser cubiertas completamente con la pintura epóxica, y de esta manera, aislarlas del ambiente de la cámara de carbonatación; adicionalmente, influyó la mayor facilidad o tendencia de esta relación a/c al avance del frente carbonatado.

5.1.3. Caracterización cualitativa frente carbonatado

5.1.3.1. Análisis SEM y DRX muestra no carbonatada

En la Figura 21, se muestran las observaciones por microscopía electrónica de barrido, del frente no carbonatado; se observa la presencia de Portlandita, la cual es producto de las reacciones de hidratación del concreto, específicamente de los silicatos cálcicos.

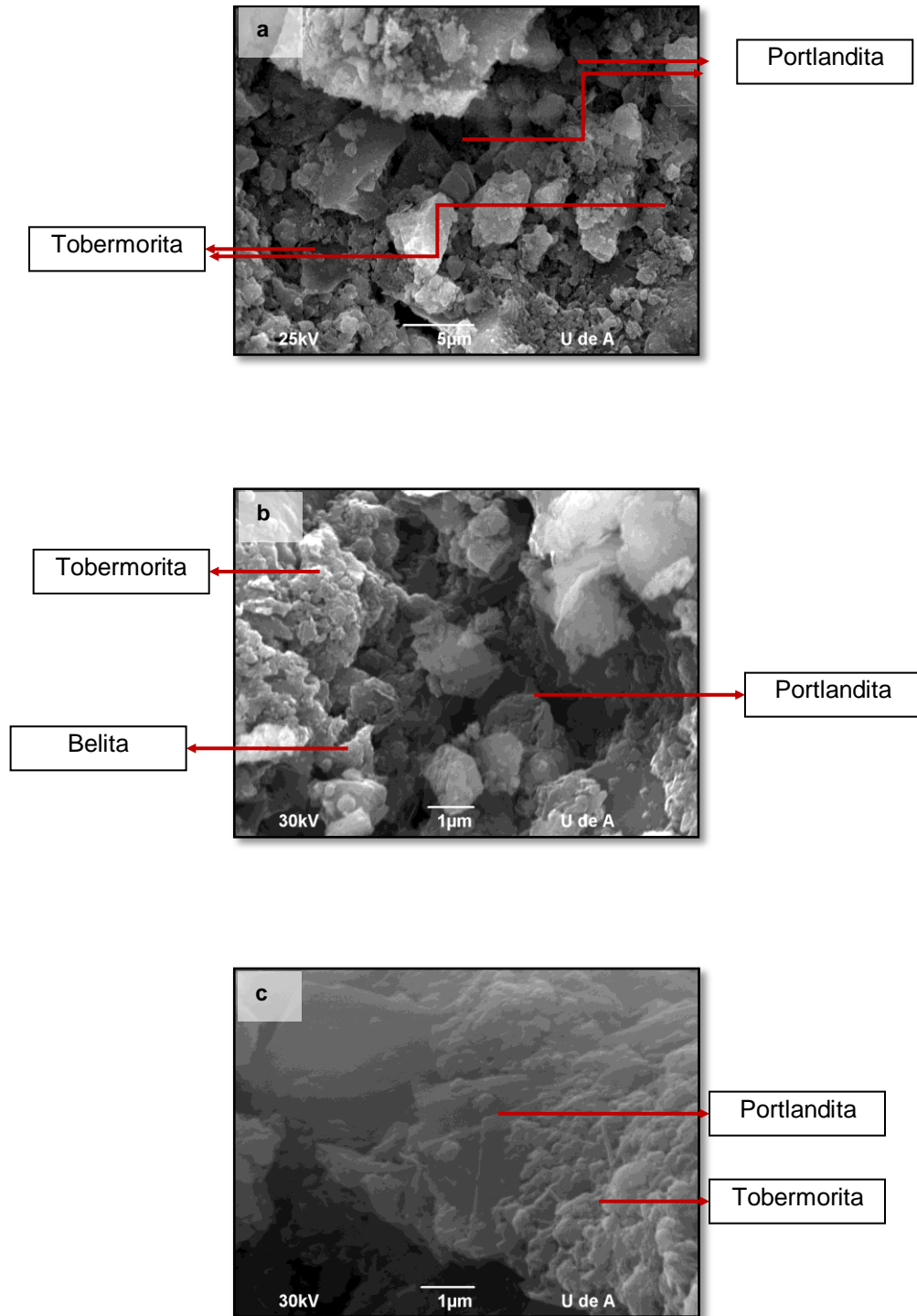
De acuerdo a la Figura 21a, se puede observar que la Portlandita, no es característica de la hidratación de la alita, ya que a esta edad de curado las Portlanditas provenientes de ésta, tienen una forma hexagonal muy bien definida. En cambio, se puede inferir, de acuerdo a la morfología observada, que proviene de la hidratación un poco más lenta de la Belita (Figura 21c).²⁴

Se observa, tanto en la Figura 21a, como en la Figura 21b, regiones de baja cristalinidad, características de la fase de Tobermorita, la cual presenta una morfología botroidal o en racimos, debido a que durante el proceso de hidratación, las partículas hidratadas se adhieren mediante fuerzas de Van der Waals.

En la Figura 21b, se observa la presencia de Belita, la cual fue identificada teniendo en cuenta su morfología esférica característica; esto revela la baja velocidad de hidratación de la Belita, pues aún en un concreto con 28 días de curado, no se ha hidratado en su totalidad, a diferencia de la alita, la cual no es observada en ninguna de las figuras.

²⁴ GIRALDO, Manuel Alejandro; TOBON, Jorge Iván. Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2005.

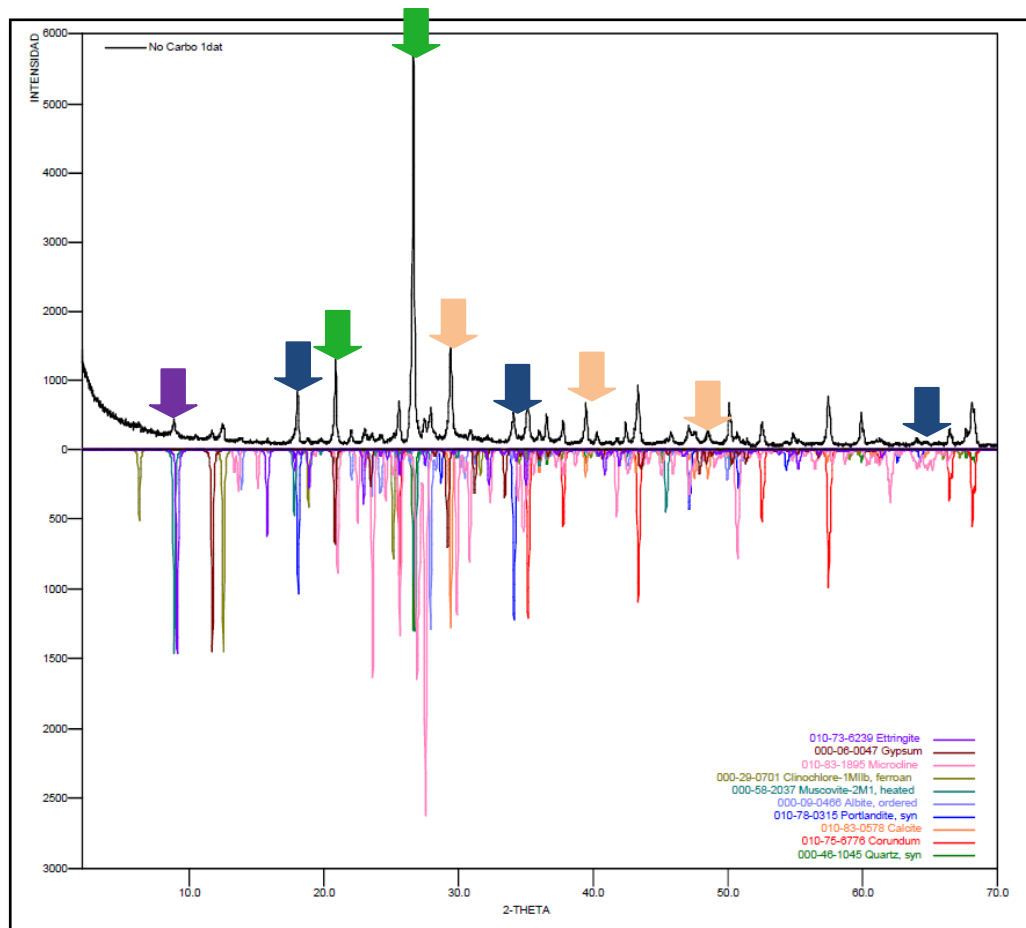
Figura 21: Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra no carbonatada



En la Figura 22, se puede observar el difractograma obtenido para la muestra no carbonatada, en el cual se evidencia la presencia de Portlandita y Etringita producto de las reacciones de hidratación del cemento, además se observan compuestos como el Cuarzo, la Albita, Microclina entre otros, asociados a los áridos que se utilizan en el proceso de preparación del concreto.

Es posible observar una pequeña cantidad de Calcita, que aunque no se haya podido detectar mediante el ensayo de fenolftaleína, producto de su ingreso como impureza, o de la carbonatación incipiente de la cal libre presente en el cemento, en cantidades lo suficientemente bajas como para no disminuir el pH del concreto a valores cercanos a los de despasivación.

Figura 22: Difractograma de la muestra no carbonatada

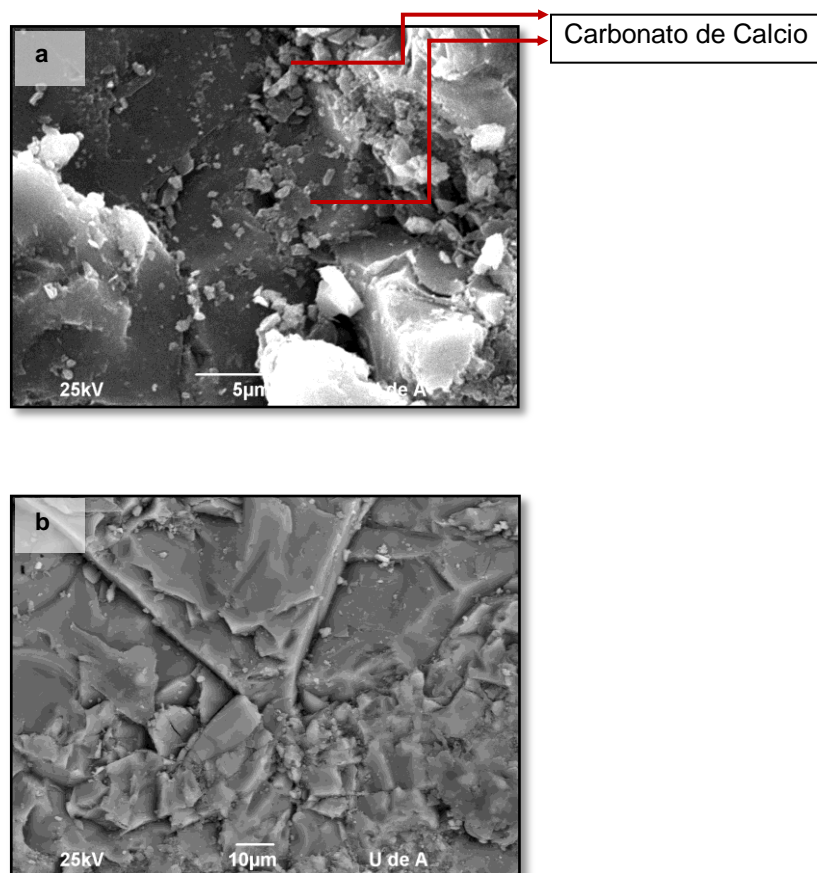


5.1.3.2. Análisis SEM y DRX muestra carbonatada

En las observaciones por microscopía electrónica de barrido para la muestra carbonatada (Figura 23), como una de las características más importantes se puede observar una densificación de la estructura (Figura 23b), producto de las reacciones del CO_2 , no solo con la Portlandita sino con los demás compuestos alcalinos presentes en la matriz cementicia.

