

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN APARENTE DEL IÓN
CLORURO EN CONCRETO EXPUESTO A AMBIENTES CON CLORUROS**

**CLAUDIA LEÓN MONCADA
SANDRA ASTRID ORÓSTEGUI OLARTE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2009**

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN APARENTE DEL IÓN
CLORURO EN CONCRETO EXPUESTO A AMBIENTES CON CLORUROS**

**CLAUDIA LEÓN MONCADA
SANDRA ASTRID ORÓSTEGUI OLARTE**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Químico

Director
CUSTODIO VASQUEZ QUINTERO
Ingeniero Metalúrgico MSc

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2009**

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan sus más sinceros agradecimientos a:

Custodio Vásquez Quintero, Ingeniero metalúrgico MSc. director de ésta investigación y Darío Yesid Peña, Ingeniero metalúrgico Ph. D., Grupo de Investigación en Corrosión.

Colciencias y la Armada Nacional.

Escuela de Ingeniería Química.

Jairo Hernández Salazar, técnico del Centro de Caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil.

Nuestros compañeros Nancy, Blanca y Diego, por su constante apoyo y colaboración y a los miembros del Grupo de Investigación en Corrosión-GIC.

A mis padres.

Caya

A Dios, por darme la oportunidad de vivir, amar, reír y soñar.

A mis Padres y Hermanos, con el tributo pleno de mi amor inmenso; a ellos que han sido faro en mis tinieblas y puerto en mis naufragios; el sitio seguro donde siempre puedo acampar.

A mi Esposo; fuente de amor y fuerza, de dulzura y generosidad, cimiento de mi vida, alivio en la adversidad, manantial de aguas tranquilas donde siempre encuentro la paz.

A mi más grande Amor, ese que en mi vientre anida, el que me hace soñar, que me transforma la vida, que mi ser llena de gozo y en el que siempre encuentro la dicha.

Sandra Astrid Oróstegui Olarte

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS TEÓRICOS	3
1.1 ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO	3
1.1.1 Concreto	3
1.1.2 Hidratación	3
1.1.3 Refuerzo	4
1.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE EN CONCRETO	4
1.3 CORROSIÓN INDUCIDA POR CLORUROS	5
1.4 DIFUSIÓN DEL IÓN CLORURO	6
1.5 COEFICIENTE DE DIFUSIÓN	7
1.5.1 Coeficiente de difusión aparente del ión cloruro (D_{ap})	7
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	9
2.1 METODOLOGÍA	9
2.2 PRUEBAS PRELIMINARES	10
2.2.1 Caracterización de materiales	10
2.2.2 Equipos	10
2.2.3 Preparación de probetas de concreto	11
2.2.4 Pruebas de compresión	12
2.2.5 Condiciones de las pruebas electroquímicas	12
2.3 EXPERIMENTACIÓN	12
2.3.1 Absorción de agua	12
2.3.2 Ensayo de resistencia a la penetración del ión cloruro (RCPT)	13
2.3.3 Prueba de migración acelerada del ión cloruro (ACMT)	13
2.3.3.1 Método colorimétrico	14

2.3.4	Difusión natural	15
2.3.4.1	Perfil de concentración de cloruros	15
2.3.4.2	Método colorimétrico	16
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	18
3.1	PRUEBAS DE COMPRESIÓN	18
3.2	ABSORCIÓN CAPILAR	19
3.3	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL IÓN CLORURO	20
3.4	PRUEBA DE MIGRACIÓN ACELERADA DEL IÓN CLORURO	21
3.5	DIFUSIÓN NATURAL	21
3.5.1	Ajuste a la función exponencial	23
3.5.2	Ajuste a la función error	24
3.5.3	Método colorimétrico	25
3.6	COMPARACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DIFUSIÓN	26
3.6.1	Comparación de los coeficientes con la relación agua/cemento	26
3.6.2	Comparación de los métodos experimentales	27
	CONCLUSIONES	29
	RECOMENDACIONES	30
	BIBLIOGRAFIA	31
	ANEXOS	34

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Procesos de transporte en concreto	4
Figura 2. Cloruros en el sistema poroso del concreto	6
Figura 3. Metodología	9
Figura 4. Equipo de vacío	10
Figura 5. Equipo para pruebas electroquímicas	11
Figura 6. Esquema RCPT	13
Figura 7. Esquema ACMT	14
Figura 8. Celda de inmersión a) Esquema, b) Lugar de inmersión	15
Figura 9. Resultados de las pruebas de compresión	18
Figura 10. Absorción capilar a) W_a vs $t^{1/2}$ b) t vs z^2	19
Figura 11. Carga vs Relación agua/cemento	20
Figura 12. Perfiles de concentración a) 30 días, b) 45 días, c) 60 días	22
Figura 13. Linealización a 60 días	23
Figura 14. Ajuste de la función exponencial al perfil de 60 días	23
Figura 15. Ajuste de la función error al perfil de 60 días	24
Figura 16. Profundidad de penetración vs Tiempo	25
Figura 17. Coeficientes de difusión por relación agua/cemento	26
Figura 18. Comparación de los coeficientes de difusión	27
Figura 19. Formación del concreto	36
Figura 20. Resistencia a la compresión	37
Figura 21. Espectrometría de fluorescencia de rayos X	39
Figura 22. Morfología del concreto	40
Figura 23. Composición del agua del acueducto de Bucaramanga	43
Figura 24. Mezclado	49

	Pág.
Figura 25. Moldeo y fraguado	49
Figura 26. Curado	49
Figura 27. Corte y pintura	49
Figura 28. Pruebas de compresión	51
Figura 29. Cantidad de agua absorbida en función del tiempo	53
Figura 30. Ensayo de absorción	55
Figura 31. Frente de absorción de agua	55
Figura 32. Medición de la profundidad de penetración	58
Figura 33. Fractura de las probetas	58
Figura 34. Medición de la penetración	58
Figura 35. Colorimetría probetas ACMT	59
Figura 36. Colorimetría probetas difusión natural	59
Figura 37. Esquema de las zonas de muestreo	64
Figura 38. Extracción de muestras para perfil de concentración	65
Figura 39. Agua absorbida vs Tiempo	67
Figura 40. Tiempo vs Profundidad de penetración	67
Figura 41. Corriente RCPT (6 horas)	69
Figura 42. Corriente ACMT (9 horas)	70
Figura 43. Corriente ACMT (2 horas)	70
Figura 44. Linealización a 30 días	72
Figura 45. Ajuste a la función exponencial a 30 días	72
Figura 46. Linealización a 45 días	73
Figura 47. Ajuste a la función exponencial a 45 días	73
Figura 48. Linealización a 60 días	74
Figura 49. Ajuste a la función exponencial a 60 días	74
Figura 50. Extrapolación polinomial a 30 días	76
Figura 51. Ajuste a la función error a 30 días	76
Figura 52. Extrapolación polinomial a 45 días	77
Figura 53. Ajuste a la función error a 45 días	77

		Pág.
Figura 54.	Extrapolación polinomial a 60 días	78
Figura 55.	Ajuste a la función error a 60 días	78

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.	Productos de hidratación del concreto	3
Tabla 2.	Reactivos	10
Tabla 3.	Diseño de mezcla para cada relación agua/cemento	11
Tabla 4.	Coeficiente de absorción, resistencia y porosidad	19
Tabla 5.	Penetrabilidad del ión cloruro basada en la carga pasada	20
Tabla 6.	Profundidad detectada por colorimetría	21
Tabla 7.	Profundidad y la constante de penetración K para cada relación agua/cemento	25
Tabla 8.	Composición del cemento	39
Tabla 9.	Gravedades específicas del agregado	45
Tabla 10.	Propiedades del agregado	45
Tabla 11.	Análisis granulométrico del agregado fino	45
Tabla 12.	Análisis granulométrico del agregado grueso	45
Tabla 13.	Equipos utilizados	47
Tabla 14.	Coeficientes a partir de la difusión natural	80
Tabla 15.	Coeficientes a partir de la migración acelerada	80

LISTA DE ANEXOS

	Pág.	
ANEXO A	Conceptos sobre la formación del concreto	35
ANEXO B	Cemento Portland Tipo I	38
ANEXO C	Composición del agua del acueducto de Bucaramanga	42
ANEXO D	Granulometría de los agregados	44
ANEXO E	Equipos	46
ANEXO F	Preparación de las probetas	48
ANEXO G	Pruebas de compresión	50
ANEXO H	Coefficiente de absorción	52
ANEXO I	Método colorimétrico	56
ANEXO J	Perfil de contenido de cloruros	60
ANEXO K	Curvas de absorción capilar	66
ANEXO L	Curvas de corriente vs tiempo	68
ANEXO M	Linealización y ajuste de la función exponencial	71
ANEXO N	Extrapolación y ajuste a la función error	75
ANEXO O	Coefficientes de difusión aparente	79

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN APARENTE DEL IÓN CLORURO EN CONCRETO EXPUESTO A AMBIENTES CON CLORUROS*

AUTORES: CLAUDIA LEÓN. SANDRA A. ORÓSTEGUI.**

PALABRAS CLAVES: Coeficiente, difusión, cloruro, migración, concreto

RESUMEN

Para determinar la relación entre el coeficiente de difusión en estado no estable y la relación agua/cemento, se han realizado ensayos experimentales siguiendo el procedimiento de la prueba de migración acelerada de cloruro (ACMT) y de la prueba de difusión natural (Bulk diffusion test). En la mezcla se usó cemento portland tipo I como aglutinante y se utilizaron relaciones agua/cemento de 0,4, 0,5 y 0,6. El perfil de cloruros fue medido después de 30, 45 y 60 días de inmersión. Además, el coeficiente de difusión fue calculado a partir de la segunda ley de Fick y de la segunda ley de Fick modificada basado en mediciones de la profundidad de penetración del ión cloruro por el método colorimétrico después del ensayo de la difusión natural y ACMT, respectivamente. Debido a que el ensayo de inmersión es relativamente lento (toma al menos un mes), la aplicación de campos eléctricos para acelerar el transporte iónico se utiliza para reducir el tiempo de experimentación. Los resultados muestran que los ensayos de migración en estado no estable presentan una buena correlación experimental con los obtenidos por difusión natural. En la difusión natural, el coeficiente de difusión obtenido por el método de perfil de concentración y el método colorimétrico se correlaciona linealmente. También se recomienda el uso del ensayo de migración acelerada de cloruros con fines comparativos.

* Proyecto de Grado

** Facultad Ingenierías Físicoquímicas. Escuela ingeniería Química. Director Custodio Vásquez Quintero.

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF APPARENT CHLORIDE DIFFUSION COEFFICIENT IN CONCRETE EXPOSED TO CHLORIDE ENVIRONMENTS*

AUTHORS: CLAUDIA LEÓN, SANDRA A. ORÓSTEGUI**

KEYWORDS: Diffusion, coefficient, chloride, migration, concrete

ABSTRACT

In order to determinate the relationship between non steady state chloride diffusion coefficient and water/cement ratio, experimental tests have been carried out following accelerated chloride migration test (ACMT) and bulk diffusion test procedure. The binder of mix was ordinary portland cement and 0,4, 0,5 and 0,6 water/cement ratios were used. The chloride profile was measured after 30, 45 and 60 days of immersion test. The diffusion coefficient was calculated by the Fick's second law and the modified Fick's second law based on measurements of the chloride penetration depth from colourimetric method after diffusion test and ACMT, respectively. Due to the immersion test is relatively slow (it takes at least one month), the application of electrical fields to accelerate ionic transport is used to reduce the experimentation time. The results shows that migration tests in non steady state give a good experimental correlation with the obtained from natural diffusion tests. In bulk diffusion test, the diffusion coefficient obtained from the profile method and colourimetric method is linearly correlated. Also, the accelerated chloride migration test is recommended with comparative purposes.

* Degree Project.

**Faculty of Physical-Chemical Engineerings. Department of Chemical Engineering. Director: M.Sc. Custodio Vásquez Quintero.

INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales de construcción artificiales más antiguo que se conoce caracterizándose por su durabilidad y estabilidad en el tiempo. Se utiliza para proteger el acero en las armaduras, actuando como una barrera física que lo separa del medio ambiente.¹

Las reacciones de hidratación del cemento (curado), inducen la formación de una capa protectora en la superficie del acero, provocada por la presencia de especies alcalinas, como son KOH, NaOH y Ca(OH)₂ que pasivan al elemento metálico y lo protegen químicamente. Si embargo, la interacción con el medio ambiente provoca que la protección se vea disminuida.²

A nivel mundial existen numerosas estructuras de concreto que se encuentran en medios particularmente agresivos, es el caso de las que se hallan expuestas a ambientes marinos donde el principal responsable de la corrosión es el ión cloruro. Al llegar a la superficie del metal, los cloruros provocan que la corrosión se desencadene y se manifieste de diversas maneras: una sobre el acero, con una disminución de su diámetro inicial y por lo tanto de su capacidad mecánica; otra sobre el concreto, debido a que al generarse acumulación de óxidos expansivos en la interface acero-concreto, provoca fisuras y desprendimientos; y por último sobre la adherencia del concreto.³

¹ MEJIA, Ruby. Durabilidad y corrosión en materiales cementicios. Colombia, 1999. p.1.

² BÖHNI, Hans. Corrosion in concrete reinforced structures. England, 2005. p.2.

³ CORDERO, Mariela. Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a la corrosión por cloruros. Barcelona, 2005. p.15.

Por estas razones es de vital importancia evaluar la velocidad de penetración del ión cloruro en concreto utilizando técnicas que proporcionen datos experimentales acordes con las condiciones del sistema a estudiar.

Actualmente distintos métodos y normas han establecido diferentes tipos de ensayo, tanto en condiciones de estado estable como no estable, que permiten establecer el coeficiente de difusión del ión cloruro en concreto.

En este trabajo se aplican tres de estas técnicas: Ensayo de resistencia a la penetración del ión cloruro (RCPT), normalizado por la ASTM C1202, el ensayo acelerado de migración de cloruros (ACMT) y por último el ensayo de inmersión o difusión natural, normalizado por la NT 443, simulando condiciones de salinidad marina, con el fin de obtener la relación entre los coeficientes de difusión y la relación agua/cemento (A/C) del concreto.

Adicionalmente se comparan los diferentes métodos con el fin de minimizar el tiempo de experimentación y dar una herramienta confiable para determinar el coeficiente de difusión aparente del ión cloruro. Este trabajo esta enmarcado dentro 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 PACÍFICO COLOMBIANO, llevado a cabo por la Universidad Industrial de Santander y la Universidad de Antioquia con el auspicio de Colciencias y la Armada Nacional.

1. CONCEPTOS TEÓRICOS

1.1 ASPECTOS GENERALES DEL CONCRETO

1.1.1 Concreto

El concreto es básicamente la mezcla del cemento portland con agregados finos (arena) y gruesos (grava). Al mezclarse con agua, el cemento se hidrata formando un conglomerado sólido, compacto, denso y poroso que resulta permeable a líquidos y gases.⁴ (Ver Anexo A)

1.1.2 Hidratación

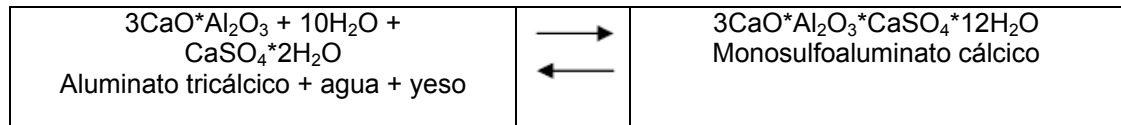
A las reacciones químicas que se llevan a cabo entre los componentes del cemento y el agua se les conoce con el nombre de hidratación. Los productos de hidratación del cemento poseen baja solubilidad en agua, como lo demuestra la estabilidad del concreto en contacto con el agua. (Ver Tabla 1).⁵

Tabla 1. Productos de hidratación del concreto

Componente		Productos de hidratación
$2(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2) + 6\text{H}_2\text{O}$ Silicato tricálcico(Torbemorita) + agua	\longrightarrow \longleftarrow	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$ Gel de tobermorita + hidróxido de Calcio
$2(2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2) + 4\text{H}_2\text{O}$ Silicato dicálcico + agua	\longrightarrow \longleftarrow	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ Gel de tobermorita + hidróxido de Calcio
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3 + 10\text{H}_2\text{O} + 2\text{Ca}(\text{OH})_2$ Ferrialuminato tetracálcico + agua + hidróxido de calcio(Portlandita)	\longrightarrow \longleftarrow	$6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ $\text{Ca}(\text{OH})_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Ferrialuminato tetracálcico hidratado
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ Aluminato tricálcico + agua + hidróxido de Calcio	\longrightarrow \longleftarrow	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}(\text{OH})_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Aluminato tricálcico hidratado

⁴ HERNÁNDEZ, Rodolfo. SUÁREZ, Sandra. Efecto del ión cloruro en el acero de refuerzo expuesto a soluciones simuladas de concreto. UIS, 1999.

⁵ DEL VALLE, A. PÉREZ, T. MARTÍNEZ, M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Sanfandila, 2001. p.32.



Fuente: Del Valle, Pérez, Martínez

1.1.3 Refuerzo

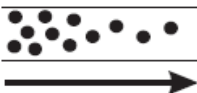
El componente metálico que proporciona resistencia a la tracción a la masa de concreto es acero de refuerzo o armadura. La alta alcalinidad del agua en los poros del concreto ($\text{pH} > 12.5$) conduce a la formación de una capa pasivante en el acero que reduce el ataque corrosivo a valores insignificantes. Los procesos más importantes que pueden destruir esta capa protectora son el ataque de cloruros y la carbonatación.⁶

La corrosión del refuerzo puede presentar diferentes formas, cambiando desde una extendida corrosión general hasta un ataque local. La corrosión debida a los iones cloruro presenta picaduras, distribuidas aleatoriamente a lo largo de las barras de acero.

