

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA MICROSÍLICE SOBRE EL COEFICIENTE
DE DIFUSIÓN APARENTE DEL ION CLORURO EN CONCRETOS EXPUESTOS
A AMBIENTES CON CLORUROS**

NANCY ANDREA GARCÍA RODRÍGUEZ

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

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA MICROSÍLICE SOBRE EL COEFICIENTE
DE DIFUSIÓN APARENTE DEL ION CLORURO EN CONCRETOS EXPUESTOS
A AMBIENTES CON CLORUROS**

NANCY ANDREA GARCÍA RODRÍGUEZ

Trabajo de Grado realizado para optar el título de Ingeniera Metalúrgica

**Director M.Sc.
CUSTODIO VÁSQUEZ QUINTERO**

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

*A DIOS por brindarme esta oportunidad y apoyarme cada día,
A TI SEÑOR JESÚS por hacer realidad este sueño... mil y mil gracias.
A MI FAMILIA por su apoyo incondicional, por su confianza, amor y compañía.*

Nancy Andrea García Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa su agradecimiento a cada una de las personas que hicieron posible este trabajo; gracias por su apoyo a:

A Dios por ser mi proveedor, mi guía y ayuda en toda circunstancia, por darme la fuerza y la fe para seguir adelante.

A mi Familia gracias por su apoyo incondicional, por creer en mí, y por todos sus sacrificios.

Al Msc. Ing. Custodio Vásquez Quintero, por su apoyo y orientación durante la dirección de este proyecto.

Al PhD. Darío Yesid Peña Ballesteros, director del proyecto de Colciencias por su oportuna colaboración, gestión y confianza.

Al Técnico, Jairo Hernández Salazar por su gran colaboración y aporte de sus conocimientos para la ejecución de este proyecto.

A cada uno de mis amigos y compañeros, que estuvieron conmigo en esta etapa: Julián Alberto Morón, Gerson Isidro Barrera, Blanca Elizabeth Porras, Diego Armando Balaguera, Briyidth Riveros, Claudia León, Sandra Astrid Orostegui, Orlando Buitrago, Tilson Huertas.

De igual forma deseo agradecer a la familia Morón Avendaño, a Luis Enrique Joya y sus padres, a mis amigas: July, Erika, Lina, Ruth y Paola, por su amistad, y apoyo constante.

A todos muchas gracias por su apoyo, por su compañía, por animarme cada día y ayudarme a culminar con éxito esta etapa tan importante de mi vida.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVOS | 3 |
| 1. GENERALIDADES DEL CONCRETO | 4 |
| 1.1 Concreto reforzado | 4 |
| 1.2 Concreto | 4 |
| 1.3 Componentes del concreto y sus propiedades | 5 |
| 1.3.1 Cemento | 5 |
| 1.3.1.1 Proceso de hidratación del cemento | 7 |
| 1.3.1.2 Clasificación de los cementos | 10 |
| 1.3.2 Adiciones | 11 |
| 1.3.3 Agregados | 14 |
| 1.3.4 Agua | 15 |
| 1.3.5 Aditivos | 15 |
| 2. DURABILIDAD DEL CONCRETO | 16 |
| 2.1 Mecanismos de deterioro | 16 |
| 2.1.1 Ataque por cloruros | 17 |
| 2.1.2 Difusión y Absorción | 20 |
| 2.2 Coeficiente de difusión | 23 |
| 3. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA PENETRACIÓN DE CLORUROS EN CONCRETO | 24 |
| 3.1 Prueba de difusión natural | 24 |
| 3.2 Perfil de concentración | 25 |
| 3.2.1 Extracción de muestras | 25 |
| 3.2.2 Titulación potenciométrica | 26 |
| 3.3 Método colorimétrico | 28 |
| 3.4 Ensayo rápido de permeabilidad del ión cloruro (RCPT) | 31 |
| 3.5 Ensayo de migración acelerada del ion cloruro (ACMT) | 32 |
| 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL | 33 |
| 4.1 Revisión bibliográfica | 34 |
| 4.2 Preparación de las probetas | 34 |
| 4.2.1 Caracterización del material | 34 |
| 4.2.1.1 Cemento | 34 |
| 4.2.1.2 Microsílice | 35 |
| 4.2.1.3 Agregados | 35 |
| 4.2.1.4 Agua | 35 |