Se puede observar además en la Figura 23a, la presencia de cristales de Calcita producto de la carbonatación de la muestra.

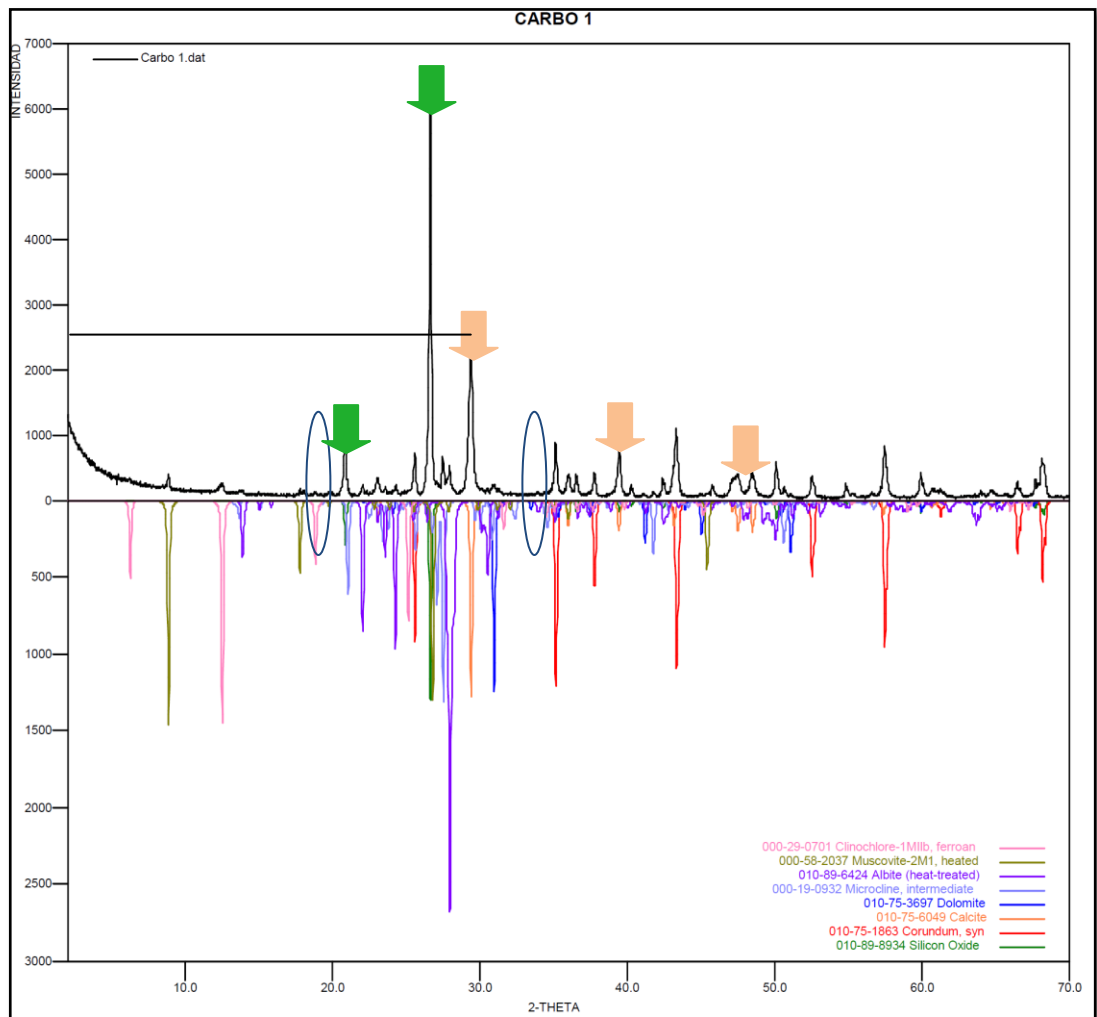
Figura 23: Observaciones por Microscopía Electrónica de Barrido, de la muestra carbonatada.



En la Figura 24, se puede observar el patrón de difracción para la muestra no carbonatada, se distingue como una de las características más relevantes la ausencia del pico de la Portlandita y el aumento en el pico de la Calcita estos dos acontecimientos son producto del proceso de carbonatación.

Al igual que en la muestra no carbonatada, se observan el Cuarzo y los demás elementos provenientes de los agregados finos utilizados en el proceso de preparación. Los porcentajes de cada uno de los compuestos presentes en la muestra se encuentran en el anexo 8.

Figura 24: Difractograma muestra Carbonatada



5.2. ENSAYO DE PENETRACIÓN DE CLORUROS POR INMERSIÓN

5.2.1. Determinación de la profundidad de penetración del ion cloruro

Tabla 15: Profundidad de ingreso del ión cloruro [mm]*

Relación a/c	Frente	30 días	45 días	60 días
0,4	Blanco	15 ± 1,41	20,07 ± 1,52	22,02 ± 1,24
	A	10,55 ± 0,64	14,05 ± 0,78	16 ± 0,71
	B	8,02 ± 0,25	12 ± 2,55	16,05 ± 0,92
0,5	Blanco	23,05 ± 0,21	25,98 ± 1,03	30,1 ± 1,70
	A	21,05 ± 0,50	24,45 ± 2,12	26,1 ± 0,28
	B	18,05 ± 0,71	20,02 ± 0,32	23,05 ± 1,13
0,6	Blanco	29,9 ± 0,71	39,2 ± 0,99	53,3 ± 0,71
	A	25,45 ± 0,78	28,95 ± 1,49	33,05 ± 0,64
	B	23 ± 0,57	25,45 ± 2,19	30,45 ± 2,19

* Promedio de dos datos

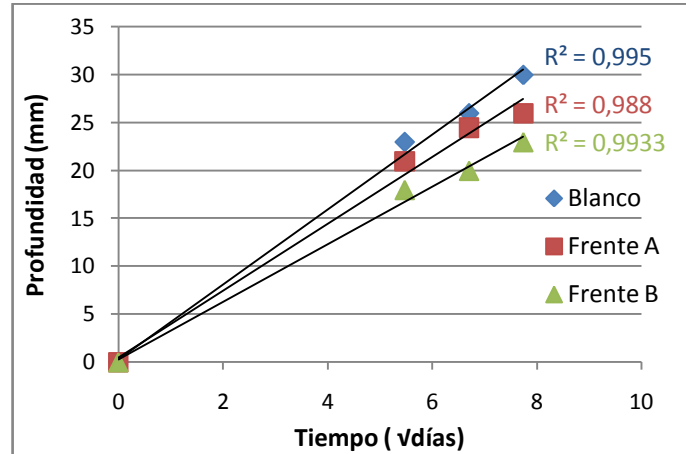
Fuente: Los Autores

En la Tabla 15, se observan las profundidades de penetración tomadas con un calibrador pie de rey de 0,01 mm de precisión. A medida que disminuye la relación a/c y aumenta la profundidad del frente carbonatado, se observa una disminución en la entrada del ion cloruro; además se puede apreciar, que la diferencia en cuanto a la penetración, para cada una de las relaciones a/c, es mucho más marcada en las probetas con la mayor relación; en este caso las probetas con 0,6 presenta una diferencia de 23 mm entre el cilindro blanco y el cilindro cuyo frente de carbonatación es B, para 60 días de inmersión.

En la Figura 25 se observan las líneas de tendencia correspondientes a los puntos experimentales, las cuales dan una tendencia definida, en cuanto a la capacidad de penetración del ion cloruro, a través de la estructura cementicia expuesta o no al proceso de carbonatación para la relación a/c: 0,5; las graficas correspondientes

a las relaciones a/c de 0,4 y 0,6, presenta la misma tendencia, para su revisión vea anexo 5.

Figura 25: Profundidad de penetración del ión cloruro Vs. Tiempo, relación a/c: 0,5



Fuente: Los autores

Para un mejor análisis se determinó “*el coeficiente de penetración, el cual está determinado como el coeficiente angular, de las ecuaciones de las regresiones lineales*”.²⁵

Los coeficientes de penetración de acuerdo a las ecuaciones obtenidas de las regresiones lineales se muestran en la Tabla 16 con su respectivo coeficiente de determinación R^2 .

²⁵ CARVALHO SIQUEIRA, Henrique. Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento portland branco e escória de alto forno, ativados químicamente. Universidad Federal de Santa Maria, RS, Brasil, 2008

Tabla 16: Coeficientes de penetración

Relación a/c	Frente	Coeficiente de penetración K [mm/ $\sqrt{\text{días}}$]	Coeficiente de determinación R ²
0,4	Blanco	2,50	0,99
	A	2,06	0,99
	B	1,85	0,97
0,5	Blanco	3,99	0,99
	A	3,33	0,98
	B	2,69	0,99
0,6	Blanco	6,40	0,97
	A	4,31	0,99
	B	3,87	0,99

Fuente: Los Autores


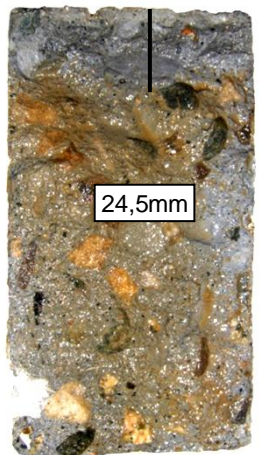


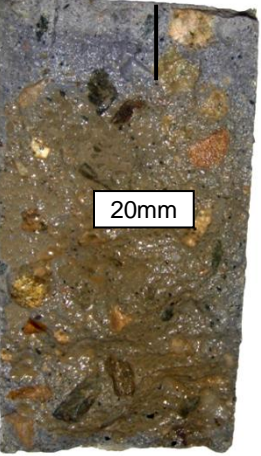




Un factor importante que se puede resaltar de esta investigación, al comparar las muestras blanco con las muestras expuestas a un proceso de carbonatación acelerada, para igual relación a/c, es que los índices de penetración I_p (ver Tabla 17), son menores en cuanto mayor es la profundidad del frente carbonatado, lo cual demuestra una eficiencia mayor en el bloqueo del paso de iones a medida que se aumenta ésta. Esto también se corroboró mediante el ensayo de colorimetría, cuyos resultados, para a/c: 0,5 se relacionan en la Tabla 18.

Tabla 17: Índices de penetración

Relación a/c	Frente	Índice de penetración $K_{\text{Frente}} / K_{\text{Blanco}}$ [%]
0,4	Blanco	100
	A	82,4
	B	74
0,5	Blanco	100
	A	83
	B	67,4
0,6	Blanco	100
	A	67,3
	B	60

Fuente: Los Autores

Tabla 18: Fotografías prueba de colorimetría relación a/c: 0,5

	30 Días	45 Días	60 Días
0,5 A			
0,5 B			
0,5 W			

Fuente: Los autores

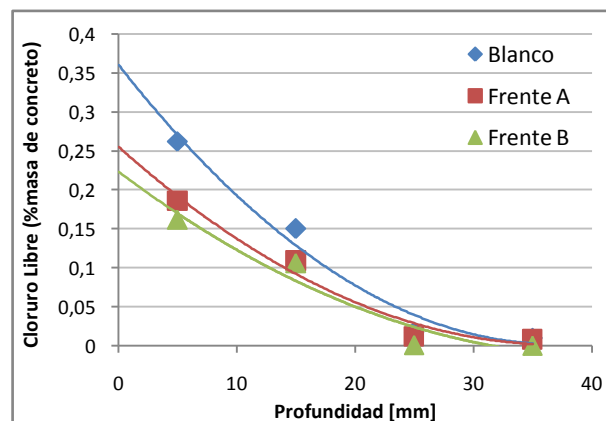
5.2.2. Determinación del perfil de cloruros y del coeficiente de difusión.