1.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE EN CONCRETO



El transporte de gases (O_2 , CO_2), agua e iones (Cl^-) en concreto solo es posible en el sistema poroso del concreto. Este transporte se debe a fuerzas capilares, gradientes de presión (agua, gases) o de concentración (iones), diferencia de presión absoluta (agua, gases) y migración (ver Figura 1).⁷

Figura 1. Procesos de transporte en concreto

TIPO	FUERZA CONDUCTORA	POROS
Difusión (gases e iones)	 Gradiente de concentración dc Diferencia de presión parcial dp	Llenos con aire o agua

⁶ BÖHNI, Hans. Corrosion in reinforced concrete structures. Cambridge, 2005. p.1

⁷ BÖHNI, Hans. Corrosion in reinforced concrete structures. Cambridge, 2005. p.13.

Succión Capilar (líquidos)		Tensión de superficie s Ángulo de contacto α	Llenos con aire
Permeación (gases y líquidos)		Diferencia de presión absoluta dp	Llenos con aire o agua

Fuente: Bohni, Hans

1.3 CORROSIÓN INDUCIDA POR CLORUROS

La mayoría de modelos de vida útil asociados con la corrosión del acero de refuerzo en concreto siguen el modelo introducido por Tuutti (1982), donde se considera el mecanismo de corrosión como un proceso de dos etapas⁸:

1. Periodo de iniciación, durante el cual el acero permanece en un estado de pasivación. El inicio de la corrosión corresponde a la despasivación del refuerzo debido a la acumulación de iones cloruro en la capa del refuerzo de acero.
2. Periodo de propagación, durante el cual la estructura se deteriora como resultado de la pérdida de área transversal y la acumulación de productos de corrosión alrededor de la superficie de la barra.

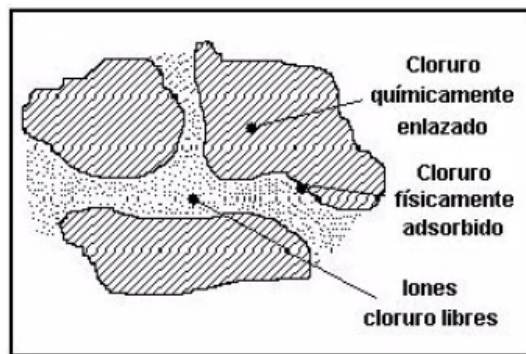
Los iones cloruro pueden estar incorporados en el concreto desde la mezcla de ingredientes en el momento de su fabricación (agregados, agua, acelerantes) o desde fuentes externas (sales de deshielo, agua de mar, agua subterránea). No todos los cloruros en el concreto están en movimiento, parte de estos iones son enlazados por los componentes del cemento, especialmente a los aluminatos, mediante mecanismos químicos (reacción) y físicos (adsorción)⁹, (Ver Figura 2).

⁸ MARTÍN, Beatriz. Service life modeling of R.C. highway structures exposed to chlorides. Toronto, 1999. p.8.

⁹ DEL VALLE, A. PÉREZ, T. MARTÍNEZ, M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Sanfandila, 2001. p.41.

Los componentes del concreto que reaccionan con el anión cloruro son el aluminato tricálcico y el ferritoaluminato tetracálcico, dando lugar a la formación de $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y de $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ respectivamente, compuestos conocidos comúnmente como Sales de Friedel, adicionalmente puede formarse etringita $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 32\text{H}_2\text{O}$. Se considera que solamente los iones cloruro en estado libre, pueden llegar a desencadenar un fenómeno corrosivo sobre la armadura del concreto¹⁰.

Figura 2. Cloruros en el sistema poroso del concreto



Fuente: Del Valle, Pérez, Martínez

En la corrosión inducida por cloruros, la duración del periodo de iniciación depende la tasa de penetración de los iones cloruro en el concreto, la profundidad de la cubierta de concreto, así como la concentración de cloruros requerida para iniciar el proceso de corrosión.

1.4 DIFUSIÓN DEL IÓN CLORURO

Considerando el concreto en estado de saturación, los iones cloruro entran en el concreto por difusión debido a la existencia de un gradiente de concentración entre la superficie expuesta y la solución poro del concreto.

¹⁰ BÖHNI, Hans. Corrosion in reinforced concrete structures. Cambridge, 2005. p.26.

En condiciones de estado no estacionario, este proceso se describe matemáticamente con la Segunda Ley de Fick de difusión, que se ajusta en alto grado a la realidad práctica del concreto, y para un flujo dimensional esta dada por:

$$\frac{dC}{dt} = D \left(\frac{d^2C}{dx^2} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde D es el coeficiente de difusión (m^2/s), y C es la concentración de cloruros disueltos en la solución poro (mol/m^3 de solución poro).

1.5 COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

Evidencia experimental ha mostrado que la velocidad de difusión de cloruro en concreto, esta definida por el coeficiente de difusión de cloruro D_{Cl} , que depende de parámetros internos del material como la porosidad, tipo de cemento, temperatura, tipos de cationes asociados con los iones cloruro, contenido de mezcla y condiciones de curado¹¹.

1.5.1 Coeficiente de difusión aparente del ión cloruro (D_{ap})

Se obtiene usando la concentración de cloruro en la superficie del concreto en el ambiente dado y ajustando una función a los perfiles de cloruro encontrados bajo condiciones ambientales reales (NT BUILD 443).

El coeficiente de difusión aparente:

- No es un parámetro del material, pero debe ser considerado como un coeficiente de regresión que cuantifica la permeabilidad de un concreto específico bajo condiciones ambientales establecidas.
- Es una medida de la permeabilidad (porosidad, la distribución y conectividad de los poros) del concreto con respecto a los cloruros en el tiempo de experimentación bajo condiciones de saturación.

¹¹ BÖHNI, Hans. Corrosion in reinforced concrete structures. Cambridge, 2005. p.101.

- Se reduce con el tiempo debido a la hidratación.
- Aumenta con el incremento de la temperatura en una forma exponencial¹².
- Tiene en cuenta la velocidad de ingreso y en consecuencia la caída en el coeficiente de difusión en varios ordenes de magnitud para bajos grados de saturación de agua del concreto.

¹² T.S. NGUYEN, S. LORENTE, M. CARCASSES. Effect of the environment temperature on the chloride diffusion through CEM-I and CEM-V mortars: An experimental study. En: Construction and Building Materials Vol.23, 2009. p.795–803.

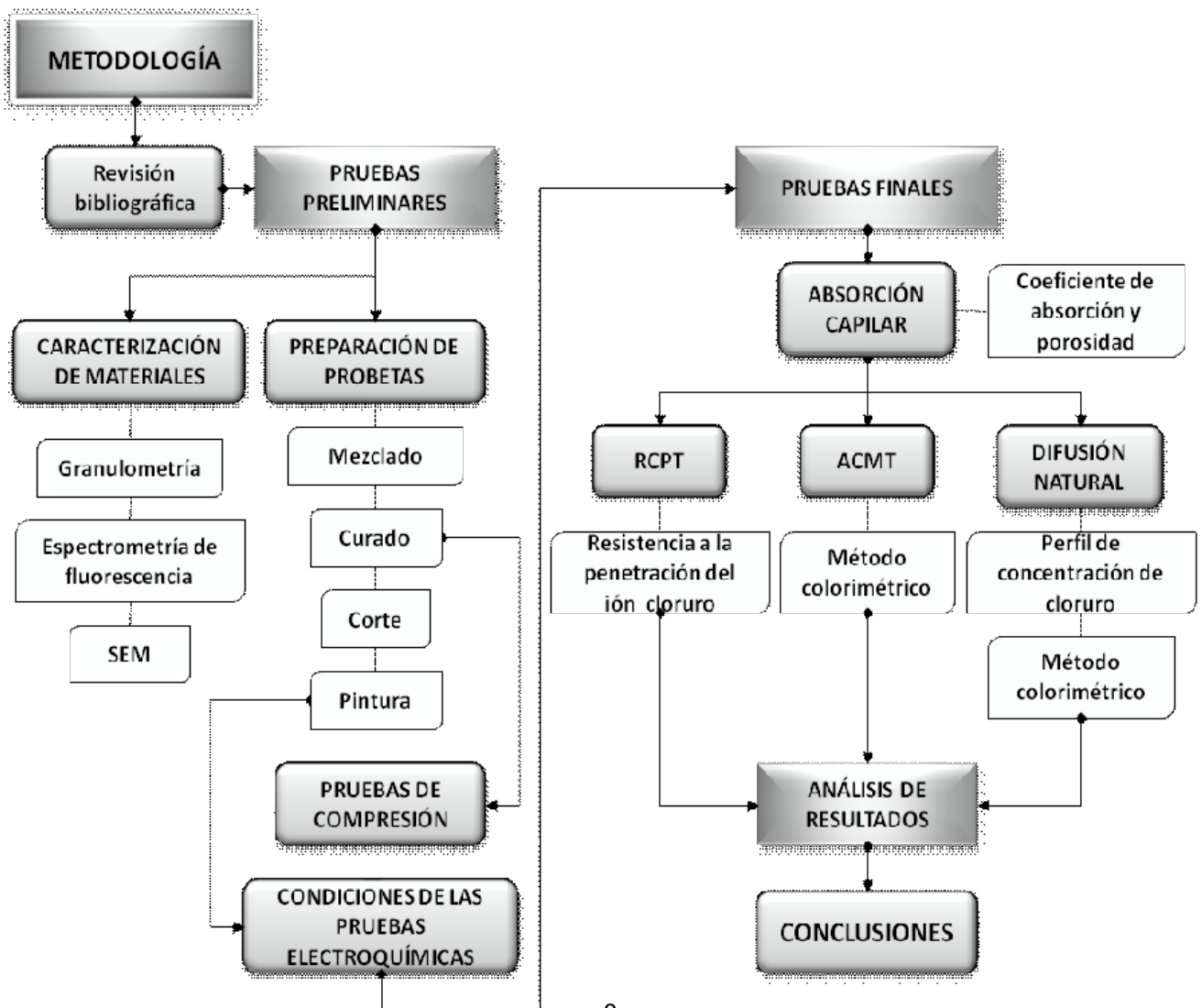
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe la metodología seguida para el desarrollo de esta investigación, así como los materiales y equipos usados en cada etapa.

2.1 METODOLOGÍA

En la Figura 3 se muestra el diagrama de la secuencia utilizada en la realización de este trabajo de grado.

Figura 3. Metodología



2.2 PRUEBAS PRELIMINARES

2.2.1 Caracterización de materiales

- **Cemento:** A través de la técnica de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X por Energía Dispersa, se determinó la composición del cemento portland Tipo I utilizado en la preparación de las probetas, la cual se muestra en el Anexo B.
- **Agua:** El agua usada en la preparación de las probetas fue suministrada por el acueducto de Bucaramanga con un contenido de cloruro de 2.83 mg/L (Ver Anexo C). En los ensayos electroquímicos se usó agua destilada.
- **Agregados:** En la fabricación de las probetas de concreto se utilizó arena como agregado fino, y gravilla como agregado grueso. El tamaño de partícula usado para el agregado grueso se muestra en el Anexo D.
- **Reactivos:** En la Tabla 2 se muestran los principales reactivos.

Tabla 2. Reactivos

REACTIVO	CARACTERÍSTICA
NaCl	3%
NaOH	0.3 M
Sal de mar	$58.46 \pm 0.35\% \text{Cl}^-$
AgNO ₃	0.1 N
Agua destilada	

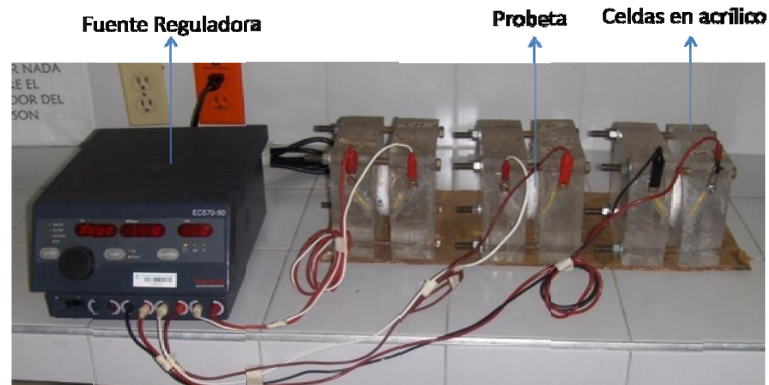
2.2.2 Equipos

Las Figuras 4 y 5 presentan los principales equipos empleados en este trabajo, en el Anexo E se encuentra una lista detallada de todos los equipos.

Figura 4. Equipo de vacío



Figura 5. Equipo para pruebas electroquímicas



2.2.3 Preparación de probetas de concreto

En este estudio, las probetas fueron hechas con cemento portland tipo I, agua, arena y gravilla (Ver anexo F). Las proporciones en las probetas se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Diseño de mezcla para cada relación agua/cemento

A/C	Unidad de contenido (kg/m ³)			
	AGUA	CEMENTO	ARENA	GRAVILLA
0.4	210	525	787	848
0.5	262.5	525	787	848
0.6	315	525	787	848

Verificado y corregido experimentalmente el diseño de mezcla, se procedió al moldeo de las probetas, adaptando la norma ASTM 192 a sus características dimensionales. Llenados los moldes se almacenaron según el procedimiento indicado en la norma ASTM C33; luego de 24 horas se desmoldaron las probetas. Posteriormente se introdujeron las probetas en tinas de 80 litros de capacidad para su correspondiente curado. Después de 28 días se retiraron las muestras, ubicándolas en un lugar a temperatura ambiente según las especificaciones de la norma ASTM C511.

2.2.4 Pruebas de compresión

Este método de prueba consiste en aplicar una carga de compresión axial a cilindros moldeados de concreto, a una tasa predeterminada, hasta que la falla ocurre. La resistencia a la compresión de la probeta fue calculada al dividir la carga máxima lograda durante la prueba entre el área que resiste la carga¹³. El concreto de uso generalizado tiene una resistencia a la compresión entre 3000 y 5000 lb/pulg². (Ver Anexo G)

2.2.5 Condiciones de las pruebas electroquímicas

Debido a que el coeficiente de difusión aparente se ve afectado por varios fenómenos, en este trabajo permanecen constantes las siguientes condiciones:

- Tiempo de curado: 28 días
- Humedad relativa: 100%
- Temperatura: 22-25°C
- Concentraciones para colorimetría: $C_o = 0.52N$, y $C = 0.07N$.¹⁴

2.3 EXPERIMENTACIÓN

2.3.1 Absorción de agua

Fagerlund describe la cinética de absorción de agua a través de tres coeficientes: m , K , ϵ_e .¹⁵ El método normalizado consiste en colocar las muestras sobre una esponja saturada de agua en un recipiente cubierto (Ver Anexo H). El nivel de agua debe estar 3 mm por encima de la cara inferior de la probeta. A intervalos de tiempo se registra el cambio de peso¹⁶. La cantidad de agua absorbida, W_a , en función del tiempo es:

¹³ Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39 / C39M – 05e2

¹⁴ Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments, NT BUILD 492. Finland, 1999.

¹⁵ SANJUÁN, Miguel. Cálculo del periodo de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón. Madrid, 1992. p.111.

¹⁶ MEJIA, Ruby. Durabilidad y corrosión en materiales cementicios. Colombia, 1999. p.128.

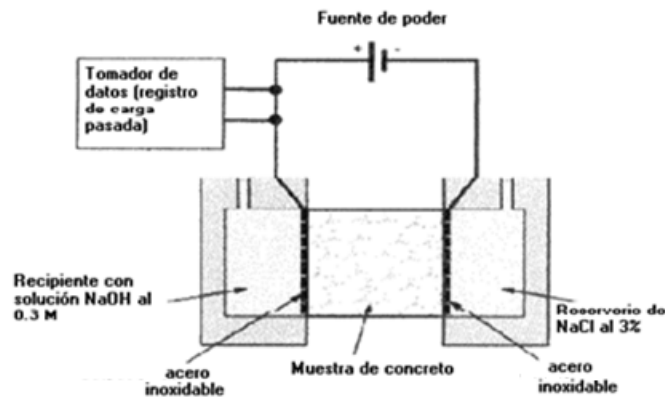
$$W_a = \rho \varepsilon_e \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{m}}; K = \frac{\rho}{\sqrt{m}} \varepsilon_e \quad \text{Ecuaciones 2 y 3}$$

Donde ρ es la densidad (kg/m^3), ε_e la porosidad efectiva (m^3/m^3), m la resistencia a la penetración del agua (s/m^2) y K el coeficiente de absorción capilar ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$).

2.3.2 Ensayo de resistencia a la penetración del ión cloruro (RCPT)

Este método consiste en monitorear la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de una probeta cilíndrica de 5 cm de espesor y 7.5 cm de diámetro nominal durante un periodo de 6 horas. Se mantiene una diferencia de potencial de 60 V entre los extremos de la probeta, uno de los cuales esta inmerso en una solución de cloruro de sodio al 3% y el otro en una solución de hidróxido de sodio 0.3N.¹⁷

Figura 6. Esquema RCPT



Fuente: Lizarazo, Juan

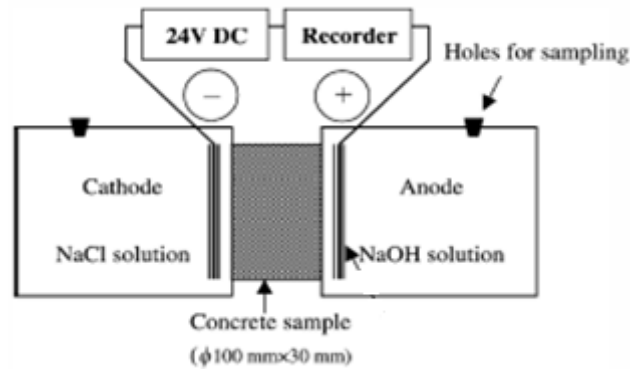
2.3.3 Prueba de migración acelerada del ión cloruro (ACMT)

Esta prueba es una versión modificada del método RCPT y se muestra esquemáticamente en la Figura 7. Este método consiste en acelerar la migración del ión cloruro en probetas de concreto de 3 cm de espesor y 7.5 cm de diámetro

¹⁷ Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM C 1202-97, USA, 1997.

nominal, bajo la aplicación de una diferencia de potencial de 24 V, durante 2 horas.¹⁸

Figura 7. Esquema ACMT



Fuente: Yang, Cho

2.3.3.1 Método colorimétrico

Después de fracturar las probetas, se aplica una solución acuosa de nitrato de plata ($0.1N AgNO_3$) de forma similar a la descrita en la norma NT BUILD 492. Los cloruros se enlazan con la plata formando cloruro de plata, una sustancia blanquecina. En ausencia de cloruros, la plata se adhiere al hidróxido presente en el concreto, presentando un color pardo. La profundidad de penetración de cloruro x , se determina midiendo la parte visible de la precipitación blanca del cloruro de plata [9]. El coeficiente de migración en estado no estable (D_{mcol}) se calcula a partir de la segunda ley de Fick modificada¹⁹:

$$D_{mcol} = \frac{1}{a} \left(\frac{x - \alpha \sqrt{x}}{t} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde $\alpha = 2 \sqrt{\frac{1}{a}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \left(\frac{2C}{C_0} \right) \right)$, $a = |z|FE/RT$.