En la Figura 26 se observa el perfil de concentración de cloruros, para la relación a/c: 0.4, con 30 días de inmersión, se puede apreciar la diferencia en los valores, teniendo mayores concentraciones para la probeta blanco, y una disminución gradual a medida que aumenta el frente carbonatado.

En la Figura 27, se puede observar la misma tendencia que en la gráfica correspondiente a los 30 días (Figura 26), es decir la disminución de la concentración de cloruros al aumentar la profundidad, característica común para estos perfiles de concentración²⁶.

Para los 60 días de inmersión (Figura 28), se observa una diferencia mucho más marcada entre la probeta blanco y las probetas carbonatadas, sin embargo, la diferencia en cuanto a las concentraciones obtenidas para el Frente A y el Frente B es prácticamente cero.

Figura 26: Perfil de cloruros 30 días, relación a/c: 0,4



Fuente: Los autores

²⁶ CHÁVEZ MACHADO, Jesús Ángel and BUENDÍA RÍOS, Hildebrando. Perfiles de penetración de cloruro en Estado Iónico en concretos del Rango A/C 045 a 0965. Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr, Jul 2003, vol.6, no.12, p.36-43

Figura 27: Perfil de cloruros 45 días

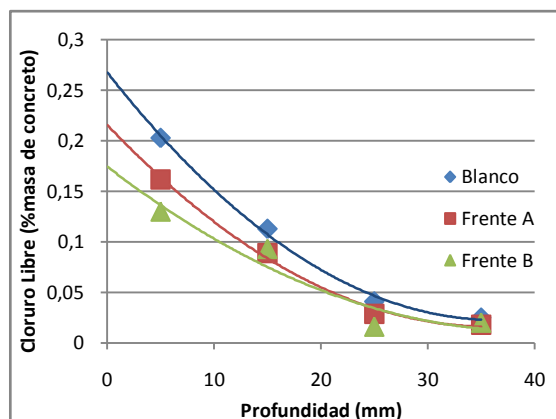
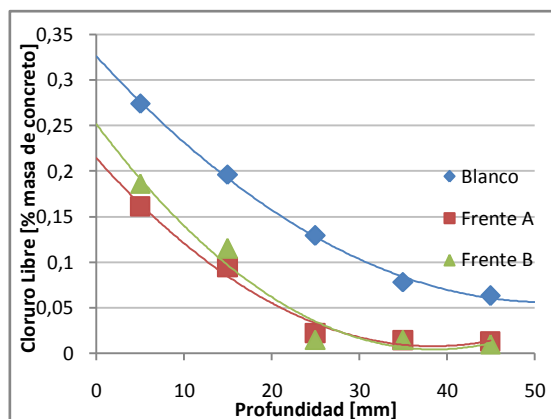


Figura 28: Perfil de cloruros, 60 días



Fuente: Los autores

En la Tabla 19 y la Figura 29, se pueden observar los coeficientes de difusión obtenidos de acuerdo a la solución ya mencionada de la segunda ley de Fick, mediante las ecuaciones de regresión y de la Linealización de los perfiles de concentración de cloruros (Anexo 7); además se observan los P-valor (o valores de probabilidad) obtenidos del análisis de varianza de cada una de las regresiones lineales, en donde se pudo determinar que de acuerdo a estos valores, existe una relación estadísticamente significativa, entre los mismos.

Tabla 19: Coeficientes de Difusión

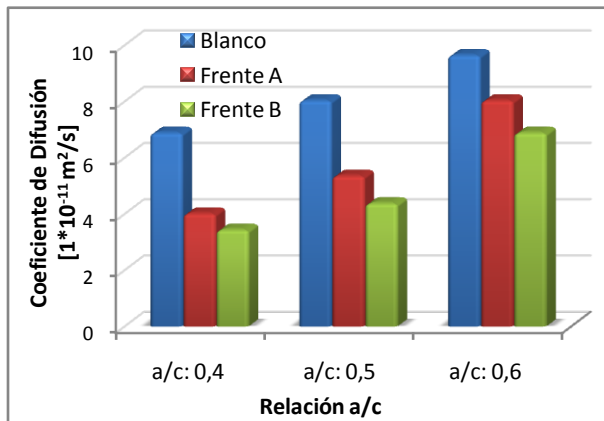
Relación a/c	Frente	D [1 x 10 ⁻¹¹ m ² s ⁻¹]	P- valor*	GL*
0,4	Blanco	6,89	0,0097	1
	A	4,02	0,0535	1
	B	3,44	0,0659	1
0,5	Blanco	8,04	0,0112	1
	A	5,36	0,0033	1
	B	4,38	0,0004	1
0,6	Blanco	9,65	0,0007	1
	A	8,04	0,0082	1
	B	6,89	0,0097	1

*Siendo P-valor: el valor de probabilidad y GL: los grados de libertad

La diferencia de los coeficientes de difusión obtenidos, con respecto a las relaciones a/c, es atribuida al aumento en la red de poros a medida que aumenta ésta, lo cual disminuye la resistencia a la penetración de agentes agresivos.

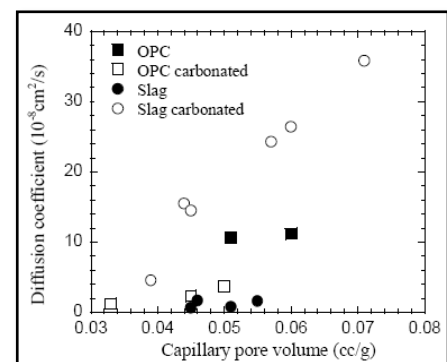
La diferencia a medida que aumenta la profundidad del frente carbonatado, es atribuida a que, la carbonatación conlleva a una reducción en el volumen de poro, debido a la formación de carbonato de calcio, puesto que el volumen molar se incrementa en cerca de un 11,7 %, cuando éste es formado a partir de la Portlandita²⁷; esto se puede ver de una manera más clara en la Figura 30, en la cual se observa que concretos provenientes de Cemento Portland Tipo I (OPC), como el caso del concreto utilizado durante esta investigación, reducen su volumen capilar después de un proceso de carbonatación.

Figura 29: Coeficientes de Difusión Vs. Relación a/c



Fuente: Los autores

Figura 30: Relación entre volumen capilar y coeficiente de difusión



Fuente: SAEKI, Tatsuhiko (2006)

²⁷ SAEKI, Tatsuhiko. *Estimation of Chloride Diffusion Coefficient of Concrete Using Mineral Admixtures*. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 4, No. 3, 385-394, October 2006.

5.2.3. Determinación carga pasante pruebas ACMT y RCPT

Esta carga pasante fue determinada mediante el área bajo la curva de las graficas de Corriente Vs. Tiempo, producto de los ensayos de ACMT y RCPT (Anexo 4). En las Tablas 20, 21 y 22, se observa que los valores de carga pasante son mayores para la prueba RCPT, en comparación a los resultados obtenidos en la prueba ACMT, esto puede ser debido al aumento en la temperatura durante la prueba, el cual fue de aproximadamente $45 \pm 5^\circ \text{C}$, mientras que para ACMT, el aumento en la temperatura no superó los 5°C , y la “conductividad en la solución poro de los discos de concreto se incrementa con el aumento en la temperatura”.²⁸

Tabla 20: Carga pasante Relación A/C = 0,4

Pruebas	RCPT			ACMT		
	Blanco	A	B	Blanco	A	B
Frentes						
Q_{pas} (coulomb)	4046,09	3559,84	3191,88	2684,38	1787,34	1402,97
D.E	$\pm 879,02$	$\pm 21,43$	$\pm 48,61$	$\pm 436,20$	$\pm 9,94$	$\pm 20,11$

Fuente: Los autores

Tabla 21: Carga pasante Relación A/C = 0,5

Pruebas	RCPT			ACMT		
	Blanco	A	B	Blanco	A	B
Frentes						
Q_{pas} (coulomb)	6577,81	5643,22	4927,97	4194,30	2682,34	1962,97
D.E	$\pm 879,02$	$\pm 797,49$	$\pm 208,82$	$\pm 231,58$	$\pm 318,42$	$\pm 417,41$

Fuente: Los autores

Tabla 22: Carga Pasante Relación A/C = 0,6

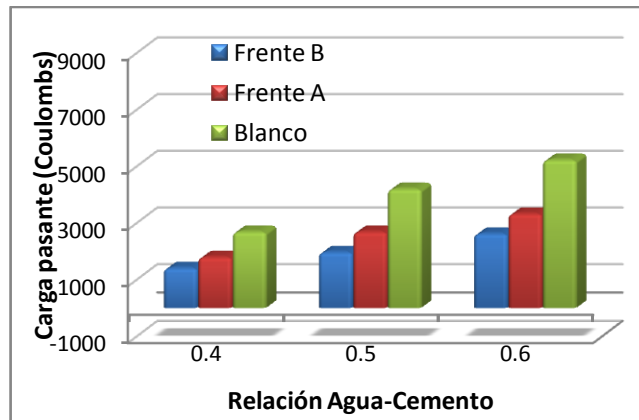
Pruebas	RCPT			ACMT		
	Blanco	A	B	Blanco	A	B
Frentes						
Q_{pas} (coulomb)	8705,16	6150,94	6108,44	5221,56	3319,84	2615,63
D.E	$\pm 2908,20$	$\pm 201,08$	$\pm 398,19$	$\pm 125,95$	$\pm 143,85$	$\pm 190,03$

Fuente: Los autores

²⁸ YANG, CC. An electrochemical method for accelerated chloride migration test of diffusion coefficient in cement-based materials, 2003.

En las Figuras 31 y 32, se puede apreciar de una manera más clara las diferencias en cuanto a la carga pasante para cada una de las relaciones a/c, evidenciando que las diferencias más grandes se presentan en las probetas con una mayor relación de a/c y para voltajes de prueba menores.

Figura 31: Carga pasante prueba ACMT



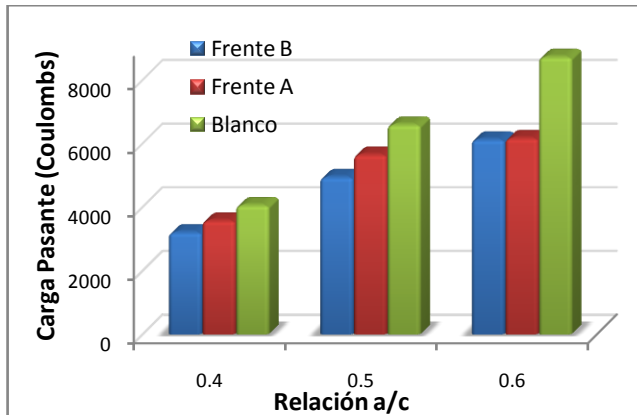
Fuente: Los autores

Al mismo tiempo, se puede ver que para la relación a/c: 0,6 en la prueba RCPT, se obtuvieron valores similares de carga, para los diferentes frentes de carbonatación, esto se puede atribuir a dos factores:

1) Los frentes de carbonatación pueden no diferir mucho el uno del otro, ya que como se pudo observar en las medidas del frente carbonatado, en algunos puntos de las probetas, cuyo frente es 10 mm, se obtenían valores más pequeños y, de manera opuesta para el frente de 5 mm, pudiéndose dar el caso de ensayar probetas con frentes similares.

2) La temperatura que alcanzaban estas probetas, ya que a medida que aumenta la temperatura aumenta la movilidad de los iones y como fue enunciado anteriormente, hace que se disminuya la interacción de estos con la matriz, y siendo este el concreto de menor calidad, debido a que es el de la matriz mas porosa, es el concreto en el cual se alcanzan las temperaturas más elevadas durante la prueba.

Figura 32: Carga pasante prueba RCPT



Fuente: Los autores

En las Figuras 33 a 38, se graficaron los respectivos valores máximo y mínimo para cada una de las cargas pasantes encontradas, teniendo en cuenta su desviación estándar; de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C1202, “*la variación entre dos pruebas realizadas por el mismo operario, no debe ser superior al 47%*”, límite dentro del cual se encuentran las variaciones obtenidas para estos resultados.

Adicionalmente, se observa que las mayores desviaciones estándar, se encuentran en las probetas blanco, esto se atribuye a la heterogeneidad inherente a los concretos.

Figura 33: Carga pasante obtenida mediante RCPT, Relación a/c: 0,4

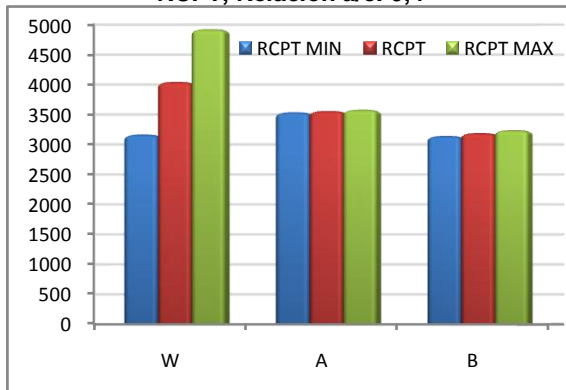


Figura 34: Carga pasante obtenida mediante ACMT, Relación a/c: 0,4

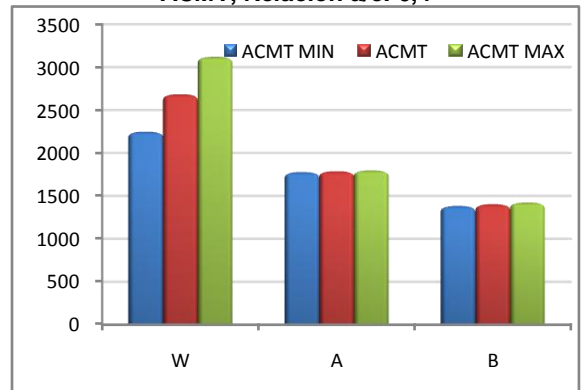


Figura 35: Carga pasante obtenida mediante RCPT, Relación a/c: 0,5

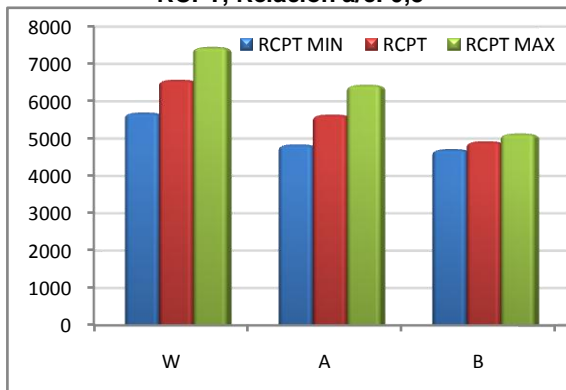


Figura 36: Carga pasante obtenida mediante ACMT, Relación a/c: 0,5

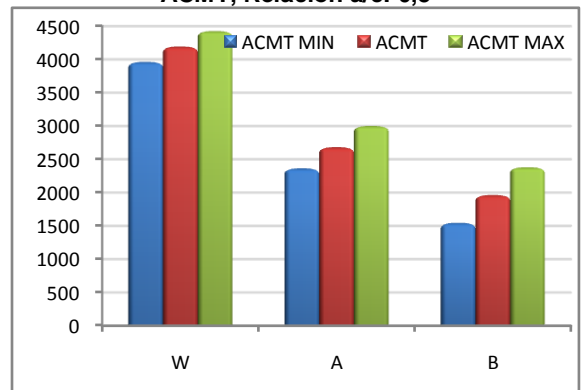


Figura 37: Carga pasante obtenida mediante RCPT, Relación a/c: 0,6

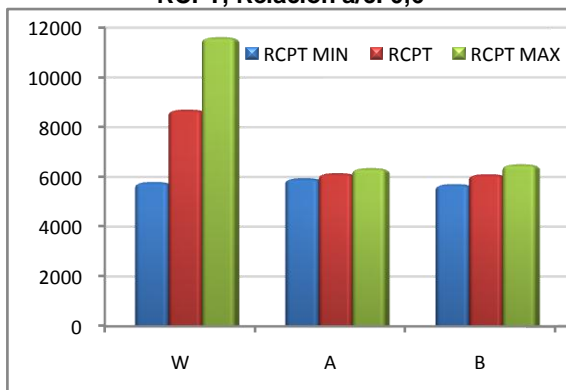
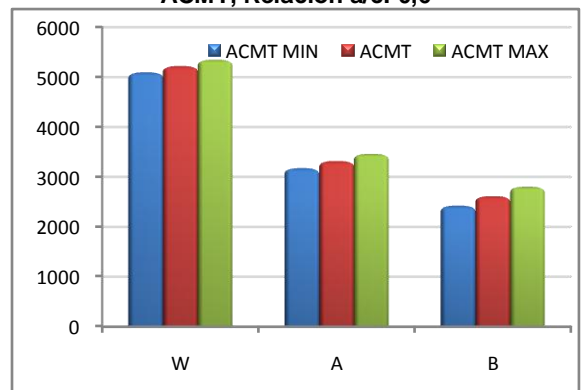


Figura 38: Carga pasante obtenida mediante ACMT, Relación a/c: 0,6



6. CONCLUSIONES

De la investigación realizada y de acuerdo a los resultados obtenidos se presentan las siguientes conclusiones,

- Es posible realizar satisfactoriamente el proceso de carbonatación acelerada en concretos, bajo un 25 % de CO₂, a temperatura ambiente, manteniendo la humedad relativa en un intervalo del 55 al 60 %, donde este parámetro es el más influyente en la difusión del CO₂ a través de la matriz cementicia.
- Al incrementar el frente carbonatado se disminuye la profundidad de penetración del ion cloruro debido a la densificación de la matriz cementicia, producto de la formación del carbonato de calcio, siendo ésto relevante en mezclas con menor contenido de cemento, puesto que la disminución porcentual en la penetración del ion cloruro llega a ser del 40% en concretos con una relación a/c: 0.6, mientras que para concretos con una relación a/c: 0,4 esta disminución solo alcanzó un 26%, respecto a la profundidad de ingreso para probetas no carbonatadas.
- Al aumentar el frente carbonatado se disminuye el Coeficiente de Difusión para el concreto empleado, debido a la reducción del volumen capilar en la matriz cementicia.
- Para todas las relaciones agua/cemento según las pruebas RCPT y ACMT, se presenta una disminución en la carga pasante total a medida que aumenta el frente carbonatado, siendo esta disminución mucho mayor en concretos con mayor relación a/c, observándose una mayor influencia por parte de la carbonatación en concretos de menor calidad.

- Los ensayos de migración de cloruros presentan altos niveles de confiabilidad como indicadores del comportamiento de concretos expuestos a diferentes grados de carbonatación, siendo más conveniente, de acuerdo a los resultados, el empleo de bajos potenciales durante los ensayos, es decir, 24 Voltios o menos.

7. RECOMENDACIONES

Para futuros estudios de fenómenos difusivos en concreto, se recomienda realizar el curado en una solución saturada de cal, con el fin de evitar la lixiviación de la Portlandita presente en la matriz cementicia.

Durante los procedimientos de carbonatación acelerada, se recomienda medir las concentraciones efectivas de CO₂ dentro de la cámara de carbonatación, esto puede ser realizado con un equipo infrarrojo medidor de CO₂.

Trabajar con una cantidad mayor de frentes de carbonatación, cuatro o más, con el fin de poder realizar una correlación experimental entre profundidad de carbonatación y coeficiente de difusión.

En el ensayo acelerado de migración de cloruros, se recomienda monitorear las concentraciones de ion cloruro en la celda anódica, con el fin de determinar el tiempo en el cual ocurre el cambio de régimen no estacionario a estacionario, t_s , el cual permite la obtención de un Coeficiente Efectivo de Difusión, debido a que esto no fue posible realizarlo en la presente investigación por no contar con el equipo de Cromatografía Iónica.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Significance of test and properties of concrete and concrete making materials.* STP 169D, USA, 2006

_____. *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.* ASTM C192-00. Philadelphia, USA, 2000.

_____. *Standard Specification for Concrete Aggregates.* ASTM C33-01. Philadelphia, USA, 2001.

_____. *Standard Specification for Portland Cement* ASTM C150 -07. Philadelphia, USA, 2007.

_____. *Standard Terminology of Concrete Masonry Units and Related Units.* ASTM C1209-01. Philadelphia, USA, 2001.

_____. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* ASTM C1202 – 97. Philadelphia, USA, 1997.

ANDRADE, Carmen et al. A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete Part I. The instantaneous plane source diffusion case. *Cement and Concrete Research* N°32, 1113–1123, Spain, 2002.

CARRASCO, María Fernanda. *Evaluación de estructuras de hormigón.* Universidad Tecnológica Nacional. Argentina, 2007 (Disponible en: <http://www.frsf.utn.edu.ar/>)

CARVALHO SIQUEIRA, Henrique. *Penetração de cloretos em concretos compostos com cimento portland branco e escória de alto forno, ativados quimicamente.* Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil, 2008

CHÁVEZ MACHADO, Jesús Ángel and BUENDÍA RÍOS, Hildebrando. *Perfiles de penetración de cloruro en Estado Iónico en concretos del Rango A/C 045 a 0965.* Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr, Jul 2003, vol.6, no.12, p.36-43.

CORNELIUS, Gerardus. *Prediction of Deterioration of Concrete Bridges.* DUP Science. Netherlands, 2004

DEL VALLE, Angélica et al. *El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado.* Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001.

DONGSEOK, Kim, *The influence of curing time on chloride binding in concrete.* Daewoo Institute of Construction Technology, Daewoo E&C. Co., 6th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, Korea, 2008

GIRALDO, Manuel Alejandro; TOBON, Jorge Ivan. *Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación.* Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2005.

GUNDAKER. E. F. *Corrosion monitoring and protection for infrastructure projects,* 2nd Latin American Region Corrosion Congress, NACE, 1996

GONZALES, Manuel. *La corrosión del concreto en ambiente marino.* I Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción, American Concrete Institute, Capítulo Peruano, 1998.

LIZARAZO, Juan Manuel. *Ensayos típicos en la determinación de la durabilidad del concreto.* Universidad Nacional de Colombia. 2007. (Disponible en: <http://www.docentes.unal.edu.co/jmlizarazom/>)

MEJIA, Ruby. *Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios.* Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytel 1999.

MOKHTAR, K. Ait. *Steel corrosion in reinforced concrete Report n°2-2 Concrete in marine environment.* LEPTAB La Rochelle University. Project N°197, 2008

MONTEIRO, Paulo. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.* Ed. Mc Graw Hill, Third Edition, Chapter II: Microstructure of concrete. 2006.

MORENO, Eric; et al. *Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración.* Ingeniería: Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. 8-2; 117-130; 2004

NACE International – the Corrosion Society – 1440 South Creek Drive – Houston, TX 77084-4906. En: <http://www.nace.org>

ROJAS NOGUERA, María José Sánchez. *Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento.* Universidad de Alicante, 2004.

SAEKI, Tatsuhiko. *Estimation of Chloride Diffusion Coefficient of Concrete Using Mineral Admixtures.* Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 4, No. 3, 385-394, October 2006.

STANISH, K.D.; HOOTON, R.D.; THOMAS, M.D.A. *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review.* Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2000.