¹⁸ C.C. YANG, S.W. CHO. An electrochemical method for accelerated migration test of diffusion coefficient in cement-based materials. En: Materials Chemistry and Physics Vol. 81, 2003 p.116-125.

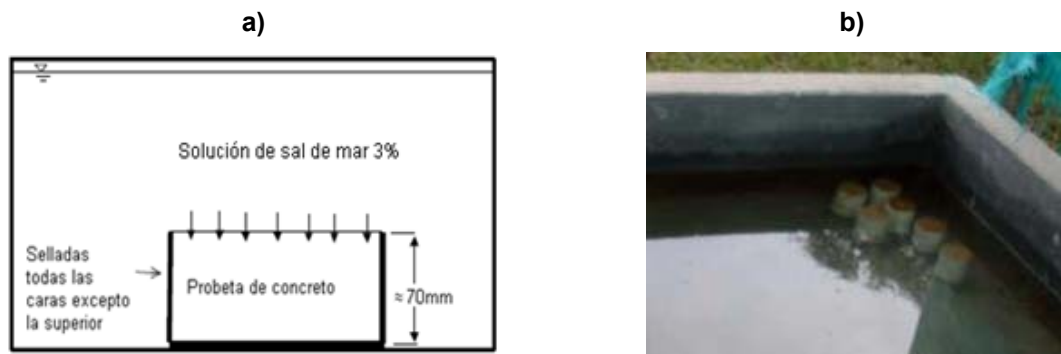
¹⁹ TANG, L., NILSSON, L. O. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field'. En: ACI Materials Journal. 1992. p.49-53.

Donde C_0 es la concentración de cloruro en el cátodo, y C es la concentración en la solución poro correspondiente al límite de cambio de color²⁰. (Ver Anexo I)

2.3.4 Difusión natural

Este método consiste en sumergir probetas previamente cubiertas con pintura epóxica en una solución de sal de mar, como se muestra en la Figura 8, siguiendo un procedimiento similar al de la norma NT BUILD 443.²¹

Figura 8. Celda de inmersión a) Esquema, b) Lugar de inmersión



Fuente: NT BUILD 443

2.3.4.1 Perfil de concentración de cloruros

Para obtener los perfiles de concentración de cloruros en las probetas, se tomaron muestras cada 10 mm de espesor desde la superficie expuesta hacia el interior. Las muestras de polvo fueron analizadas para determinar el contenido total de cloruro por espectrofotometría de absorción atómica de llama de acuerdo con la norma AASHTO T260.²² (Ver Anexo J)

²⁰ C.T. CHIANG, C.C. YANG. Relation between the diffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test. En: Materials Chemistry and Physics. Vol.106. 2007 p.240–246.

²¹ Concrete hardened: accelerated chloride penetration. NT BUILD 443, 1995.

²² Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials, AASHTO T260-97. USA, 1997.

- **Ajuste del perfil de concentración a la función exponencial**

El contenido de cloruro se expresa como un porcentaje de la masa de muestra seca y la profundidad es el punto medio de cada sección de la probeta expuesta a la solución de cloruro²³. La difusión de cloruro en concreto esta controlada por la segunda ley de difusión de Fick, cuya solución es:

$$C = \frac{m}{\sqrt{\pi D_{nexp} t}} \exp\left(\frac{-x^2}{4D_{nexp} t}\right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde C es la concentración de iones cloruro como una función de la distancia, en cualquier tiempo t , m es la masa difusiva y D_{nexp} es el coeficiente de difusión aparente del ensayo natural a partir la función exponencial.

Mediante la linealización de la Ecuación 5, se determina el coeficiente de difusión aparente.

- **Ajuste del perfil de concentración a la función error**

La difusión de cloruro en concreto esta controlada por la segunda ley de difusión de Fick de donde se obtiene:

$$C = C_0 \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_{ner} t}}\right) \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde C es la concentración de iones cloruro como una función de la distancia, en cualquier tiempo t , $\operatorname{erf}(y)$ es la función error y D_{ner} es el coeficiente de difusión aparente del ensayo natural a partir la función error.

2.3.4.2 Método colorimétrico

La profundidad de penetración detectada por la solución 0.1N de AgNO_3 puede usarse para determinar el coeficiente de difusión del ión cloruro despejando de la Ecuación 6:

$$D_{ncol} = \left[x / \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \left(\frac{C}{C_0}\right)\right) \right]^2 / 4t \quad \text{Ecuación 7}$$

²³ C.T. CHIANG, C.C. YANG. Relation between the diffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test. En: Materials Chemistry and Physics. Vol.106. 2007 p.240–246.

Donde D_{ncol} es el coeficiente de difusión aparente del ensayo de difusión natural a partir del método colorimétrico, y se expresa usando la profundidad x dada por colorimetría. Donde $erf^{-1}(y)$ es la inversa de la función error, C_0 es la concentración de cloruro en la superficie expuesta de la probeta, y C es la concentración de cloruro en la solución poro correspondiente al límite de cambio de color.

- **Velocidad de avance de los cloruros**

La velocidad de avance de los cloruros es, en general, una función de la raíz cuadrada del tiempo, ya que los procesos de difusión pura así como los de absorción capilar, siguen una ley potencial.

$$x_{cl} = K_{cl}\sqrt{t} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde x_{cl} es la profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros, t el tiempo y K_{cl} la constante.²⁴

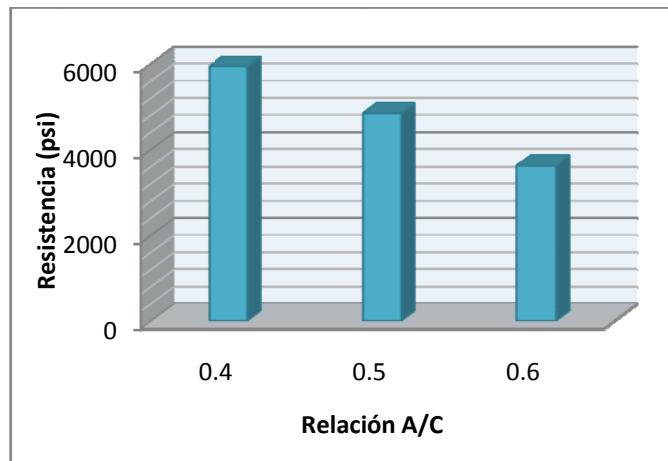
²⁴ DEL VALLE, A. PÉREZ, T. MARTÍNEZ, M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Sanfandila, 2001. p.44.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 PRUEBAS DE COMPRESIÓN

En la Figura 9 se muestran los resultados de las pruebas de compresión como un promedio de tres probetas por cada relación agua/cemento.

Figura 9. Resultados de las pruebas de compresión



De acuerdo a los resultados, las probetas se encuentran en el rango de resistencia a la compresión para concreto de uso generalizado (3000-5000 psi) y cumplen con los requerimientos para las pruebas electroquímicas.

Los principales factores que afectan la resistencia a la compresión son la relación A/C, el tiempo y el grado de hidratación²⁵. De acuerdo con lo anterior, a medida que la relación agua/cemento aumenta, la resistencia a la compresión disminuye debido al incremento en el contenido de agua. El alto contenido de agua produce una red de porosidad mayor.

²⁵ Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39 / C39M – 05e2

3.2 ABSORCIÓN CAPILAR

En la Figura 10 se muestra la cantidad de agua absorbida en función del tiempo $W_a = K\sqrt{t}$ y la relación entre el tiempo y la penetración de agua z , de las que se obtuvieron los coeficientes K , ε_e y m , que se muestran en la Tabla 4.

Figura 10. Absorción capilar a) W_a vs $t^{1/2}$ b) t vs z^2

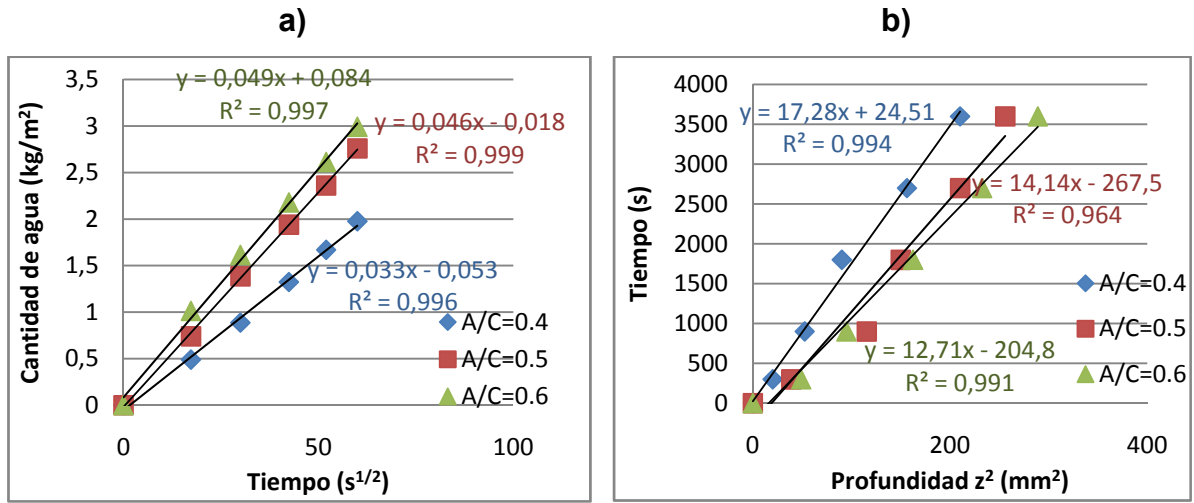


Tabla 4. Coeficiente de absorción, resistencia y porosidad

RELACIÓN A/C	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR	RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL AGUA	POROSIDAD EFECTIVA
	K ($kg/m^2 s^{1/2}$)	m ($\times 10^7 s/m^2$)	ε (%)
0.4	0.033	1.73	13.72
0.5	0.046	1.41	17.29
0.6	0.049	1.27	17.46

Teniendo en cuenta que la resistencia a la penetración del agua se considera como una función de la estructura del poro²⁶, el concreto con relación A/C=0.4 presenta poros más finos en comparación con los de 0.5 y 0.6, y por lo tanto una penetración más lenta. El coeficiente de absorción capilar aumenta con el incremento en la relación A/C, mostrando una clara dependencia de la porosidad

²⁶ MEJIA, Ruby. Durabilidad y corrosión en materiales cementicios. Colombia, 1999. p.129.

total, que presenta una tendencia similar (Ver Anexo K). Los valores encontrados de porosidad concuerdan con resultados de Djerbi et al²⁷, para concreto ordinario (OC).

3.3 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL IÓN CLORURO

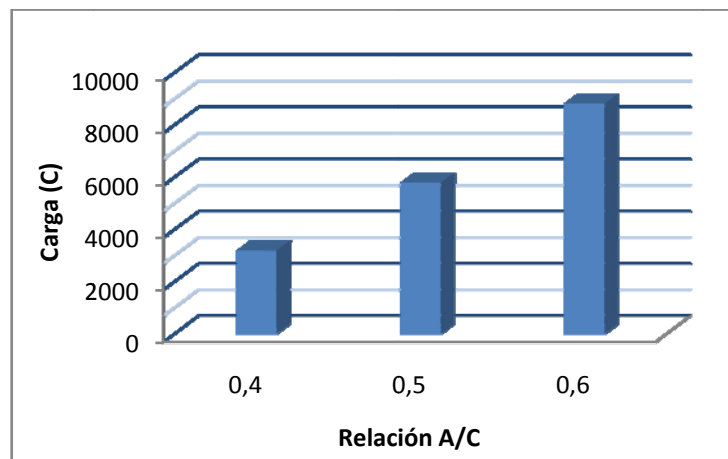
El RCPT es un ensayo cualitativo, que relaciona la carga pasada con la resistencia a la penetrabilidad del ión cloruro como lo indica la Tabla 5. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 11.

Tabla 5. Penetrabilidad del ión cloruro basada en la carga pasada

CARGA (C)	PENETRABILIDAD DEL ION Cl ⁻
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baja
100-1000	Muy baja
<100	Despreciable

Fuente: ASTM 1202

Figura 11. Carga vs Relación agua/cemento



²⁷ DJERBI, BONNET, KHELIDJ, BAROGHEL-BOUNY. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete. En: Cement and Concrete Research Vol.38, 2008. p.877-883.

Los resultados muestran que las probetas con relación agua/cemento igual a 0.4 tienen una resistencia moderada a la penetración del ión cloruro, mientras que para las probetas de relaciones 0.5 y 0.6 la tendencia a la penetración es alta. La baja resistencia a la penetración de las probetas con relaciones A/C mayores, concuerda con los datos de resistencia a la compresión, donde la relación A/C=0.4 presentó una resistencia mayor y por ende menor grado de penetrabilidad. Por lo tanto se espera que el coeficiente de difusión sea menor para relaciones agua/cemento bajas. (Ver Anexo L)

3.4 PRUEBA DE MIGRACIÓN ACELERADA DEL IÓN CLORURO

En la Tabla 6 se muestran las profundidades determinadas por colorimetría para el ensayo de migración acelerada.

Tabla 6. Profundidad detectada por colorimetría

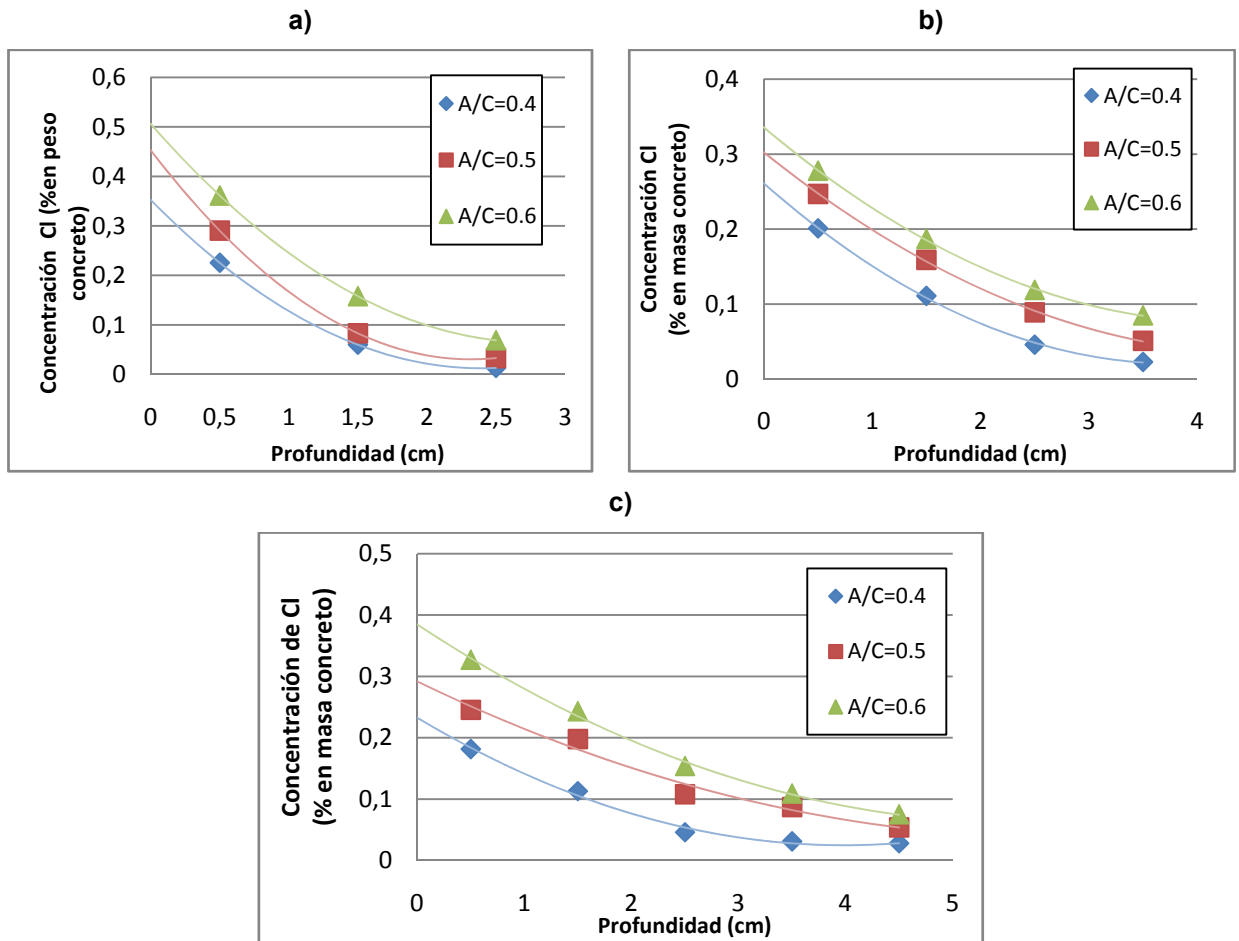
A/C	PROFUNDIDAD (cm)	DESV. ESTANDAR
0.4	1.07	±0.06
0.5	1.93	±0.05
0.6	2.23	±0.11

Las profundidades encontradas presentan una tendencia similar a la predicha por el ensayo RCPT, ya que para mayores relaciones A/C la penetración del ión cloruro es mayor.

3.5 DIFUSIÓN NATURAL

A partir el ensayo no acelerado o de difusión natural, se obtuvieron los perfiles de concentración de cloruros para las diferentes relaciones agua/cemento, con el fin de ajustarlos a la función exponencial y a la función error. Los perfiles de concentración a 30, 45 y 60 días se muestran en la Figura 12.