YANG, CC. *An electrochemical method for accelerated chloride migration test of diffusion coefficient in cement-based materials.* Material, Chemistry and physics. Institute of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan, 2003

YUAN, Qiang. *Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review,* School of Civil Engineering and Architecture,

Central South University, Hunan, China, Construction and Building MATERIALS, N° 23, 1-13, 2009.

____. *Effect of hydroxyl ions on chloride penetration depth measurement using the colorimetric method.* Cement and Concrete Research, N°38, 1177–1180, 2008

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Petrographic Methods of Examining Hardened Concrete: A Petrographic Manual; sample preparation for and examination with the scanning electron microscope.* [En línea] Federal Highway Administration, 15 de Septiembre de 2006. [Citado el: 2 de Febrero de 2009.] <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pccp/pubs/04150/chapt14.cfm>

ANEXOS

ANEXO 1

“Consumo de concreto en el mundo”

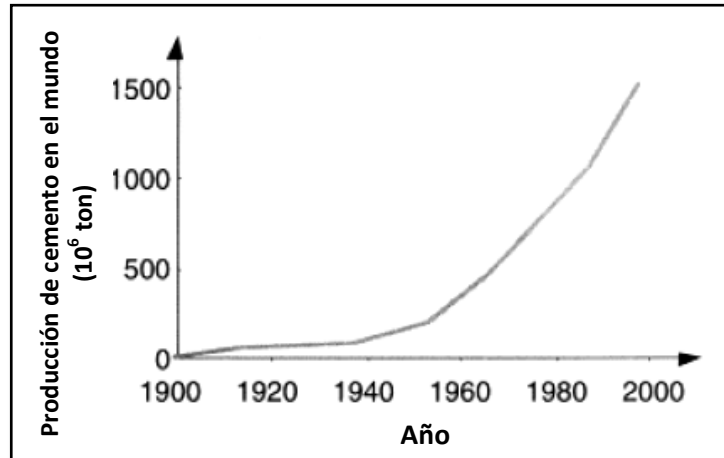
Consumo de Concreto en el Mundo²⁹

Como fue expuesto por Pierre Claude Aïtcin en 1900, el total de la producción mundial de cemento fue aproximadamente de 10 millones de toneladas; en 1998 fue de 1,6 billones de toneladas.

Teniendo en cuenta que aproximadamente 250 kg de cemento se usan para producir 1 m³ de hormigón, en 1900 sólo 40 millones de m³ de hormigón se utilizaron, mientras que en 1998 la cantidad producida fue de aproximadamente 6,4 billones de m³.

En menos de un siglo, el concreto se ha convertido en el material de construcción más utilizado en el mundo. En la Figura 39 se representa la cantidad de cemento producido en el mundo; se puede observar que a partir de la segunda mitad del siglo XX comenzó un aumento acelerado en la producción.

Figura 39: Producción mundial de cemento durante el siglo XX



Fuente: K. Aït Mokhtar, 2005

El consumo mundial de cemento se prevé que seguirá aumentando en los próximos años, teniendo el volumen anual de hasta el 2,283 millones de toneladas

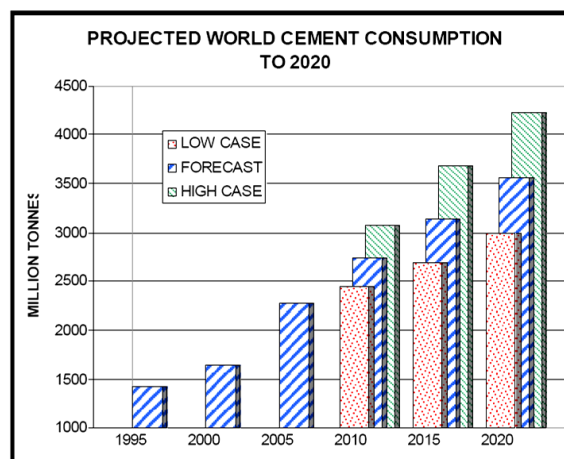
²⁹ MOKHTAR. K. Aït. Steel corrosion in reinforced concrete Report n°2-2 Concrete in marine environment. LEPTAB La Rochelle University. Project N°197, 2005.

en el 2005, alrededor de 3,130 millones de toneladas para el año 2015 y 3,560 en 2020, lo que representa el avance general de expansión de aproximadamente el 56 %.³⁰

En un estudio realizado por Oceans Shipping Consultants se incluyeron dos alternativas en cuanto a la proyección del consumo mundial de cemento, la cuales se representan en la Figura 40. Tales alternativas son:

- *Low Case*: En el caso de baja, el consumo de cemento del mundo global se proyecta que crecerá sólo marginalmente en el corto plazo, seguido por el crecimiento más importante de entonces. El total mundial se proyecta que llegará a más de 2440 millones de toneladas en 2010, y 2995 millones de toneladas en 2020 - un total de expansión de avanzar un poco más de 31 %.
- *High Case*: el perfil es algo diferente, el promedio anual de expansión se espera que sea relativamente alto en el cercano y mediano plazo, seguido con una desaceleración. En términos de tonelaje, esto se traduce a un nivel proyectado de alrededor de 3075 millones de toneladas en 2010, aumentando a 4220 en 2020. Crecimiento posterior total aproximado de 85 %.

Figura 40: Proyección del consumo de Cemento, 2020



Fuente: Oceans Shipping Consultants, 2006.

³⁰ OCEANS SHIPPING CONSULTANTS. Cement: Consumption Growth Ahead. En: <http://www.OSClimited.org> 2006.

ANEXO 2


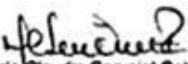
“Reportes de calidad de los materiales”

A. **CEMENTO:** En la tabla 23 relaciona la composición química del Cemento Portland empleado en la fabricación de las probetas, obtenida mediante un ensayo de Fluorescencia de Rayos X y en la Figura 41 se muestra el reporte de calidad del fabricante.

Tabla 23: Composición Química Cemento Portland Tipo I Marca Diamante [%]

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	MnO	SrO	TiO ₂	K ₂ O
72,5	14,92	4,31	2,68	3,3	1,38	0,03	0,21	0,13	0,54

Figura 41: Reporte de calidad del cemento

CEMEX COLOMBIA S.A., PLANTA BUCARAMANGA			
		km 4 Via Rio Negro Bucaramanga Colombia TEL (097)6402600 / 31714, FAX (097) 6402599 /31714	
REPORTE DE CALIDAD			
Referencia: CEMENTO PORTLAND TIPO 1 Reporte No. 2008BG-T1-40-01 Semana No. 40 Cemento despachado del 30 - 6 de Octubre 08 Fecha: 14-11-2008			
Analisis Quimicos	Resultados	Requisitos Norma NTC 321	Observaciones
% SO ₃	2.31	Máximo 3.5	Cumple
% MgO		Máximo 7.0	Cumple
Analisis fisicos		Requisitos Norma NTC 121	Observaciones
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	4113	Mínimo 2800	Cumple
Tiempos de fraguado Vicat (minutos)			
Inicial	119	Mínimo 45	Cumple
Final	179	Máximo 480	Cumple
Expansión en autoclave (%)	0.0025	Máximo 0.80	Cumple
Resistencias a compresión (kg/cm ²)			
3 días	165	Mínimo 80	Cumple
7 días	210	Mínimo 150	Cumple
28 días	264	Mínimo 240	Cumple
Observaciones: El cemento analizado cumple con la totalidad de los requisitos obligatorios establecidos para el cemento Portland Tipo 1 por las Normas NTC 121 y NTC 321. El presente reporte corresponde exclusivamente al cemento de la referencia y no a otros lotes de cemento de la misma procedencia.			
 Maria Claudia Carvajal Cabeza Coordinador Aseguramiento de Calidad			

B. AGREGADO FINO Y GRUESO

Tabla 24: Gravedades Específicas del Agregado

GRAVEDADES ESPECIFICAS		
	A fino	A grueso
Real	2,69	2,70
Aparente	2,56	2,60
Aparente s s s	2,65	2,67

Tabla 25: Otras propiedades del agregado

	A FINO	A GRUESO
Peso unitario suelto	1560 Kg/m ³	1530 Kg/m ³
Peso unitario compactado	1600 Kg/m ³	1590 Kg/m ³
Absorción %	2,0	1,5
Porcentaje de vacios %	35,0	38,0

Tabla 26: análisis Granulométrico del Agregado Fino

ANALISIS GRANULOMETRICO AGREGADO FINO				
Tamiz	Peso retenido	% Retenido	% Ret. acumulado	% Que pasa
4	0	-	-	-
8	0	-	-	-
16	156,2 g	15,62	15,42	84,38
30	335,2 g	33,52	49,14	50,86
50	271,7 g	27,17	76,31	23,69
100	134,1 g	13,41	89,72	10,28
FONDO	100,9 g	10,09	99,81	0,19
TOTAL	998,1 g	99,81	PESO MUESTRA	1000 g


MODULO DE FINURA: 2,3

Tabla 27: Análisis Granulométrico del Agregado Grueso

ANALISIS GRANULOMETRICO AGREGADO GRUESO				
Tamiz	Peso retenido	% retenido	% ret. acumulado	% que pasa
3/4	0	-	-	-
½	757,6 g	10,82	10,82	89,18
3/8	3681,6 g	52,59	63,41	36,59
4	2560,8 g	36,58	99,99	0,01
FONDO	-	-	-	-
TOTAL	7000 g		PESO MUESTRA	7000 g

TAMAÑO MAXIMO: 3/4

C. AGUA

No Aplica	CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION	
F CC 507-006		
Rev.:0		
LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS		

		Parámetros Físicoquímicos													
Mes	Parámetro	No. Muestras Físicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color aparente UPC	pH Unidades	Olor y Sabor 0: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg Al/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruros mg Cl ⁻ /L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO ₃ /L	Nitritos mg NO ₂ /L
	Enero		90	0,98	0,79	4,1	7,36	0	0,06	51,1	64,8	3,1	22,7	0,09	1,4
Febrero		87	0,93	1,1	4,6	7,29	0	0,06	50,3	66,4	3,6	24,8	0,07	1,3	0,00
Marzo		90	0,97	1,7	9,0	7,28	0	0,09	47,5	63,1	2,7	22,0	0,16	1,5	0,00
Abril		90	0,88	0,94	5,0	7,16	0	0,06	42,8	63,3	3,0	27,1	0,08	1,4	0,00
Mayo		93	0,99	1,7	11,3	7,12	0	0,17	41,6	65,8	2,5	32,5	0,15	2,0	0,00
Junio		90	1,03	1,1	5,8	7,23	0	0,10	45,1	59,8	2,4	24,8	0,12	1,7	0,00
Julio		93	0,98	1,1	2,5	7,33	0	0,08	45,1	60,1	2,7	21,8	0,10	1,7	0,00
Agosto		93	1,01	1,2	3,2	7,27	0	0,07	48,0	64,4	2,7	22,3	0,07	1,9	0,00
Septiembre		90	1,09	1,3	3,4	7,12	0	0,11	40,9	58,8	3,3	25,2	0,06	1,4	0,00
PROMEDIO		91	0,98	1,2	5,4	7,24	0	0,09	45,8	62,9	2,9	24,8	0,10	1,6	0,00
RES. 2115/07		3/día	0,3-2,0	≤2	≤15	6,5-9,0	ACEP	0,2	200	300	250	250	0,3	10	0,1

Convenciones: mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad UPC: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua

Elaboró: URIEL SALOMON BARRAGAN

Revisó y Aprobó:

CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ

Fuente: www.amb.com.co

ANEXO 3

“Diseño de la mezcla”

DISEÑO DE LA MEZCLA

A partir de la relación proporcionada por el fabricante (Ver sección 4.3.1) las proporciones empleadas para fabricar las probetas para las tres diferentes relaciones a/c, fueron:

Tabla 28: Diseño de la mezcla para concreto con a/c = 0,4

Componente	Cantidad utilizada
Agua	4,870 kg
Cemento	12,176 kg
Arena	18,253 kg
Grava	19,6681kg

Tabla 29: Diseño de la mezcla para concreto con a/c = 0,5

Componente	Cantidad utilizada
Agua	6,088 kg
Cemento	12,176 kg
Arena	18,253 kg
Grava	19,668kg

Tabla 30: Diseño de la mezcla para concreto con a/c = 0,6

Componente	Cantidad utilizada
Agua	7,306kg
Cemento	12,176 kg
Arena	18,253 kg
Grava	19,668 kg

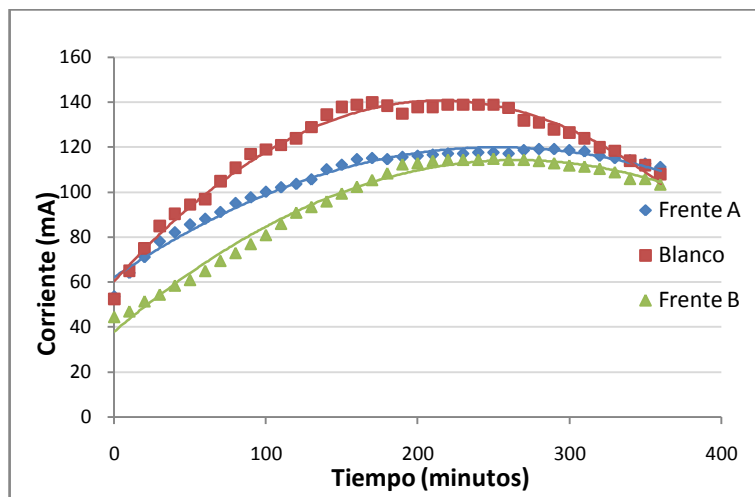
ANEXO 4

“Resultados de ACMT y RCPT”

En las Figuras 42 a la 47 se relacionan los resultados de los ensayos de RCPT y ACMT para cada una de las relaciones a/c; tales curvas representan los datos reportados en las Tablas 31 a la 36.

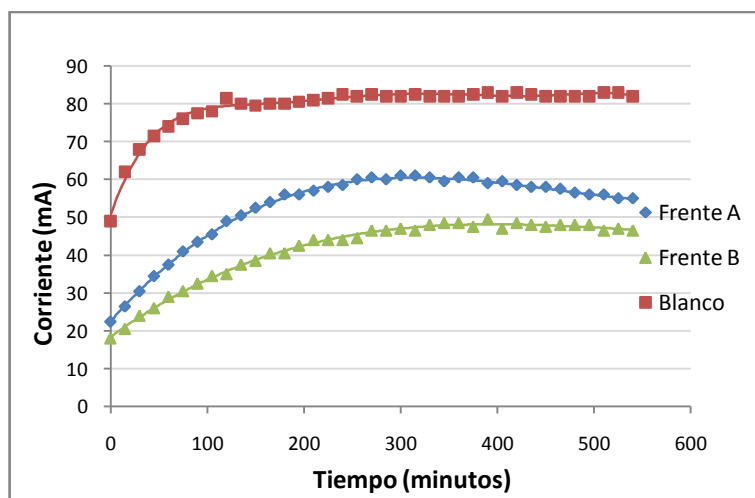
Mediante la ley de Integración de Simpson, se determinó el área bajo de curva de estas graficas, siendo este valor el correspondiente a la Carga Pasante Total (Sección 5.2.3).

Figura 42: Variación de la corriente en el tiempo, durante el RCPT, Relación a/c 0,4



Fuente: Los autores

Figura 43: Variación de la corriente en el tiempo, durante el ACMT, relación a/c 0,4



Fuente: Los autores

**Tabla 31: Corriente Medida (mA), Prueba
ACMT, Relación A/C: 0,4**

Tiempo [min]	Frente A*	Frente B*	Blanco *
0	22,5	18	49
15	26,5	20,5	62
30	30,5	24	68
45	34,5	26	71,5
60	37,5	29	74
75	41	30,5	76
90	43,5	32,5	77,5
105	45,5	34,5	78
120	49	35	81,5
135	50,5	37,5	80
150	52,5	38,5	79,5
165	54	40,5	80
180	56	40,5	80
195	56	42,5	80,5
210	57	44	81
225	58	44	81,5
240	58,5	44	82,5
255	60	44,5	82
270	60,5	46,5	82,5
285	60	46,5	82
300	61	47	82
315	61	46,5	82,5
330	60,5	48	82
345	59,5	48,5	82
360	60,5	48,5	82
375	60,5	47,5	82,5
390	59	49,5	83
405	59,5	47	82
420	58,5	48,5	83
435	58	48	82,5
450	58	47,5	82
465	57,5	48	82
480	56,5	48	82
495	56	48	82
510	56	46,5	83
525	55	47	83
540	55	46,5	82

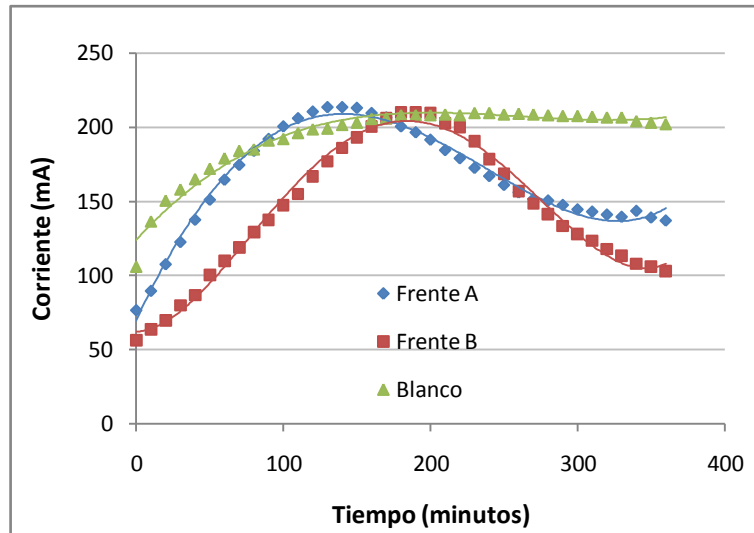
* Promedio de dos datos

**Tabla 32: Corriente Medida (mA), Prueba
RCPT, Relación A/C: 0,4**

Tiempo [min]	Blanco*	Frente A*	Frente B*
0	52,5	53,5	44,5
10	65	64	47
20	75	71	51,5
30	85	78	54,5
40	90,5	82	58,5
50	94,5	85,5	61
60	97	88	65
70	105	91	69,5
80	111	95	73
90	117	97,5	77
100	119	100	81
110	121	102	86
120	124	103,5	91
130	129	105,5	93,5
140	134,5	110	96
150	138	112	99,5
160	139	114,5	102,5
170	140	115	105,5
180	138,5	114,5	108,5
190	135	115,5	112,5
200	138	116	113
210	138	116,5	114
220	139	117	114,5
230	139	117	114,5
240	139	117,5	114,5
250	139	117,5	115
260	137,5	117	114,5
270	132	118,5	114,5
280	131	119	114
290	128	119	113
300	126,5	118,5	112
310	124	118	111,5
320	120	116	110,5
330	118,5	115	109
340	114	114	106
350	112	112,5	106
360	108	111	103,5

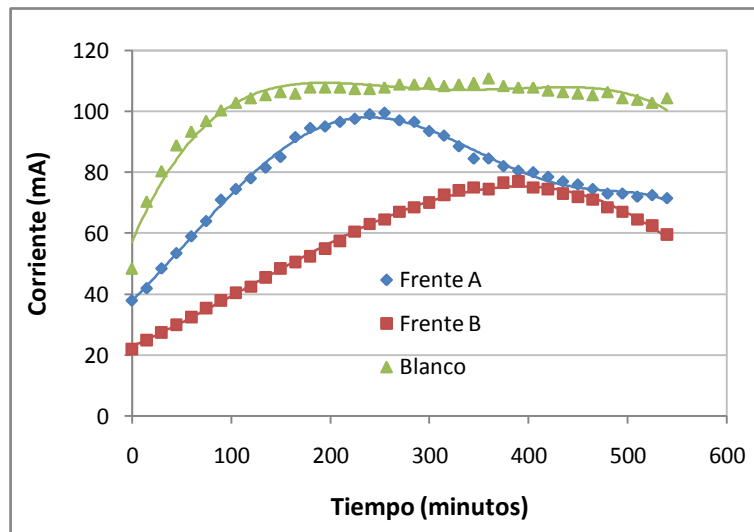
*Promedio de dos datos

Figura 44: Resultados prueba RCPT, a/c: 0,5



Fuente: Los autores

Figura 45: Resultados prueba ACMT, a/c : 0,5



Fuente: Los autores

Tabla 33: Corriente Medida (mA), Prueba RCPT, Relación A/C: 0,5

tiempo	Frente A*	Frente B*	Blanco
0	76,5	56,5	106
10	89,5	64	136,5
20	107,5	70	150,5
30	122,5	80	158
40	137,5	87	165
50	151	100,5	172
60	164,5	110	179
70	174,5	119	184
80	184	129,5	185
90	192	137,5	191
100	200,5	147,5	192
110	206	155	196
120	210,5	167	198,5
130	213,5	177	199
140	213,5	186	201,5
150	213	193	203
160	209,5	200,5	205,5
170	206,5	206	206
180	200,5	210	208
190	196,5	210	208
200	191,5	209,5	208
210	184,5	202,5	208,5
220	179	200	208
230	172,5	190,5	209,5
240	167	178,5	209,5
250	161	168,5	208,5
260	156	157	209
270	151,5	148,5	208,5
280	150,5	141,5	208
290	147,5	133,5	207,5
300	144,5	128	207,5
310	143	123,5	207
320	141	118	206,5
330	139,5	113,5	206,5
340	143,5	108	204
350	139	106	203
360	137	103	202

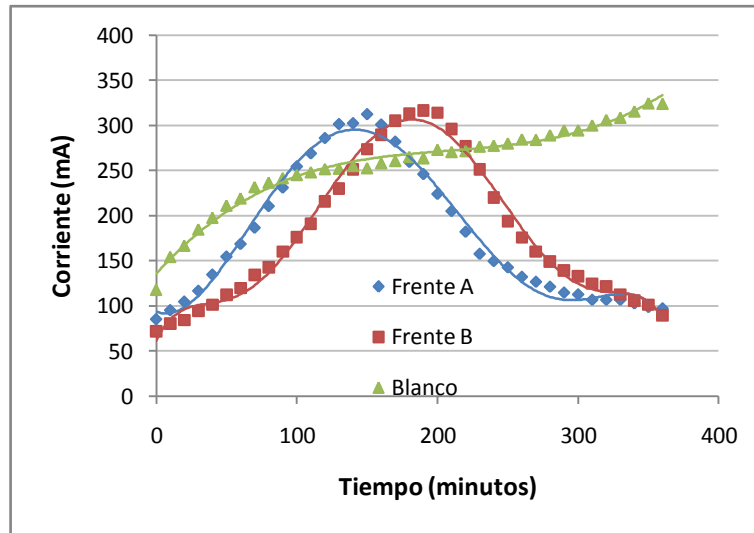
* Promedio de dos datos

Tabla 34: Corriente Medida (mA), Prueba ACMT, Relación A/C: 0,5

Tiempo	Frente A*	Frente B*	Blanco*
0	38	22	48,5
15	42	25	70,5
30	48,5	27,5	80,5
45	53,5	30	89
60	59	32,5	93,5
75	64	35,5	97
90	71	38	100,5
105	74,5	40,5	103
120	78	42,5	104,5
135	81,5	45,5	105,5
150	85	48,5	106,5
165	91,5	50,5	106
180	94,5	52,5	108
195	95	55	108
210	96,5	57,5	108
225	97,5	60,5	107,5
240	99	63	107,5
255	99,5	64,5	108
270	97	67	109
285	96,5	68,5	109
300	93,5	70	109,5
315	92	72,5	108,5
330	88,5	74	109
345	84,5	75	109,5
360	84,5	74,5	111
375	82	76,5	108,5
390	80,5	77	108
405	80	75	108
420	78,5	74,5	107
435	77	73	106,5
450	76	72	106
465	74,5	71	105,5
480	73	68,5	106,5
495	73	67	104,5
510	72	64,5	104
525	72,5	62,5	103
540	71,5	59,5	104,5