Figura 12. Perfiles de concentración a) 30 días, b) 45 días, c) 60 días



Los perfiles de concentración obtenidos muestran que el contenido de cloruro en las probetas presenta una ligera disminución con el tiempo de exposición, mientras que la penetración aumenta. Esto puede atribuirse a una disminución en los sitios activos de los poros, ya que baja la capacidad de enlace de cloruros. Este comportamiento también puede ser causado por el taponamiento de los conductos capilares del concreto.^{28,29} Tamimi et al³⁰, presenta perfiles de concentración de cloruros para lapsos mayores de tiempo, en los que se aprecia un aumento moderado del contenido de cloruros en el tiempo de exposición.

²⁸ BÖHNI, Hans. Corrosion in reinforced concrete structures. Cambridge, 2005. p.91.

²⁹ YUAN, SHI, SCHUTTER, AUDENAERT, DENG. Chloride binding of cement-based materials subjected to a external chloride environment – A review. En: Constructions and Building Materials Vol.23. 2009 p.1-13.

³⁰ TAMIMI, ABDALLA, SAKKA. Prediction of long term chloride diffusion of concrete in harsh environment. En: Construction and Building Materials Vol.22, 2008. p.829-836.

3.5.1 Ajuste a la función exponencial

La linealización de la Ecuación 6 da como resultado la Ecuación 9:

$$\ln C = \ln \frac{m}{\sqrt{\pi D_{nexp} t}} - \frac{x^2}{4D_{nexp} t} \quad \text{Ecuación 9}$$

Graficando $\ln C$ contra x^2 se obtiene el valor del coeficiente de difusión aparente de ión cloruro y la concentración en la superficie en $x = 0$. En la Figura 13 se muestra la linealización del perfil a 60 días de exposición y la Figura 14 presenta la función exponencial para cada relación agua/cemento. De igual forma, se ajustaron los perfiles de concentración a 30 y 45 días. (Ver Anexo M)

Figura 13. Linealización a 60 días

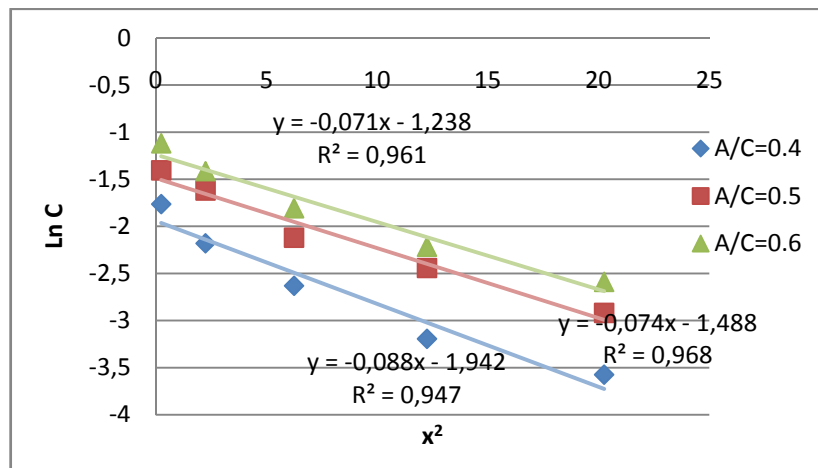
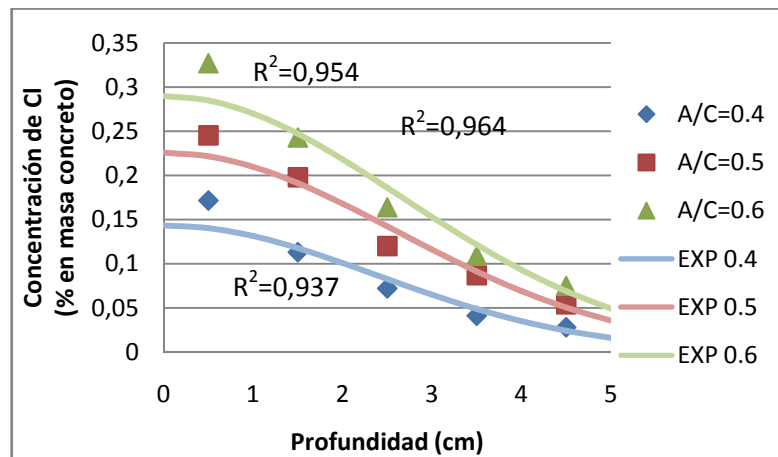


Figura 14. Ajuste de la función exponencial al perfil de 60 días



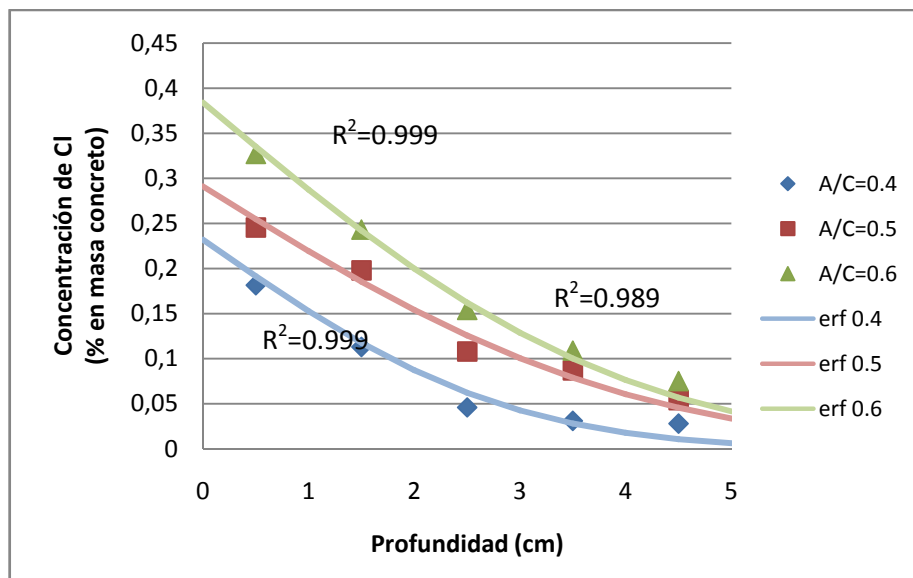
Aunque este método fue planteado por Climent et al³¹, para concreto insaturado, los coeficientes de determinación múltiple R^2 para cada una de las curvas indican que la función exponencial ofrece un buen ajuste a los perfiles de concentración.

3.5.2 Ajuste a la función error

La Ecuación 6 se ajusta a los perfiles fijando la concentración superficial C_0 por extrapolación polinómica y dejando variar el coeficiente de difusión aparente D_{ner} , hasta que su valor corresponde a la curva de mejor coeficiente R^2 .

La Figura 15 muestra el perfil a 60 días de inmersión con las respectivas curvas de ajuste. Estas curvas presentan un mejor ajuste a los perfiles de concentración, comparadas con las de la función exponencial, por lo tanto la difusión natural puede describirse por la segunda ley de Fick. De igual forma, se ajustaron los perfiles de concentración a 30 y 45 días. (Ver Anexo N)

Figura 15. Ajuste de la función error al perfil de 60 días



³¹ CLIMENT, DE VERA, LOPEZ, VIQUEIRA, ANDRADE. A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete. Part I. The instantaneous plane source diffusion case. En: Cement and Concrete Research Vol.32. 2002. p.1113-1123

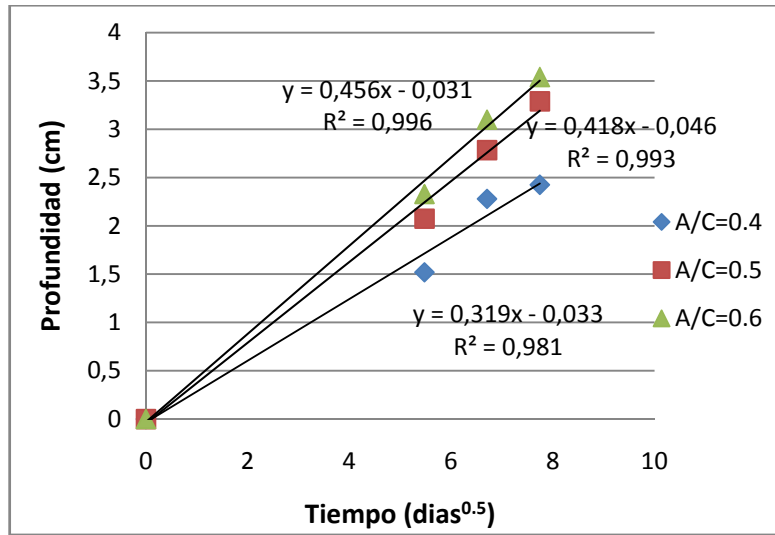
3.5.3 Método colorimétrico

Mediante colorimetría se determinaron las profundidades alcanzadas por los cloruros a 30, 45 y 60 días. En la tabla 7 se muestran los datos de profundidad junto con la constante de penetración del ión cloruro en concreto.

Tabla 7. Profundidad y la constante de penetración K para cada relación agua/cemento

Tiempo A/C	30 días	45 días	60 días	K (cm/ $\sqrt{\text{día}}$)
0.4	1.52±0.18	2.28±0.04	2.42±0.21	0.319
0.5	2.08±0.07	2.78±0.03	3.29±0.14	0.418
0.6	2.33±0.16	3.10±0.04	3.54±0.04	0.456

Figura 16. Profundidad de penetración vs Tiempo



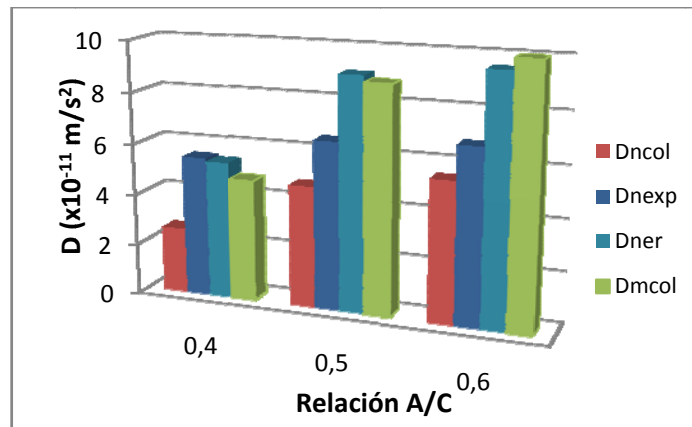
De la Figura 16, se tiene que la constante de penetración aumenta con el aumento en la relación agua/cemento, mostrando una coherencia con los perfiles de concentración, en los que se detecta un contenido de cloruros mayor para la A/C=0.6.

3.6 COMPARACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DIFUSIÓN

3.6.1 Comparación de los coeficientes con la relación agua/cemento

La variación de los coeficientes de difusión respecto a la relación agua/cemento para 60 días se muestran en la Figura 17. (Ver Anexo O)

Figura 17. Coeficientes de difusión por relación agua/cemento



Experimentalmente se determinó que los coeficientes de difusión aumentan a medida que aumenta la relación agua/cemento. Esto concuerda con observaciones de Chiang et al³², Andrade et al³³ y Song et al³⁴, en las que se atribuye este incremento a la formación de trayectorias de difusión debido al aumento en la porosidad que produce una mayor cantidad de agua en el concreto. Aunque los coeficientes de difusión y se determinaron a partir de los perfiles de concentración, su diferencia se debe a que los valores de concentración superficial, hallados por extrapolación, para la función error son más altos que los presentados por la función exponencial.

³² C.T. CHIANG, C.C. YANG. Relation between the diffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test. En: Materials Chemistry and Physics Vol.106. 2007 p.240-246

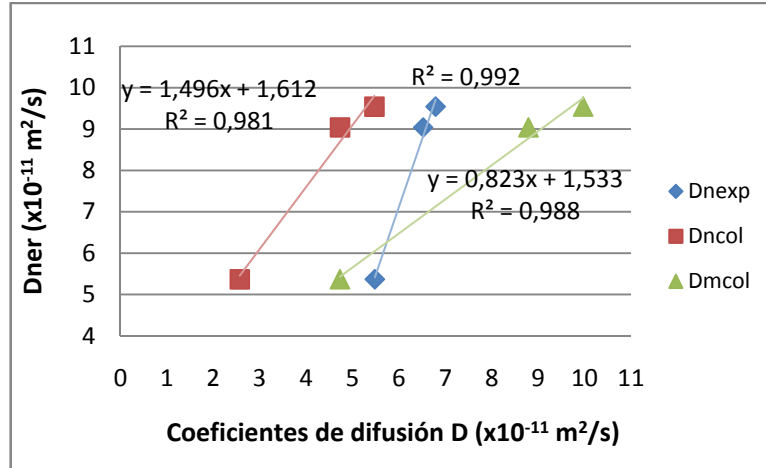
³³ ANDRADE, CASTELLOTE, ALONSO, GONZALES. Non-steady-state chloride diffusion coefficients from migration and natural diffusion test. Part I: Comparison between several methods or calculation. En: Material and structures Vol.33. 2000 p.21-28.

³⁴ SONG, Ha-Won. LEE, Chang-Hong. YONG, Ki. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. Cement and Concrete Composites Vol.30. 2008 p.113-121.

3.6.2 Comparación de los métodos experimentales

Los coeficientes de difusión aparente determinados experimentalmente (Figura 18) se comparan con los coeficientes dados por el ajuste a la función error, debido a que este método es el que presentó el mejor R^2 .

Figura 18. Comparación de los coeficientes de difusión



Los datos que se muestran son el resultado de los cálculos para 60 días debido a que este ensayo puede representar mejor el comportamiento del cloruro en largos tiempos de exposición. La importancia del método colorimétrico radica en su sencillez en el momento de medir la profundidad de penetración, adicionalmente, el método de migración de cloruros es mucho más rápido que los métodos de inmersión, por tal razón en este trabajo se obtuvieron correlaciones empíricas entre los coeficientes de difusión por ajuste al perfil de concentración y los obtenidos por colorimetría en difusión natural y migración.

La relación empírica calculada por regresión lineal entre D_{ner} y D_{ncol} es:

$$D_{ner} = 1,496D_{ncol} + 1,612 \times 10^{-11} \quad \text{Ecuación 10}$$

La relación empírica calculada por regresión lineal entre D_{ner} y D_{mcol} es:

$$D_{ner} = 0,823D_{mcol} + 1,533 \times 10^{-11} \quad \text{Ecuación 11}$$

De las relaciones encontradas, la Ecuación 11 tiene un especial uso, ya que reduce el tiempo de experimentación de meses a horas, proporcionando una aproximación al coeficiente de difusión aparente por difusión natural.

Aunque se realizaron ensayos de difusión natural a 30, 45 y 60 días, no es conveniente presentar una función del coeficiente de difusión en el tiempo ya que estos intervalos de tiempo no son comparables con la vida útil de una estructura de concreto. Sin embargo, varios investigadores^{35,36,37,38} coinciden en afirmar que el coeficiente de difusión aparente disminuye con el tiempo de acuerdo a una función exponencial.

³⁵ BÖHNI, Hans. Corrosion in reinforced concrete structures. Cambridge, 2005. p.108.

³⁶ HONG, ZHAO, WITTMANN. Carbonation and chloride profiles of reinforced concrete after 26 years of exposure. En: International conference on pozzolan. Thailand, 2006.

³⁷ TANG, L. GULIKERS, J. On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete. De: Cement and Concrete Research Vol.37. 2007 p.589-595.

³⁸ NOKKEN, BODDY, HOOTON, THOMAS. Time dependent diffusion in concrete – three laboratory studies. En: Cement and Concrete Research Vol.36. 2006 p.200-207.

CONCLUSIONES

- La importancia de la relación agua/cemento (A/C) radica en que una pasta de cemento con poco contenido de agua presenta una mejor compactación, porque tiene menos cantidad de poros interconectados, permeables a líquidos y gases, donde pueda presentarse humedad. De esta manera el concreto finalmente obtenido es menos poroso y menos permeable lo que reduce la difusión de iones que pueden iniciar el proceso de corrosión.
- Los coeficientes de difusión aparente muestran una marcada influencia de la relación agua/cemento, presentando un aumento de acuerdo al incremento de agua en la mezcla de concreto debido a que esta produce una mayor cantidad de poros y trayectorias para la difusión del ión cloruro.
- Los coeficientes de difusión aparente obtenidos de los ensayos de difusión natural por colorimetría, presentan una buena correlación experimental (Ecuación 10) proporcionando una herramienta confiable y de fácil acceso para determinar la profundidad de penetración del ión cloruro y a su vez el coeficiente de difusión.
- El ensayo de migración acelerada del ión cloruro (ACMT) reduce el tiempo de experimentación, bajo condiciones de estado no estacionario. Para aprovechar esta ventaja, la correlación experimental dada por la Ecuación 11 puede usarse para relacionar el coeficiente de difusión aparente obtenido por migración con el coeficiente obtenido por inmersión, reproduciendo las condiciones del ensayo electroquímico.

RECOMENDACIONES

- Los procesos de difusión en concreto demandan gran cantidad de tiempo debido a la baja velocidad de penetración de los agentes agresivos, por esta razón se recomienda continuar con los ensayos de difusión natural para obtener una función que describa el comportamiento del coeficiente de difusión aparente en el tiempo.
- Se recomienda realizar la medición de la concentración de ión cloruro en las celdas electroquímicas para obtener una perspectiva más amplia acerca del fenómeno de migración en condiciones estacionarias.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials, AASHTO T 260-97. AASHTO USA, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Specification for Portland Cement ASTM C150 -07. Philadelphia, USA, 2007.

_____. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39 / C39M – 05e2. ASTM USA, 2005

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

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

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

ANDRADE, CASTELLOTE, ALONSO, GONZALES. Non-steady-state chloride diffusion coefficients from migration and natural diffusion test. Part I: Comparison between several methods or calculation. Material and structures 33 (2000) 21-28

ANDRADE, SANJUAN, RECUERO. Calculation of chloride diffusivity in concrete from migration experiments, in non steady-state conditions. Cement and Concrete Research 24 (1994) 1214-1228

BÖHNI, Hans. Corrosion in reinforced concrete structures. Woodhead Publishing Ltd y CRC Press, Cambridge, 2005.