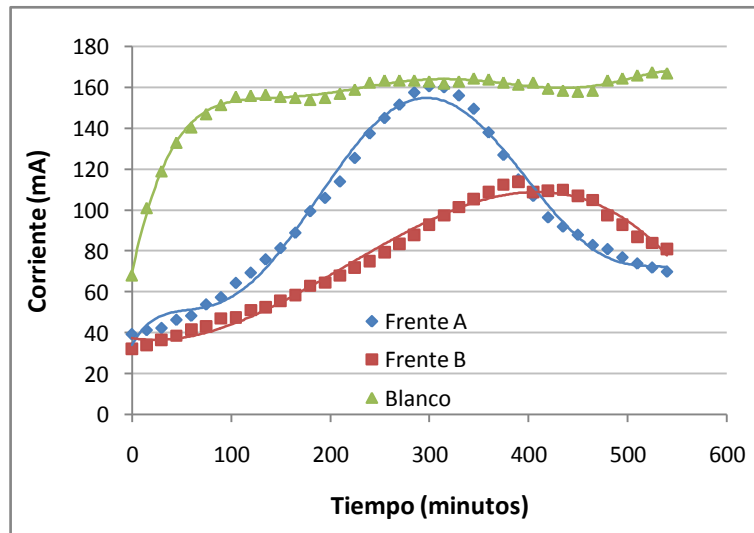
* Promedio de dos datos

Figura 46: Resultados prueba RCPT, a/c: 0,6



Fuente: Los autores

Figura 47: Resultados prueba ACMT, a/c: 0,6



Fuente: Los autores

Tabla 35: Corriente Medida (mA), Prueba RCPT, Relación A/C: 0,6

Tiempo	Frente A*	Frente B*	Blanco*
0	85,5	72	118
10	95,5	80,5	154,5
20	105	84,5	167
30	117	94,5	185
40	135	101,5	198
50	155	112,5	211,5
60	169	120	219,5
70	187	134,5	232
80	211	143	237
90	231,5	160,5	242
100	255	176,5	245,5
110	269,5	191,5	248,5
120	286,5	216	252
130	302	230,5	252,5
140	303	251,5	255,5
150	313	274	253
160	301,5	290	258,5
170	282,5	305,5	261
180	260	313,5	265,5
190	246,5	317	264
200	224,5	314,5	273,5
210	205,5	296,5	271
220	182,5	277,5	272
230	158	251,5	277
240	150	220,5	278
250	143	194	280,5
260	132,5	176	285
270	127	160,5	284,5
280	121,5	149,5	289,5
290	115	139,5	295
300	113	133	295
310	107	125	300,5
320	107	122	306,5
330	107	113	309
340	103	106	316
350	99	101,5	325
360	97,5	90	324,5

* Promedio de dos datos

Tabla 36: Corriente Medida (mA), Prueba ACMT, Relación A/C: 0,6

Tiempo	Frente A*	Frente B*	Blanco*
0	39,5	32	68
15	41,5	34	101
30	42,5	36,5	119
45	46,5	38,5	133
60	48,5	41,5	140,5
75	54	43	147
90	57,5	47	151,5
105	64,5	47,5	155,5
120	69,5	51	156
135	76	52,5	156,5
150	81,5	55,5	155,5
165	89	58,5	155
180	99,5	63	154
195	106	64,5	155
210	114	68	157
225	125,5	72	159
240	137,5	75	162,5
255	145	79,5	163,5
270	151,5	83,5	163,5
285	157,5	88	163,5
300	160,5	93	163
315	160	97,5	162
330	156	101,5	163
345	149,5	105,5	164,5
360	138	109	164
375	127	112,5	162,5
390	115	114	161,5
405	107	109	162,5
420	96,5	109,5	159,5
435	92	110	158,5
450	88	107	158
465	83	105	158,5
480	81	97,5	163,5
495	77	93	164,5
510	74	87	166
525	72	84	167,5
540	70	81	167

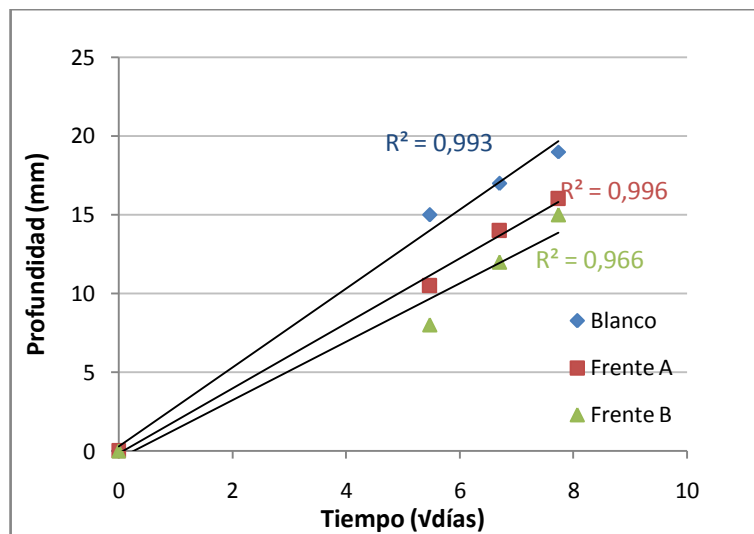
* Promedio de dos datos

ANEXO 5

“Profundidades de penetración”

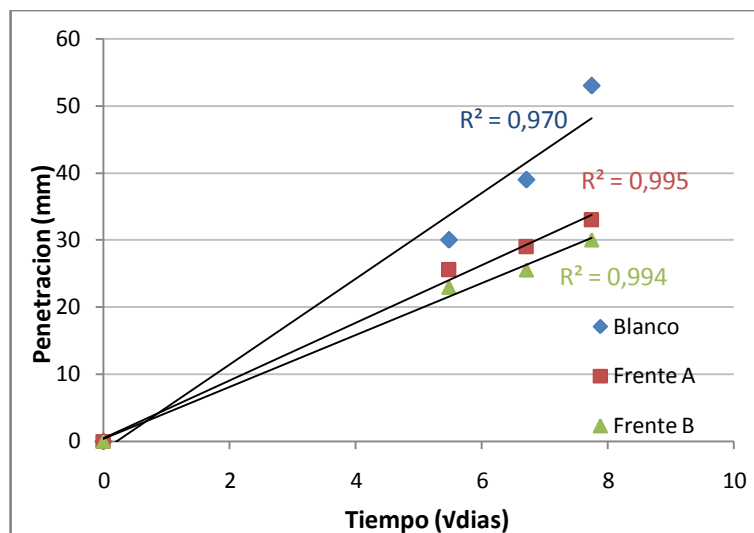
En las Figuras 48 y 49 se observan las líneas de tendencia correspondientes a los puntos experimentales, las cuales tienen una tendencia definida, en cuanto a la capacidad de penetración del ion cloruro, a través de la estructura cementicia, tanto carbonatada como no carbonatada, para las relaciones a/c de 0,4 y 0,6 (Sección 5.2.1).

Figura 48: Profundidades de penetración, relación a/c: 0,4



Fuente: Los autores

Figura 49: Profundidades de penetración, relación a/c: 0,6



Fuente: Los autores

ANEXO 6

“Perfiles de Concentración del Ion Cloruro”

En las graficas 50 a la 55, se representan las concentraciones de cloruros, obtenidas mediante el análisis de titulación potenciométrica, para las relaciones a/c de 0.5 y 0.6, con 30, 45 y 60 días de inmersión; el perfil correspondiente para la relación a/c de 0,4 se muestra en la sección 5.2.2.

Perfiles de concentración de ion cloruro, relación a/c: 0,5

Figura 50: Perfil de cloruros, 30 días, relación a/c: 0,5

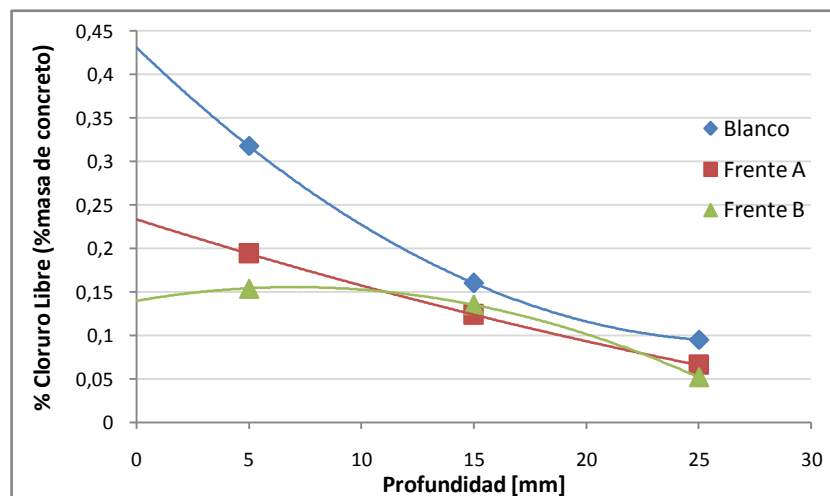


Figura 51: Perfil de cloruros, 45 días, relación a/c: 0,5

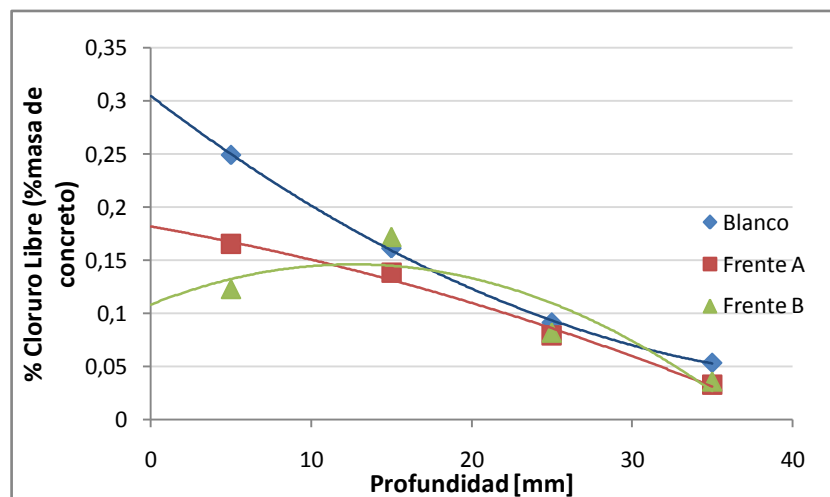
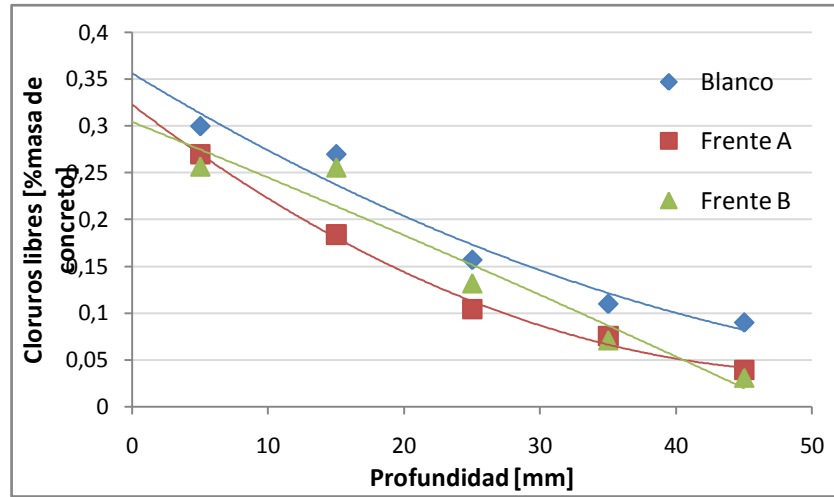