C.C. YANG, S.W. CHO. An electrochemical method for accelerated migration test of diffusion coefficient in cement-based materials. *Materials Chemistry and Physics* 81 (2003) 116-125

CLIMENT, DE VERA, LOPEZ, VIQUEIRA, ANDRADE. A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete. Part I. The instantaneous plane source diffusion case. *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1113-1123

C.T. CHIANG, C.C. YANG. Relation between the diffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test. *Materials Chemistry and Physics* 106 (2007) 240–246

CORDERO, Mariela. Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a la corrosión por cloruros. Universitat Politècnica de Catalunya Department d'Enginyeria de la Construcció. Barcelona, 2005.

DEL VALLE, A. PÉREZ, T. MARTÍNEZ, M. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Instituto Mexicano del transporte. Sanfandila, 2001.

DJERBI, BONNET, KHELIDJ, BAROGHEL-BOUNY. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete. *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 877-883

GARCÍA, Nancy. Evaluación del efecto de la microsílíce sobre el coeficiente de difusión aparente del ión cloruro en concretos expuestos a ambientes con cloruros. Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, UIS. Bucaramanga, 2009.

HERNÁNDEZ, Rodolfo. SUÁREZ, Sandra. Efecto del ión cloruro en el acero de refuerzo expuesto a soluciones simuladas de concreto. UIS, 1999.

HONG, ZHAO, WITTMANN. Carbonation and chloride profiles of reinforced concrete after 26 years of exposure. International conference on pozzolan. Thailand, 2006.

LIZARAZO, Juan. Ensayos típicos en la determinación de la durabilidad del concreto. Universidad Nacional de Colombia-Bogotá, 2006.

MARTÍN, Beatríz. Service life modeling of R.C. highway structures exposed to chlorides. University of Toronto, 1999.

MEJÍA, Ruby. Durabilidad y corrosión en materiales cementicios. CYTED. Colombia, 1999.

NOKKEN, BODDY, HOOTON, THOMAS. Time dependent diffusion in concrete – three laboratory studies. Cement and Concrete Research 36 (2006) 200-207

NORDTEST BUILD. Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments, NT BUILD 492. NORDTEST Finland, 1999.

_____. Concrete hardened: accelerated chloride penetration. NT BUILD 443, 1995.

SANJUÁN, Miguel. Cálculo del periodo de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón. Universidad Complutense de Madrid, 1992.

SONG, Ha-Won. LEE, Chang-Hong. YONG, Ki. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. *Cement and Concrete Composites* 30 (2008) 113-121

TAMIMI, ABDALLA, SAKKA. Prediction of long term chloride diffusion of concrete in harsh environment. *Construction and Building Materials* 22 (2008) 829-836

TANG, L. GULIKERS, J. On the mathematics of time-dependent apparent chloride diffusion coefficient in concrete. *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 589-595

TANG, L., NILSSON, L. O. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field', *ACI Materials Journal*. Technical Paper, (1992) 49-53.

T.S. NGUYEN, S. LORENTE, M. CARCASSES. Effect of the environment temperature on the chloride diffusion through CEM-I and CEM-V mortars: An experimental study. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 795–803.

YUAN, SHI, SCHUTTER, AUDENAERT, DENG. Chloride binding of cement-based materials subjected to a external chloride environment – A review. *Constructions and Building Materials* 23 (2009) 1-13

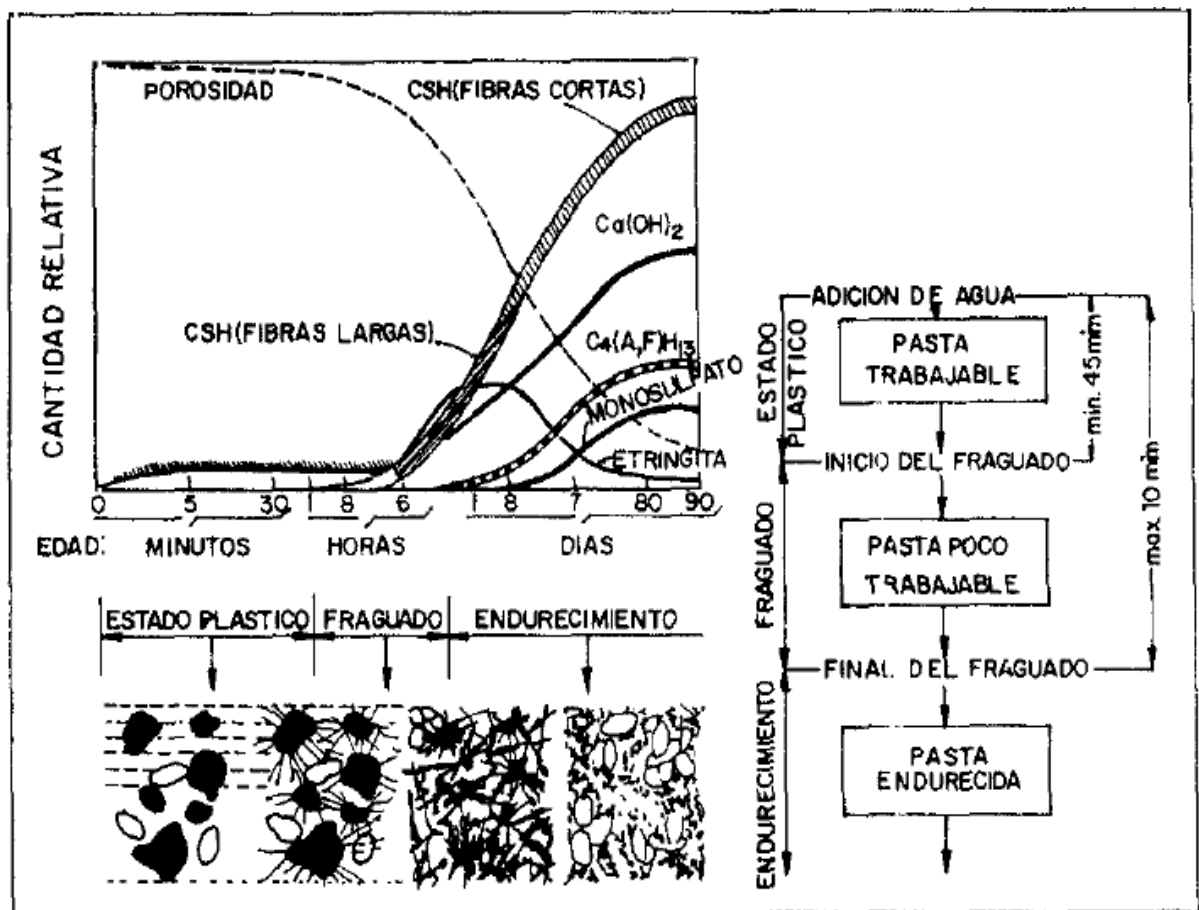
ANEXO A
CONCEPTOS SOBRE LA FORMACIÓN DEL CONCRETO

CONCEPTOS SOBRE LA FORMACIÓN DEL CONCRETO

En presencia de agua, los compuestos cristalinos anhidros que constituyen el cemento, se hidratan produciéndose una cristalinización que conduce a un sistema de constituyentes hidratados estables, con un desprendimiento mayor o menor de calor en función del tipo de cemento³⁹.

Por fraguado del cemento se entiende el instante en que la viscosidad aumenta bruscamente (Figura 19), (Soroka, 1975).

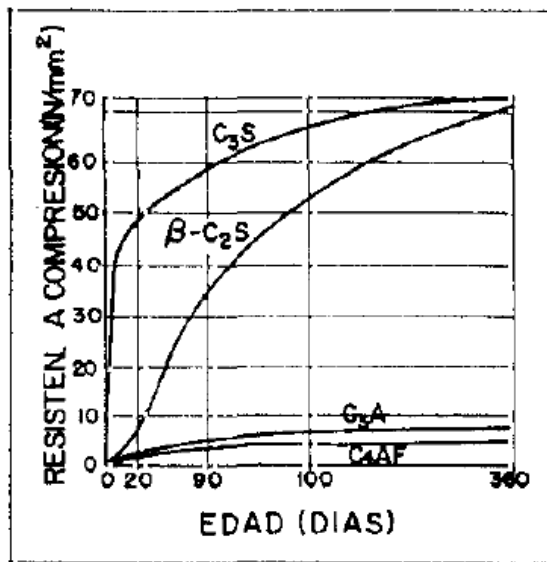
Figura 19. Formación del concreto



³⁹ SANJUÁN, Miguel. Cálculo del periodo de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón. Madrid, 1992.

Posteriormente, el proceso de hidratación del cemento continua desarrollándose muy lentamente y, en consecuencia, propiedades tan importantes como la resistencia mecánica y la permeabilidad varían a lo largo del tiempo (Figura 20). Si no existen interacciones desfavorables con el entorno, estas propiedades se mejoran con el tiempo siendo el concreto cada vez más resistente y menos permeable.

Figura 20. Resistencia a la compresión



ANEXO B
CEMENTO PORTLAND TIPO I

A. ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Figura 21. Espectrometría de fluorescencia de rayos X

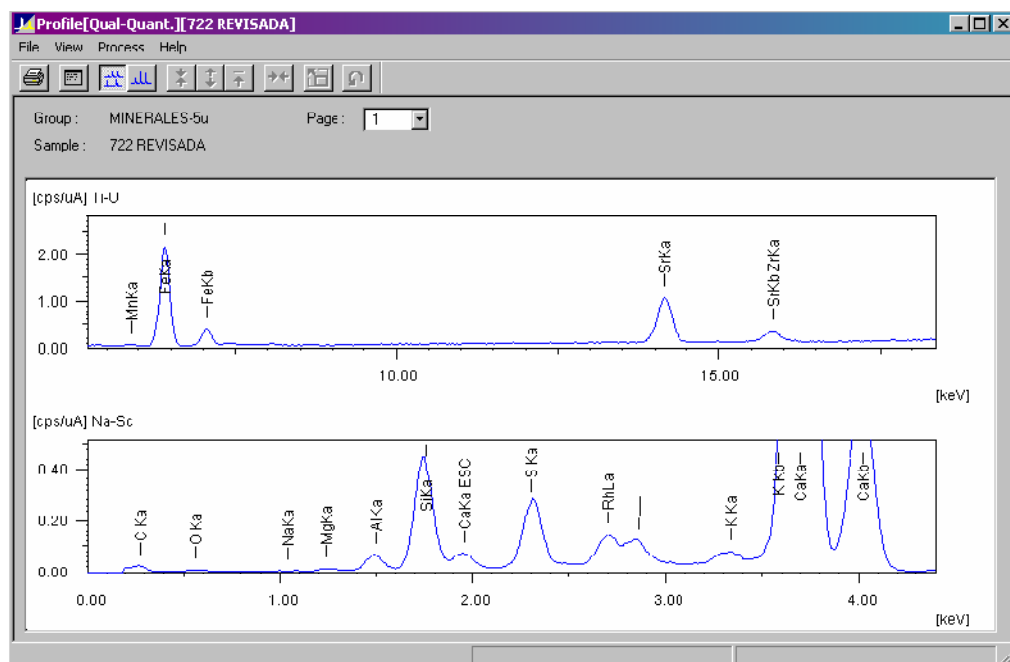


Tabla 8. Composición del cemento:

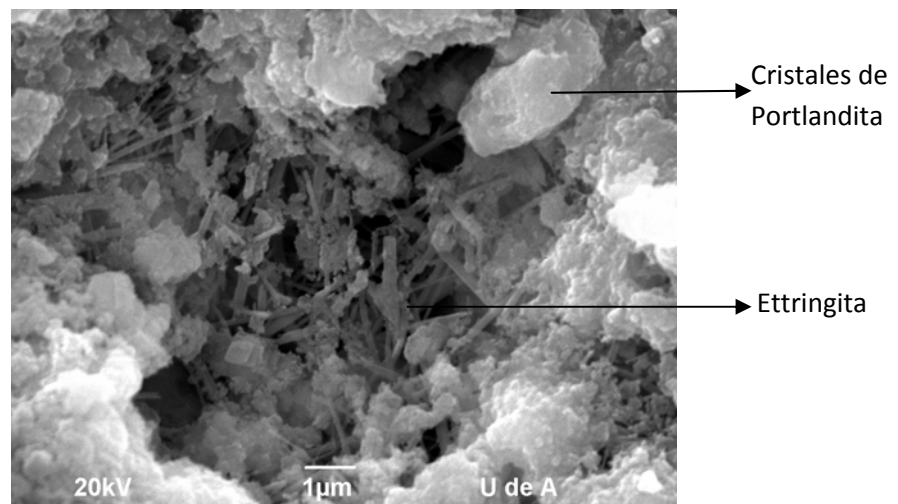
ANALITO	RESULTADO (%)	DESV. ESTÁNDAR
CaO	72.496	0.098
SiO ₂	14.917	0.075
Al ₂ O ₃	4.312	0.065
SO ₃	3.297	0.021
Fe ₂ O ₃	2.679	0.016
MgO	1.376	0.081
K ₂ O	0.540	0.013
SrO	0.208	0.002
TiO ₂	0.132	0.014
MnO	0.026	0.004
ZrO ₂	0.018	0.001

B. SEM

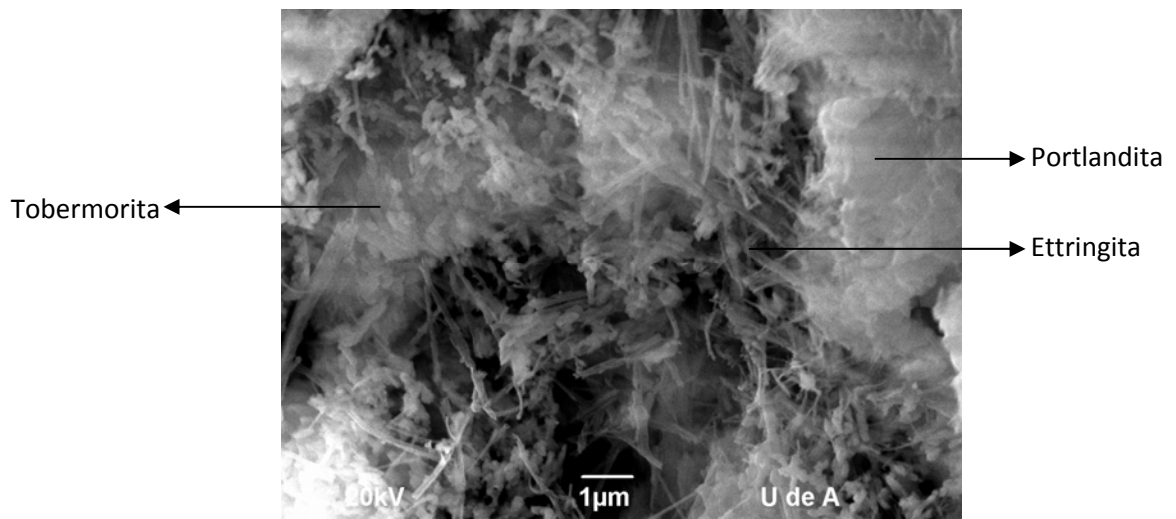
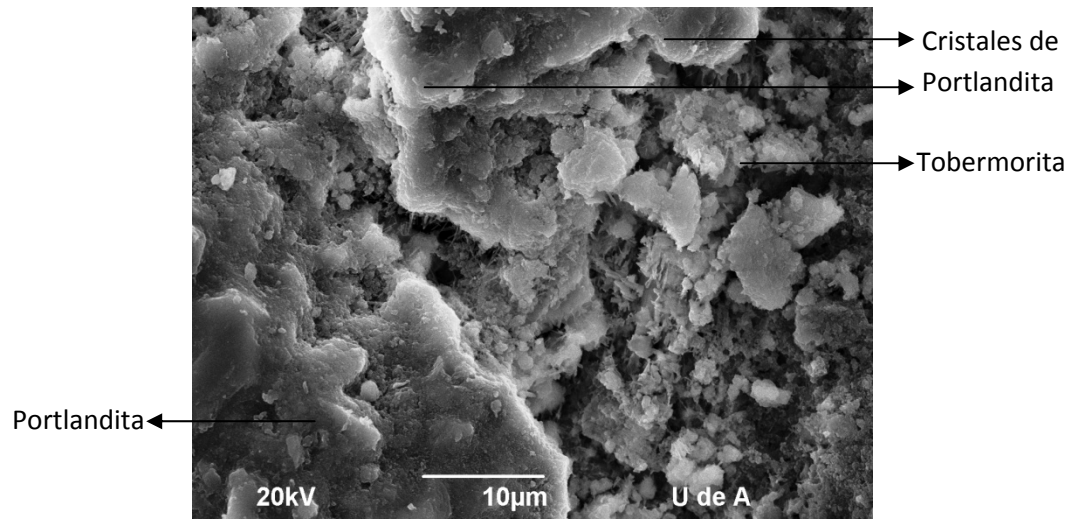
Mediante esta técnica fue posible identificar la morfología del concreto fabricado a partir del cemento portland tipo I. En la Figura 22 se observa la Portlandita en forma de plaquetas hexagonales, agrupadas en depósitos masivos⁴⁰[27]. La Tobermorita gel principal producto de hidratación del concreto, se puede apreciar como regiones de baja cristalinidad en forma de racimos.

Los cristales de Ettringita se observan en formas alargadas, con morfología de agujas produciendo estructuras que asemejan un enrejillado, el cual da al cemento mayor cohesión.

Figura 22. Morfología del concreto




⁴⁰ GARCÍA RODRÍGUEZ, NANCY ANDREA. Evaluación del efecto de la microsilíce sobre el coeficiente de difusión aparente del ión cloruro en concretos expuestos a ambientes con cloruros. Bucaramanga, 2009.



ANEXO C
COMPOSICIÓN DEL AGUA DEL ACUEDUCTO DE BUCARAMANGA

COMPOSICIÓN DEL AGUA DEL ACUEDUCTO DE BUCARAMANGA

Figura 23. Composición del agua del acueducto de Bucaramanga

No Aplica		CALIDAD FISICOQUIMICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION												
F CC 507-006													ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A. P.N.P.	
Rev.:0													LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS	
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA					AÑO:		2008					
		Parámetros Físicoquímicos												
PARAMETROS	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 AVL	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
MES														
<i>Enero</i>	90	0,98	0,79	4,1	7,36	0	0,06	51,1	64,6	3,1	22,7	0,09	1,4	0,00
<i>Febrero</i>	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
<i>Marzo</i>	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
<i>Abril</i>	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
<i>Mayo</i>	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
<i>Junio</i>	90	1,03	1,1	5,8	7,23	0	0,10	45,1	59,8	2,4	24,6	0,12	1,7	0,00
<i>Julio</i>	93	0,98	1,1	2,5	7,33	0	0,08	45,1	60,1	2,7	21,6	0,10	1,7	0,00
<i>Agosto</i>	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
<i>Septiembre</i>	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
<i>Octubre</i>	93	1,07	1,1	3,1	7,10	0	0,08	42,6	60,9	2,3	26,0	0,03	1,9	0,00
<i>Noviembre</i>	90	1,03	1,5	8,6	7,17	0	0,13	47,2	75,1	2,6	31,3	0,09	2,1	0,00
<i>Diciembre</i>	90	1,00	1,1	6,0	7,28	0	0,11	42,7	56,5	2,0	19,2	0,08	2,1	0,00
PROMEDIO	91	1,00	1,2	5,6	7,23	0	0,09	45,4	63,2	2,7	24,9	0,09	1,7	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

Elaboró: URIEL SALOMON BARRAGAN

Revisó y Aprobó:

CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ
Jefe de Control Calidad Aguas

Fuente: www.amb.com.co

ANEXO D
GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS

AGREGADOS

Tabla 9. Gravedades específicas del agregado

GRAVEDAD ESPECÍFICA	FINO	GRUESO
Real	2.69	2.70
Aparente	2.56	2.60
Aparente s s s	2.65	2.67

Tabla 10. Propiedades del agregado

	FINO	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 vacíos %	35.0	38.0

Tabla 11. Análisis granulométrico del agregado fino

TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4	0	-	-	-
8	0	-	-	-
16	156.2	15.62	15.42	84.38
30	335.2	33.52	49.14	50.36
50	271.7	27.17	76.31	23.69
100	134.1	13.41	89.72	10.28
FONDO	100.9	10.09	99.81	0.19
TOTAL	998.1	99.81	PESO MUESTRA	1000 g
MÓDULO DE FINURA: 2.3				









Tabla 12. Análisis granulométrico del agregado grueso

TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
¾	0	-	-	-
½	757.6	10.82	10.82	89.18
3/8	3681.6	52.59	63.41	36.59
4	2560.8	36.58	99.99	0.01
FONDO	-	-	-	-
TOTAL	7000		PESO MUESTRA	7000 g
TAMAÑO MÁXIMO: 3/4				

ANEXO E
EQUIPOS

EQUIPOS UTILIZADOS

Tabla 13. Equipos utilizados

NOMBRE	EQUIPO	NOMBRE	EQUIPO
Balanza analítica		Conductímetro	
Manómetro		pHmetro	
Bomba de vacío		Taladro	
Fuente reguladora		Celda en acrílico	

ANEXO F
PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Figura 24. Mezclado



Figura 25. Moldeo y fraguado



Figura 26. Curado



Figura 27. Corte y pintura



ANEXO G
PRUEBAS DE COMPRESIÓN

PRUEBAS DE COMPRESIÓN

Después del curado, las probetas se preparan con azufre para las respectivas pruebas de compresión.

Figura 28. Pruebas de compresión



ANEXO H
COEFICIENTE DE ABSORCIÓN

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN

A. CONCEPTOS TEÓRICOS

Fagerlund describe la cinética de absorción de agua en morteros y hormigones a través de tres coeficientes: m , K , ε_e . Independientemente de la forma de succión capilar, horizontal o vertical, se define la relación entre la profundidad de penetración, z (m), y el tiempo, t (s), como⁴¹:

$$t = mz^2 \quad \text{Ecuación 12}$$

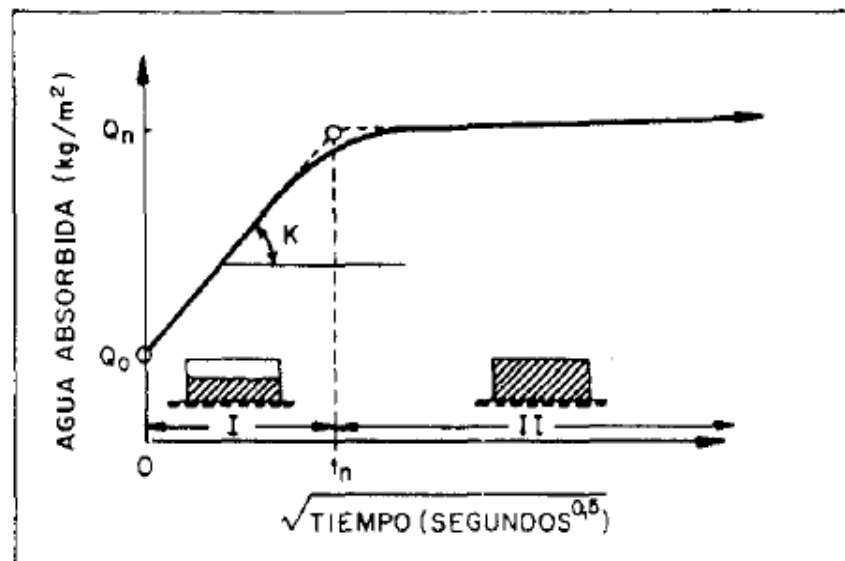
Donde m representa la resistencia a la penetración del agua (s/m^2) y se considera una función de la estructura del poro más no de la porosidad total.

En la figura se muestra la cantidad de agua absorbida, W_a , en función del tiempo:

$$W_a = \rho \varepsilon_e z \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde ρ es la densidad kg/m^3 y ε_e la porosidad efectiva en m^3/m^3 .

Figura 29. Cantidad de agua absorbida en función del tiempo



Fuente: Sanjuan, Miguel

⁴¹ SANJUÁN, Miguel. Cálculo del periodo de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón. Madrid, 1992.

Sustituyendo la Ecuación 12 en 13, se obtiene:

$$W_a = \rho \varepsilon_e \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{m}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde el coeficiente de absorción capilar, K ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$), esta dado por:

$$K = \frac{\rho}{\sqrt{m}} \varepsilon_e \quad \text{Ecuación 15}$$

Por lo tanto, K es una función de la porosidad total, del estado de humedad inicial y de la estructura de los poros.

B. MÉTODO DE ENSAYO

El estudio de la absorción de agua se realizó en probetas de espesor H=50 mm y diámetro 75mm, preacondicionadas mediante secado a 105°C durante 72 horas y posterior enfriamiento en desecador durante 24 horas⁴².

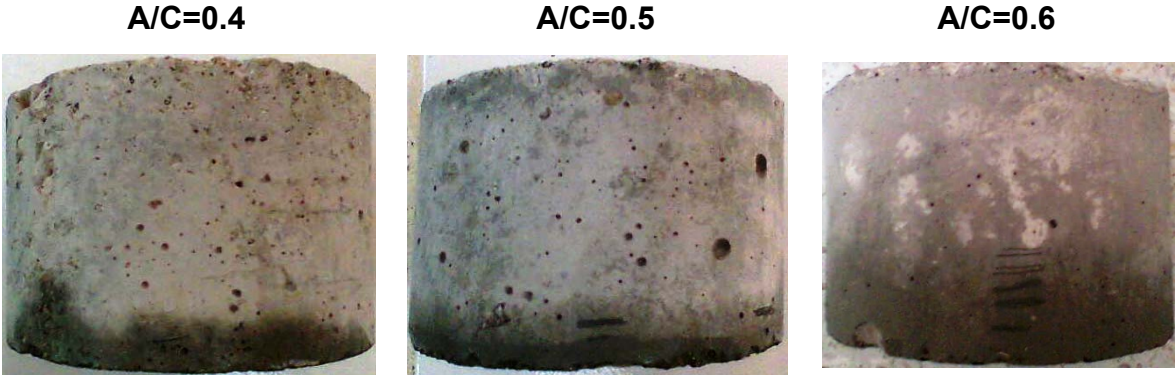
El método normalizado de ensayo consiste en colocar las muestras sobre una esponja saturada de agua en un recipiente cubierto para evitar la evaporación. El nivel de agua debe estar 3 mm por encima de la cara inferior de la probeta. A intervalos de tiempo se registra el cambio de peso Qt. Con base en éste, se evalúan los coeficientes m, K y ε_e , usando las gráficas de las ecuaciones 12 y 14.

⁴² MEJÍA, Ruby. Durabilidad y corrosión en materiales cementicios. Colombia, 1999.

Figura 30. Ensayo de absorción



Figura 31. Frente de absorción de agua



ANEXO I
MÉTODO COLORIMÉTRICO

MÉTODO COLORIMÉTRICO

El flujo de los iones cloruro a través de las probetas de concreto se considera como un mecanismo de difusión y migración. El coeficiente de migración en estado no estable (D_{mcol}) se calcula a partir de la segunda ley de Fick modificada⁴³:

$$\frac{dC}{dt} = D_{mcol} \left(\frac{d^2C}{dx^2} - \frac{|z|FE}{RT} \frac{dC}{dx} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde C es la concentración de iones cloruro como una función de la distancia x , en cualquier tiempo t , z la carga eléctrica de cloruro, F la constante de Faraday, E la intensidad de campo eléctrico entre en ánodo y cátodo, R la constante universal de los gases, y T es la temperatura absoluta. En este método se usaron las siguientes condiciones para obtener la solución de la Ecuación 16, como condición inicial: $C = 0$, $x > 0$, $t = 0$; condición de frontera: $C = C_0$, $x = 0$, $t > 0$; y condición en el punto infinito: $C = 0$, $x = \infty$, $t \gg \gg 0$. La solución analítica para la Ecuación 16 es:

$$C = \frac{C_0}{2} \left[\exp(ax) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + aD_m t}{2\sqrt{D_m t}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x - aD_m t}{2\sqrt{D_m t}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde $a = |z|FE/RT$, y erfc es la función error complementaria. De la Ecuación 17, cuando se aplica el campo eléctrico y la penetración es suficiente⁴⁴, el coeficiente de migración puede calcularse así:

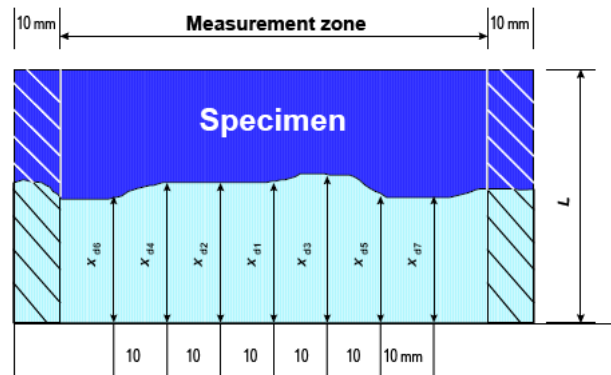
$$D_{mcol} = \frac{1}{a} \left(\frac{x - \alpha\sqrt{x}}{t} \right) \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde $\alpha = 2\sqrt{\frac{1}{a}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \left(\frac{2C}{C_0} \right) \right)$.

⁴³ C.T. CHIANG, C.C. YANG. Relation between the 57iffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test. En: Materials Chemistry and Physics Vol.106. (2007) p.240–246.

⁴⁴ MEJÍA, Ruby. Durabilidad y corrosión en materiales cementicios. Colombia, 1999.

Figura 32. Medición de la profundidad de penetración



Fuente: NT BUILD 492

Figura 33. Fractura de las probetas



Figura 34. Medición de la penetración

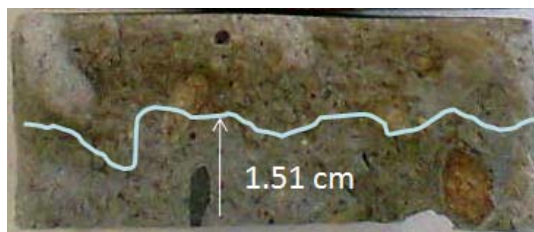


Figura 35. Colorimetría probetas ACMT







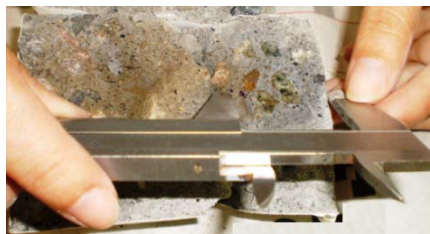



A/C	Probetas ACMT	
0.4		
0.5		
0.6		

Figura 36. Colorimetría probetas difusión natural



Relación agua/cemento		
0.4	0.5	0.6
		

ANEXO J
PERFIL DE CONTENIDO DE CLORUROS

PERFIL DE CONTENIDO DE CLORUROS

A. FUNCIÓN EXPONENCIAL

El contenido de cloruro se expresa como un porcentaje de la masa de muestra seca y la profundidad es el punto medio de cada sección de la probeta expuesta a la solución de cloruro⁴⁵. La difusión de cloruro en concreto esta controlada por la segunda ley de difusión de Fick:

$$\frac{\partial C_{Cl}}{\partial t} = D_{nexp} \frac{\partial^2 C_{Cl}}{\partial x^2} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde C_{Cl} es la concentración de iones cloruro como una función de la distancia, en cualquier tiempo t , y D_{nexp} es el coeficiente de difusión aparente del ensayo natural a partir la función exponencial. Asumiendo que el medio es semi-infinito y la cantidad total de sustancia difusiva m , es inicialmente depositada en la superficie del medio semi-infinito⁴⁶. La cantidad total de sustancia difusiva es constante y puede calcularse como:

$$m = \int_0^{\infty} C_{Cl} dt ; t \geq 0 \quad \text{Ecuación 19}$$

Las siguientes condiciones se usaron para obtener la solución de la Ecuación 16, la condición inicial: $C_{Cl} = 0, x > 0, t = 0$; la condición de frontera: $C_{Cl} = 0, x = 0, t \geq 0$; y la condición en el punto infinito: $C_{Cl} = \infty, x = 0, t = 0$. La solución de la Ecuación 16 para un suministro limitado de iones es:

$$C_{Cl} = \frac{m}{\sqrt{\pi D_{nexp} t}} \exp\left(\frac{-x^2}{4D_{nexp} t}\right) \quad \text{Ecuación 20}$$

El contenido de cloruro en la superficie C_s , se obtiene de la Ecuación 20 cuando $x = 0$. Mediante linealización, se determina el coeficiente de difusión aparente despejándolo de la Ecuación 20.

⁴⁵ C.T. CHIANG, C.C. YANG. Relation between the diffusion characteristic of concrete from salt ponding test and accelerated chloride migration test. En: Materials Chemistry and Physics Vol.106. 2007 p.240–246.

⁴⁶ CLIMENT, DE VERA, LOPEZ, VIQUEIRA, ANDRADE. A test method for measuring chloride diffusion coefficients through nonsaturated concrete. Part I. The instantaneous plane source diffusion case. En: Cement and Concrete Research Vol.32. 2002 p.1113-1123.

$$\ln C = \ln \frac{m}{\sqrt{\pi D_{nexp} t}} - \frac{x^2}{4 D_{nexp} t} \quad \text{Ecuación 21}$$

B. FUNCIÓN ERROR

La difusión de cloruro en concreto esta controlada por la segunda ley de difusión de Fick:

$$\frac{C_{Cl}}{\partial t} = D_{ner} \frac{\partial^2 C_{Cl}}{\partial x^2} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde C_{Cl} es la concentración de iones cloruro como una función de la distancia, en cualquier tiempo t , y D_{ner} es el coeficiente de difusión aparente del ensayo natural a partir la función error.

Utilizando la condición de frontera: $C_{Cl} = C_0$, $x = 0$, $t > 0$; la condición inicial: $C_{Cl} = 0$, $x > 0$, $t = 0$; y la condición en el punto infinito: $C_{Cl} = C_0$, $x = \infty$, $t > 0$, la solución de la Ecuación 22 es:

$$C = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 D_{ner} t}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 23}$$

C. METODO COLORIMÉTRICO

La profundidad de penetración detectada por la solución 0.1N de AgNO_3 puede usarse para determinar el coeficiente de difusión del ión cloruro utilizando la condición de frontera: $C_{Cl} = C_0$, $x = 0$, $t > 0$; la condición inicial: $C_{Cl} = 0$, $x > 0$, $t = 0$; y la condición en el punto infinito: $C_{Cl} = C_0$, $x = \infty$, $t > 0$; la solución de la segunda ley de Fick es:

$$C = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 D_{ncol} t}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde D_{ncol} es el coeficiente de difusión aparente del ensayo de difusión natural a partir del método colorimétrico, y se expresa usando la profundidad (x) dada por colorimetría:

$$D_{ncol} = \left[x / \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \left(\frac{C}{C_0} \right) \right) \right]^2 / 4t \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde $\operatorname{erf}^{-1}(y)$ es la inversa de la función error, C_0 es la concentración de cloruro en la superficie expuesta de la probeta, y C es la concentración de cloruro en la solución poro correspondiente al límite de cambio de color.

D. EXTRACCIÓN DE MUESTRAS

El perfil de contenido de cloruros se obtiene mediante la extracción de muestras en polvo a diferentes profundidades, como se presenta en la figura, para el posterior análisis de concentración de cloruros según la norma ASTM C 1218M-99. La cuantificación se realizó por el método potenciométrico utilizando electrodo de plata-anillo de plata, selectivo para cloruros.

Titulación potenciométrica

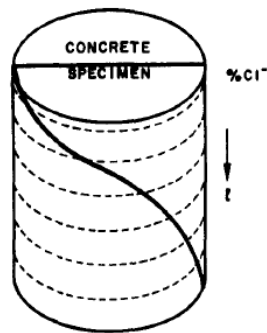
Este procedimiento está descrito en las Normas ASTM C1218 y ASTM C114.

Para este análisis, la muestra pulverizada se sometió a una digestión en 50 ml de agua destilada, seguida de 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. Luego, se adicionaron 2 ml de cloruro de sodio, se introdujeron los electrodos y se agitó suavemente; 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 equivalencia⁴⁷.

Los equipos empleados fueron: Titulador automático Metrohm 751 GPD Titrimo 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.