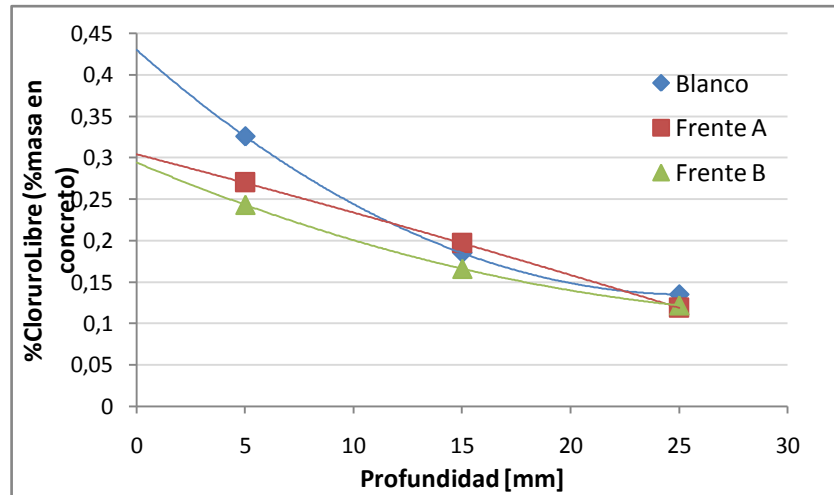
Figura 52: Perfil de cloruros, 60 días, relación a/c: 0,5



Fuente: Los autores

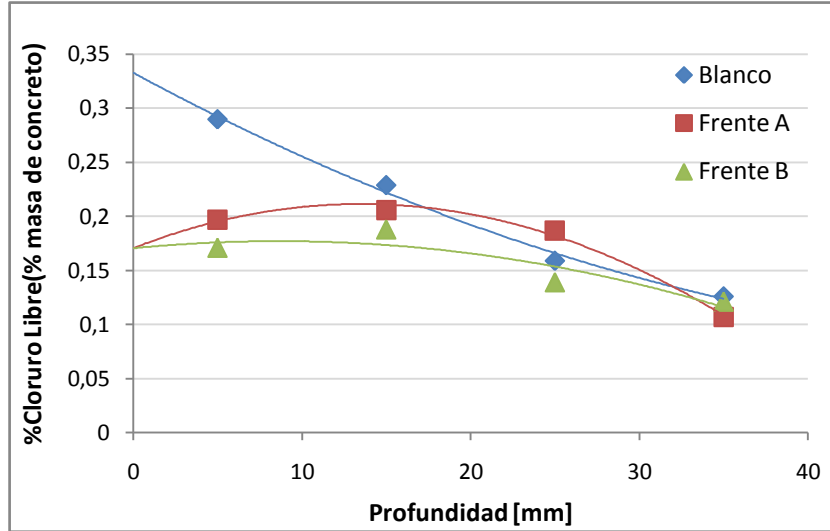
Perfiles de concentración de ion cloruro, relación a/c: 0,6

Figura 53: Perfil de cloruros, 30 días, relación a/c: 0,6



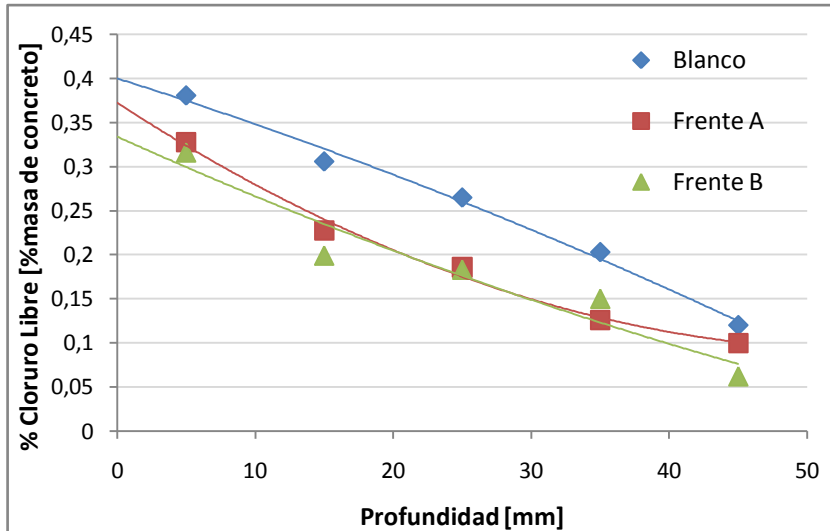
Fuente: Los autores

Figura 54: Perfil de cloruros, 45 días, relación a/c: 0,6



Fuente: Los autores

Figura 55: Perfil de concentración 60 días, relación a/c: 0,6



Fuente: Los autores

ANEXO 7

“Linealización de los perfiles de concentración”

A continuación se pueden observar las linealizaciones de los perfiles de concentración de cloruros, realizadas con el fin de determinar los coeficientes de difusión (ver sección 5.2.2)

Figura 56 Linealización del perfil de concentración, relación a/c: 0,4

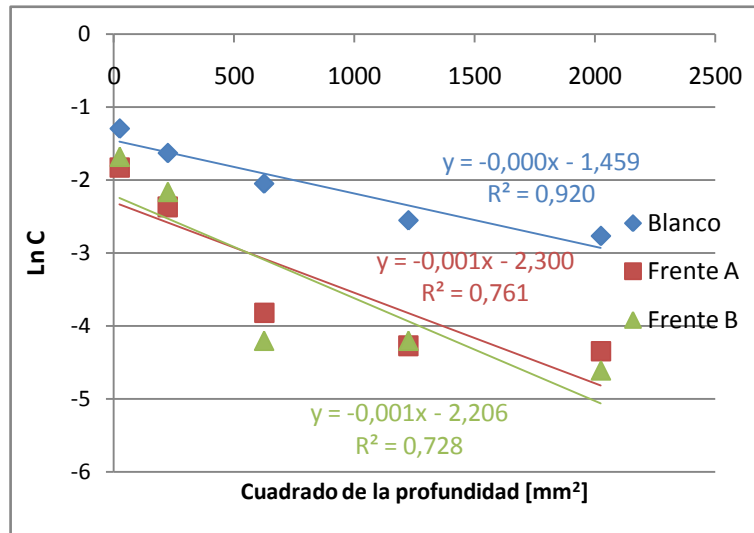


Figura 57: Linealización del perfil de concentración, relación a/c: 0,5

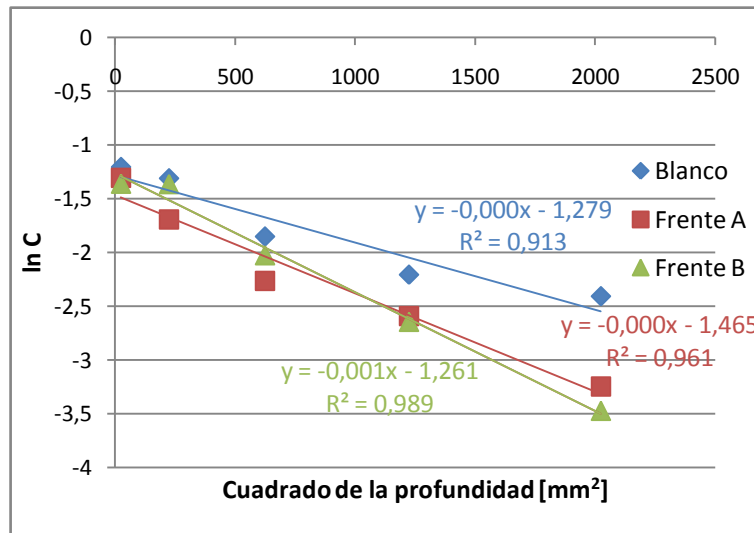
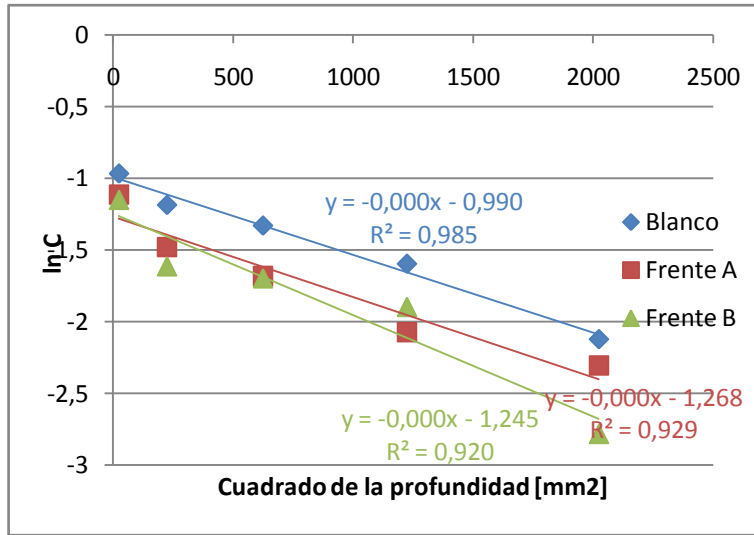


Figura 58: Linealización del perfil de concentración, relación a/c: 0,6



ANEXO 8

“DRX: Análisis Cuantitativo”

MUESTRA CARBONATADA

FASE		N° TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O ₂	010-89-8934	Cuarzo	35,2 % (D.E = 0,1)
	Ca CO ₃	010-75-6049	Calcita	29,3 % (D.E = 0,1)
	Ca Mg (CO ₃) ₂	010-75-3697	Dolomita	2,5 % (D.E = 0,1)
	K Al Si ₃ O ₈	000-19-0932	Microclina	5,9 % (D.E = 0,1)
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-89-6424	Albita	9,3 % (D.E = 0,1)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-58-2037	Moscovita	8,0 % (D.E = 0,1)
	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	000-29-0701	Clinocloro	6,8 % (D.E = 0,1)
Total cristalinos				97,0%
Amorfos y otros				3,0%

MUESTRA NO CARBONATADA

FASE		N° TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O ₂	000-46-1045	Cuarzo	36,3 % (D.E = 0,2)
	Ca CO ₃	010-83-0578	Calcita	13,0 % (D.E = 0,2)
	Ca (OH) ₂	010-78-0315	Portlandita	6,3 % (D.E = 0,1)
	K Al Si ₃ O ₈	010-83-1895	Microclina	7,1 % (D.E = 0,1)
	Ca ₆ (Al (OH) ₆ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂₆	010-73-6239	Etringita	1,5 % (D.E = 0,1)
	Ca SO ₄ 2H ₂ O	000-06-0047	Yeso	3,5 % (D.E = 0,1)
	Na (Al Si ₃ O ₈)	000-09-0466	Albita	12,5 % (D.E = 0,1)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-58-2037	Moscovita	9,4 % (D.E = 0,2)
	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	000-29-0701	Clinocloro	4,5 % (D.E = 0,1)
Total cristalinos				94,1%
Amorfos y otros				5,9%

OBSERVACIONES

En los perfiles de difracción se observa la fase de Corundum - Aluminum Oxide (estándar interno), el cual fue agregado a la muestra en una cantidad conocida para la respectiva cuantificación.||