Figura 37. Esquema de las zonas de muestreo



Fuente: ANDRADE, SANJUAN, RECUERO

⁴⁷ LIZARAZO, Juan. Ensayos típicos en la determinación de la durabilidad del concreto. Bogotá, 2006.

Figura 38. Extracción de muestras para perfil de concentración



ANEXO K
CURVAS DE ABSORCIÓN CAPILAR

CURVAS DE ABSORCIÓN CAPILAR

Figura 39. Agua absorbida vs Tiempo

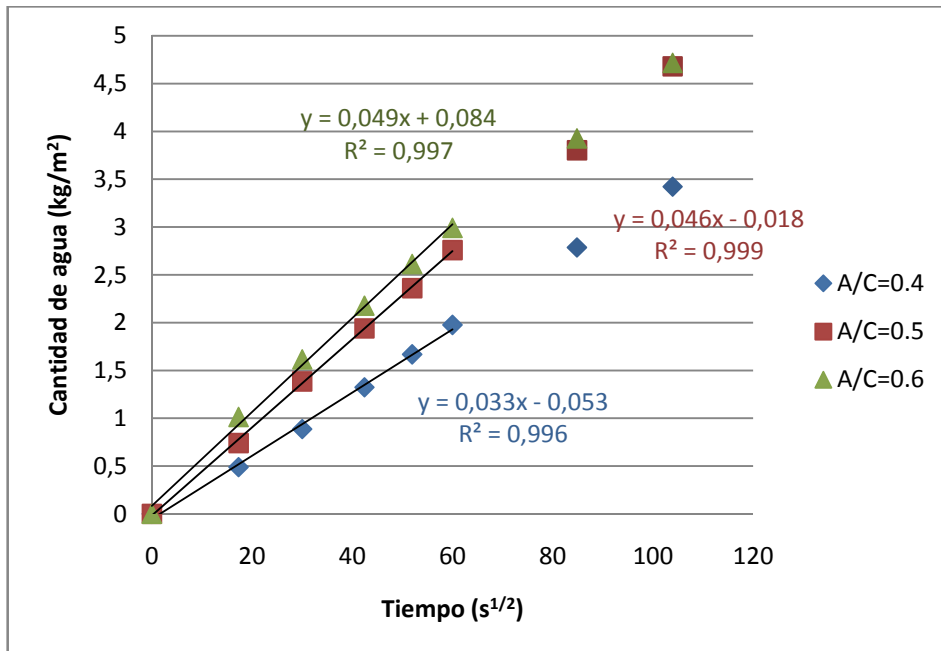
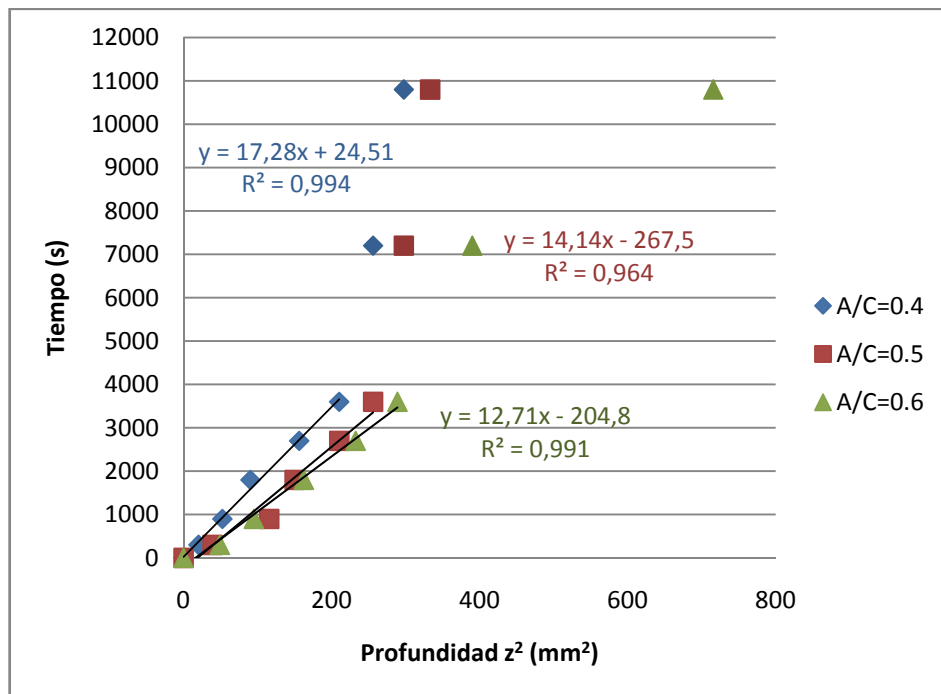


Figura 40. Tiempo vs Profundidad de penetración



ANEXO L
CURVAS DE CORRIENTE VS TIEMPO

CURVAS DE CORRIENTE VS TIEMPO

La carga total es el área bajo la curva de corriente eléctrica contra el tiempo de prueba⁴⁸.

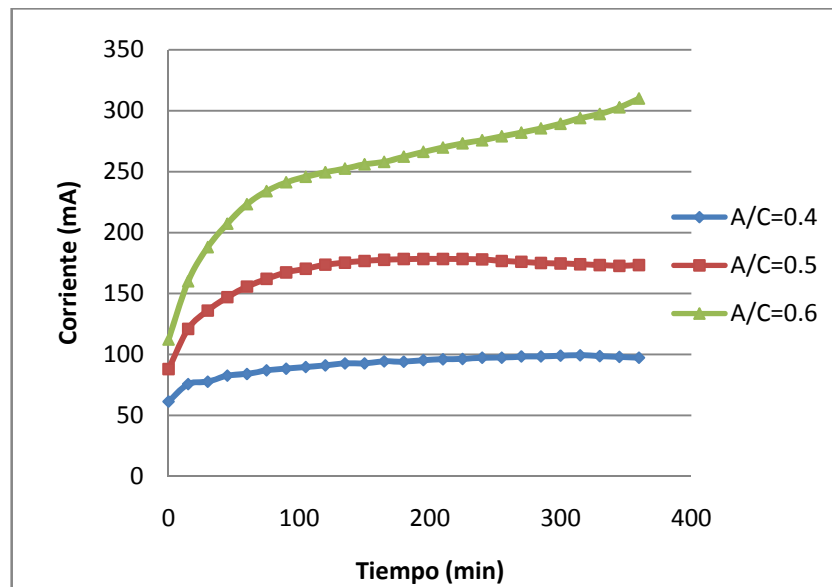
$$Q = \int I dt \quad \text{Ecuación 25}$$

Integrando los datos experimentales mediante la regla del trapecio, se obtuvieron los resultados de la carga pasada.

$$\int_a^b f(x) dx \approx (b - a) \left[\frac{f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n)}{2n} \right] \quad \text{Ecuación 26}$$

Las datos de corriente vs tiempo que se reportan a continuación son el promedio de los resultados obtenidos para tres probetas por cada relación agua/cemento.

Figura 41. Corriente RCPT (6 horas)



⁴⁸ Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM C 1202-97, ASTM, USA, 1997.

Figura 42. Corriente ACMT (9 horas)

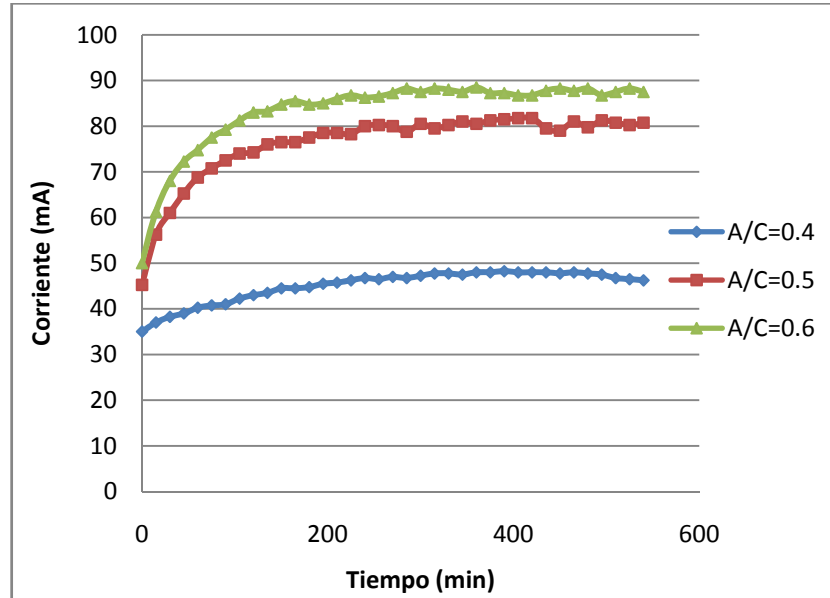
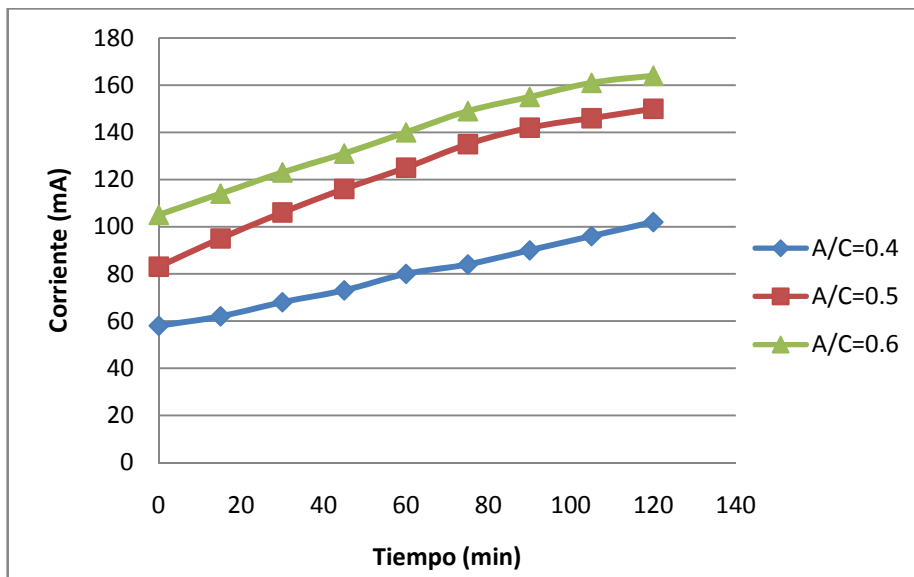


Figura 43. Corriente ACMT (2 horas)



ANEXO M
LINEALIZACIÓN Y AJUSTE DE LA FUNCIÓN EXPONENCIAL

LINEALIZACIÓN Y AJUSTE DE LA FUNCIÓN EXPONENCIAL

Figura 44. Linealización a 30 días

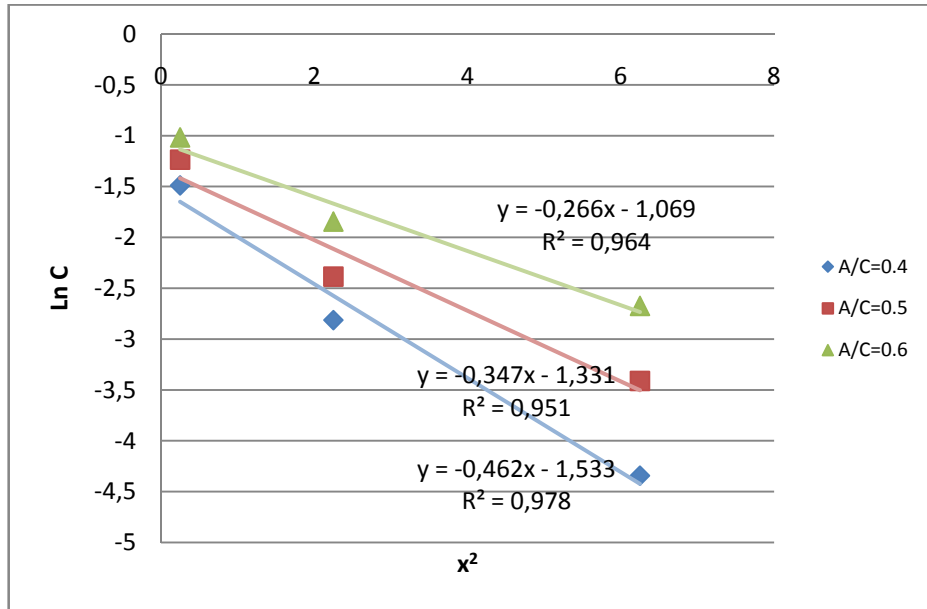


Figura 45. Ajuste a la función exponencial a 30 días

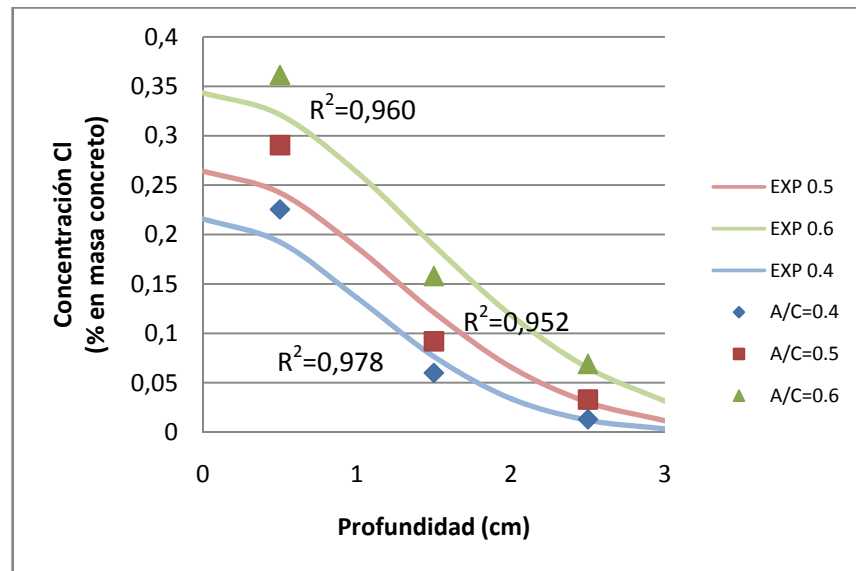


Figura 46. Linealización a 45 días

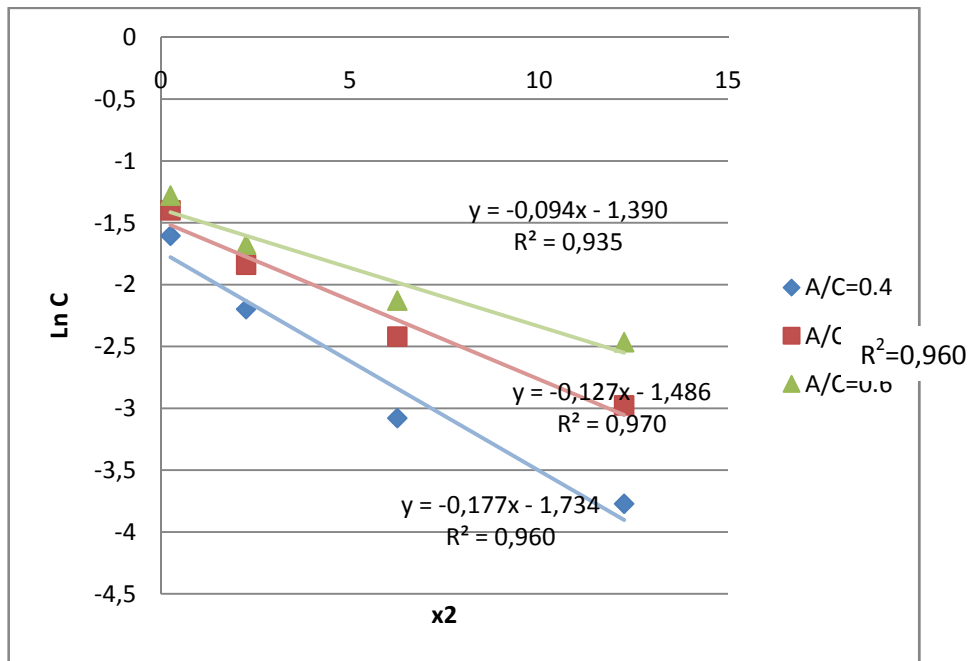


Figura 47. Ajuste a la función exponencial a 30 días

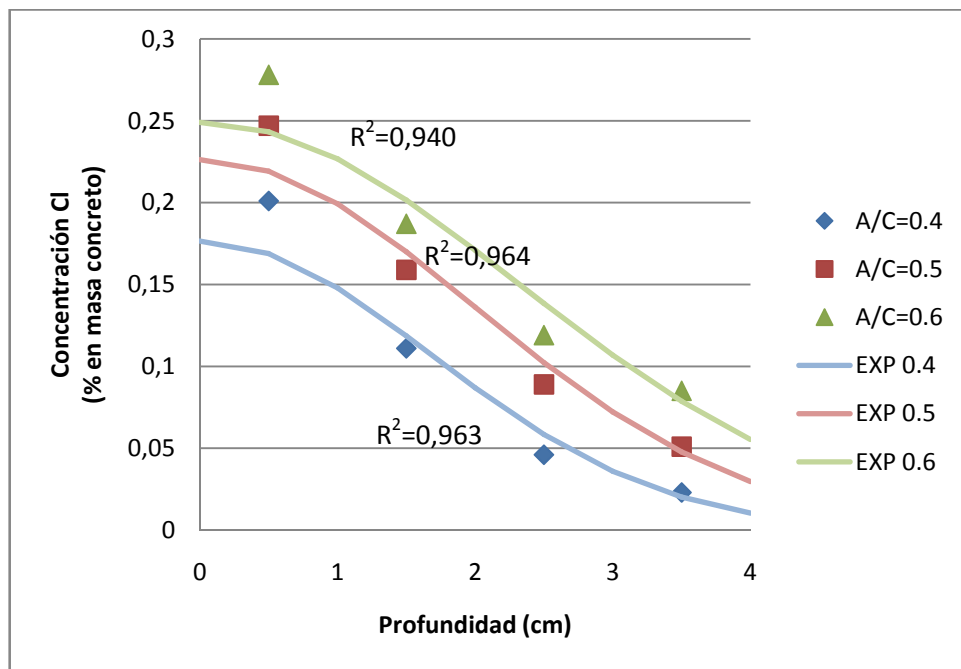


Figura 48. Linealización a 60 días

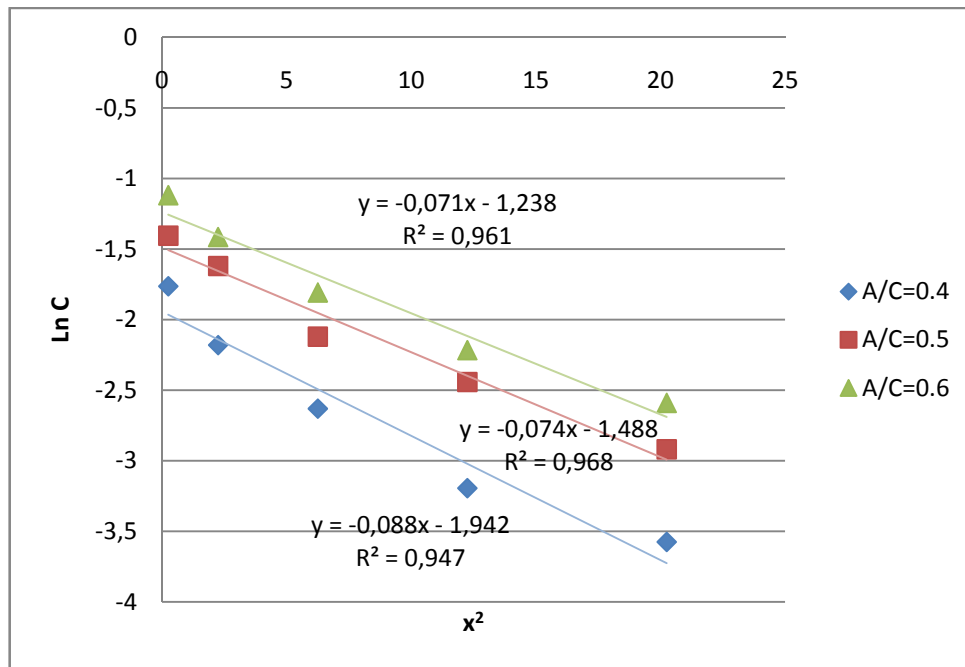
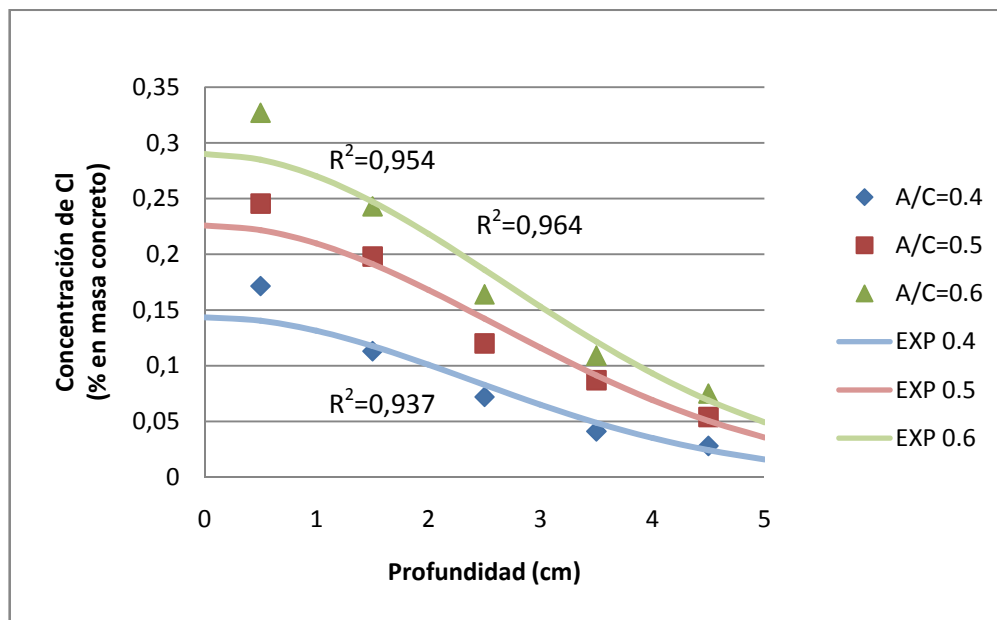


Figura 49. Ajuste a la función exponencial a 60 días



ANEXO N
EXTRAPOLACIÓN Y AJUSTE A LA FUNCIÓN ERROR

Figura 50. Extrapolación polinomial a 30 días

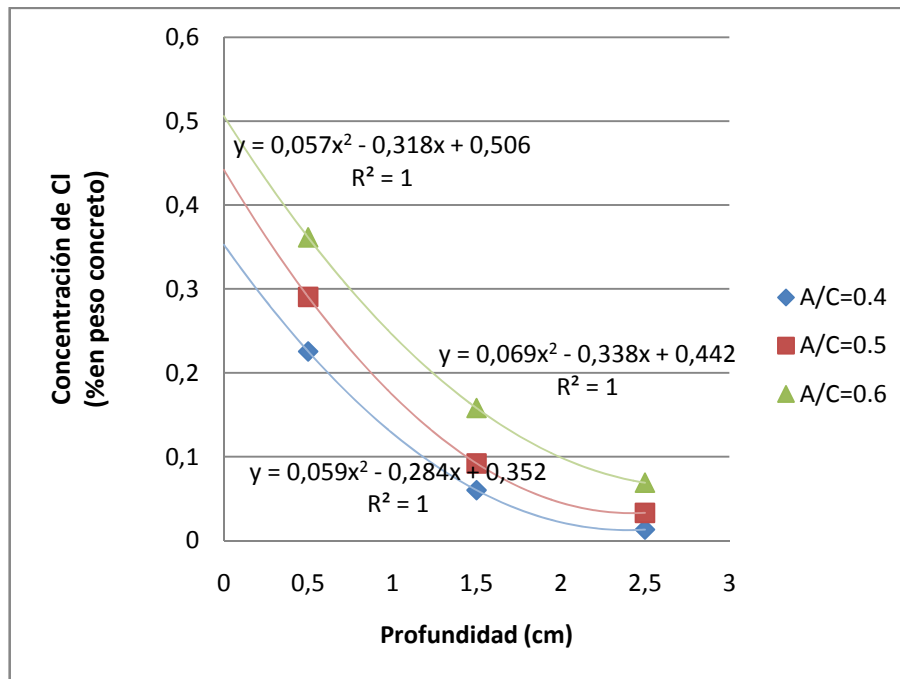


Figura 51. Ajuste a la función error a 30 días

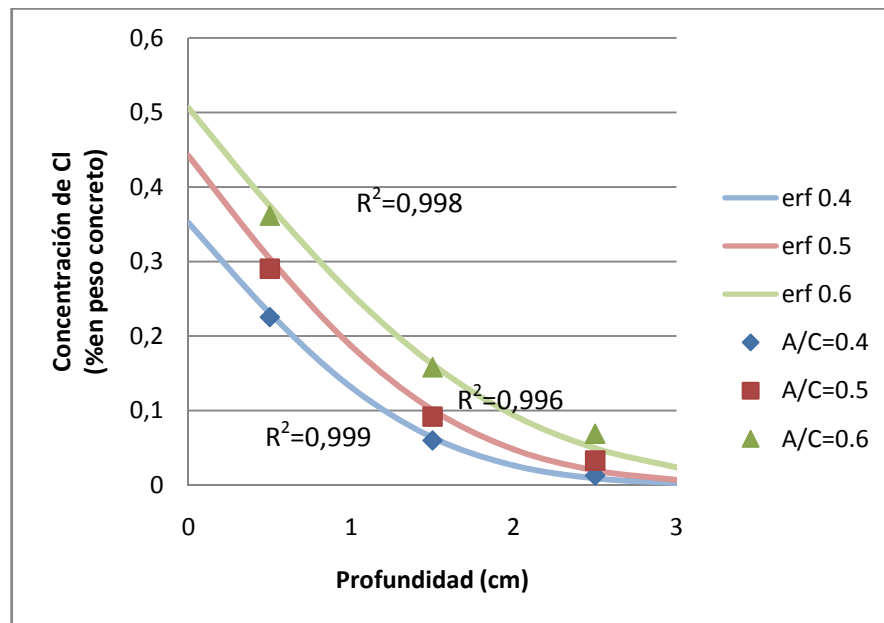


Figura 52. Extrapolación polinomial a 45 días

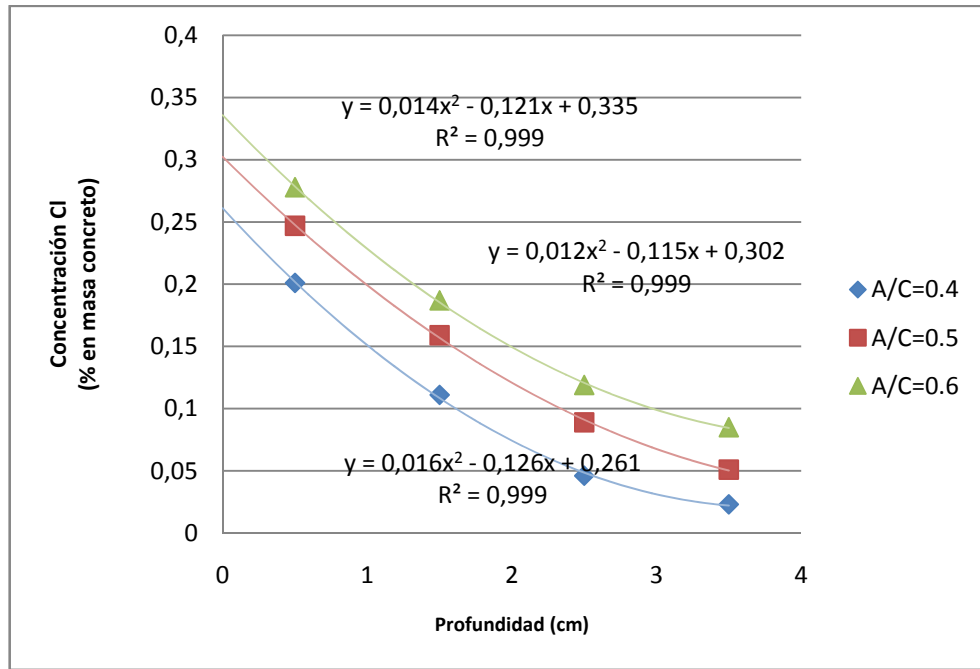


Figura 53. Ajuste a la función error a 45 días

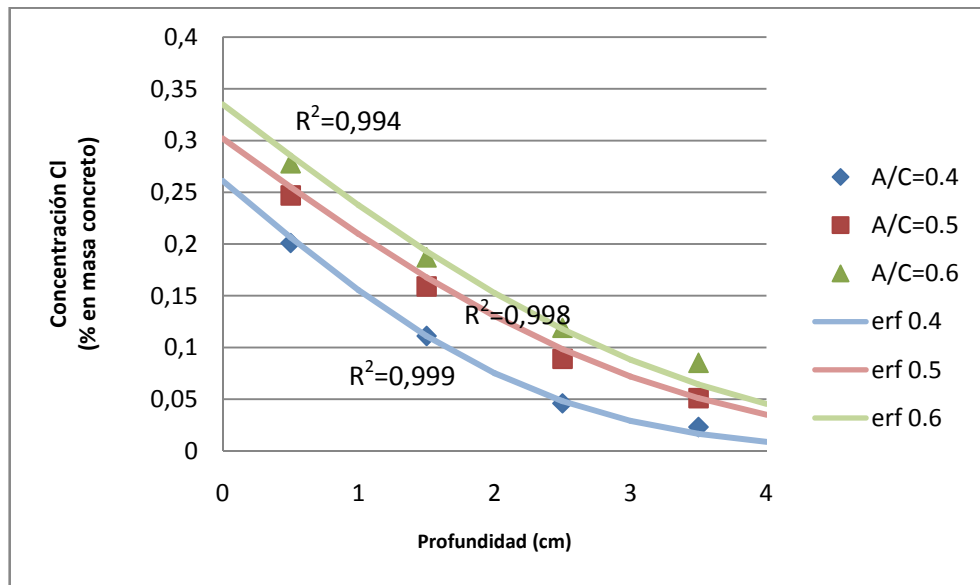


Figura 54. Extrapolación polinomial a 60 días

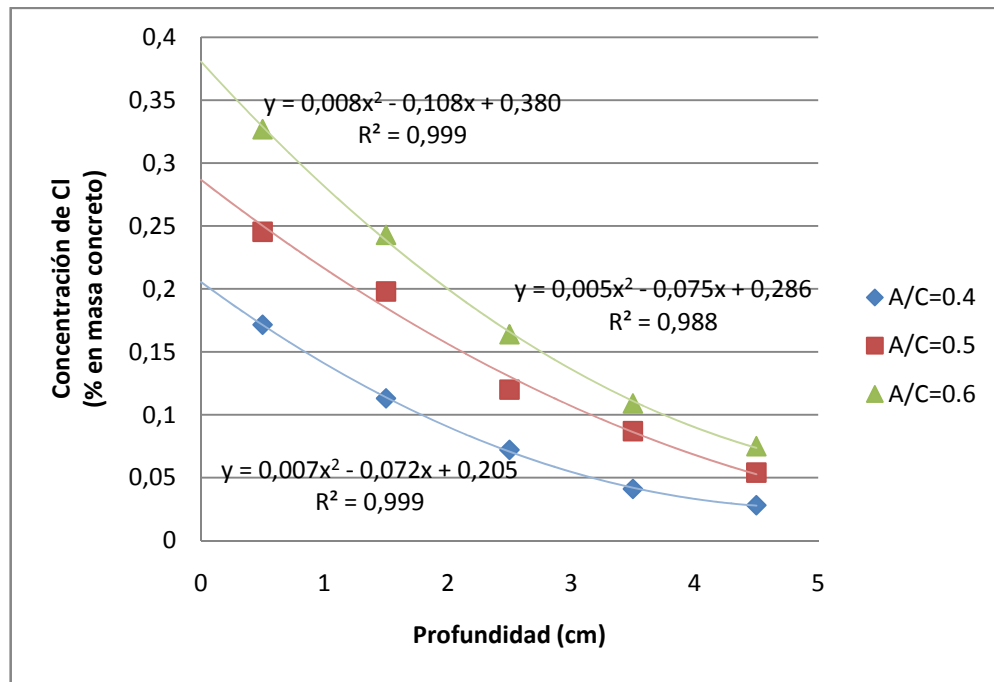
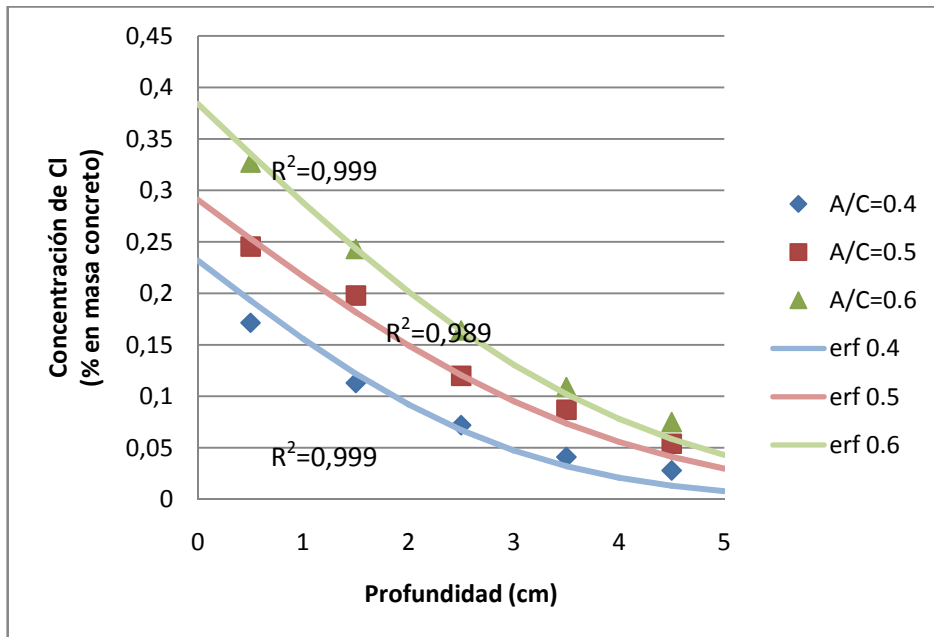


Figura 55. Ajuste a la función error a 60 días



ANEXO L
COEFICIENTES DE DIFUSIÓN APARENTE

COEFICIENTES DE DIFUSIÓN APARENTE

Tabla 14. Coeficientes a partir de la difusión natural

TIEMPO DE INMERSIÓN	A/C	COEFICIENTE DE DIFUSIÓN ($\times 10^{-11}$ m ² /s)		
		FUNCIÓN ERROR	FUNCIÓN EXPONENCIAL	MÉTODO COLORIMÉTRICO
		D_{ner}	D_{nexp}	D_{ncol}
30 días	0.4	2.43 ± 0.1	2.09 ± 0.2	2.02 ± 0.4
	0.5	2.99 ± 0.08	2.78 ± 0.2	3.76 ± 0.2
	0.6	4.40 ± 0.2	3.63 ± 0.15	4.74 ± 0.6
45 días	0.4	4.55 ± 0.06	3.63 ± 0.12	3.02 ± 0.1
	0.5	8.31 ± 0.09	5.06 ± 0.14	4.51 ± 0.1
	0.6	9.24 ± 0.2	6.84 ± 0.1	5.59 ± 0.15
60 días	0.4	5.38 ± 0.2	5.48 ± 0.2	2.56 ± 0.4
	0.5	9.05 ± 0.19	6.52 ± 0.19	4.73 ± 0.4
	0.6	9.55 ± 0.17	6.79 ± 0.27	5.47 ± 0.1

Tabla 15. Coeficientes a partir de la migración acelerada

TIEMPO	COEFICIENTE DE DIFUSIÓN ($\times 10^{-11}$ m ² /s)	
	A/C	MÉTODO COLORIMÉTRICO
		D_{mcol}
2 horas	0.4	4.73 ± 0.12
	0.5	8.79 ± 0.17
	0.6	9.97 ± 0.19