| | Pág. | |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.2 | Elaboración de probetas | 36 |
| 4.2.2.1 | Variables para el diseño de mezclas | 36 |
| 4.2.2.2 | Dosificación | 36 |
| 4.2.2.3 | Distribución de las probetas | 37 |
| 4.2.2.4 | Fabricación de probetas | 37 |
| 4.2.3 | Pruebas de Resistencia mecánica. | 38 |
| 4.2.4 | Corte y pintura de las probetas | 40 |
| 4.2.5 | Caracterización de la microestructura del concreto | 40 |
| 4.2.5.1 | Difracción de rayos X (DRX) | 40 |
| 4.2.5.2 | Microscopia de Barrido Electrónico (SEM) | 41 |
| 4.3 | Ensayos para la determinación del coeficiente de difusión | 42 |
| 4.3.1 | Ensayo de difusión natural | 42 |
| 4.3.2 | Ensayo rápido de permeabilidad del ión cloruro (RCPT) | 44 |
| 4.3.3 | Ensayo de migración acelerada de cloruros (ACMT) | 46 |
| 5. | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 47 |
| 5.1 | Caracterización de la microestructura del concreto | 47 |
| 5.1.1 | DRX | 47 |
| 5.1.2 | SEM | 49 |
| 5.2 | Resistencia a la compresión | 52 |
| 5.3 | Determinación del perfil de cloruros para el ensayo de difusión natural mediante inmersión | 54 |
| 5.4 | Penetración de cloruros por inmersión | 56 |
| 5.5 | DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN | 59 |
| 5.5.1 | Determinación del coeficiente de difusión de cloruros a partir del perfil de concentración | 59 |
| 5.5.2 | Determinación del coeficiente de difusión de cloruros a partir del método de colorimetría | 61 |
| 5.6 | Determinación de carga pasante durante las pruebas RCPT y ACMT | 63 |
| | CONCLUSIONES | 66 |
| | RECOMENDACIONES | 68 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 69 |
| | ANEXOS | 72 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Tipos de cloruros presentes en el concreto | 19 |
| Figura 2. Estructura del gel de cemento | 22 |
| Figura 3. Montaje de la prueba de difusión natural | 24 |
| Figura 4. Medida de profundidad para extracción de muestras | 25 |
| Figura 5. Perfil típico de concentración de cloruros | 26 |
| Figura 6. Medida de profundidad de la penetración del ion cloruro | 28 |
| Figura 7. Montaje para el ensayo RCPT | 31 |
| Figura 8. Metodología | 33 |
| Figura 9. Mezcla de los materiales para la elaboración de las probetas | 38 |
| Figura 10. Maquina de Universal de Ensayos | 39 |
| Figura 11. Estanque para inmersión de probetas | 42 |
| Figura 12. Extracción de las muestras | 43 |
| Figura 13. Montaje experimental para RCPT | 44 |
| Figura 14. Montaje para el acondicionamiento de las probetas | 45 |
| Figura 15a. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra sin microsílíce. | 49 |
| Figura 15b. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra sin microsílíce. | 50 |
| Figura 15c. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra sin microsílíce. | 50 |
| Figura 16a. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra con microsílíce | 51 |
| Figura 16b. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra con microsílíce | 52 |
| Figura 16c. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra con microsílíce | 52 |
| Figura 17. Resistencia Mecánica | 53 |
| Figura 18. Micrografías de concreto sin adición de Microsílíce | 53 |
| Figura 19. Micrografías de concreto con adición de Microsílíce | 53 |
| Figura 19c. Micrografías de concreto con adición de Microsílíce | 54 |
| Figura 20. Perfil de cloruros 60 días, a/c: 0.4 | 55 |
| Figura 21. Perfil de cloruros 60 días, a/c: 0.5 | 55 |
| Figura 22. Perfil de cloruros 60 días, a/c: 0.6 | 56 |
| Figura 23. Profundidad de penetración del ión cloruro Vs. Tiempo, (Microsílíce) | 58 |
| Figura 24. Profundidad de penetración del ión cloruro Vs. Tiempo, (blanco) | 58 |
| Figura 25. Perfil de concentración a 30 días | 59 |

| | Pág. | |
|-------------------|--|----|
| Figura 26. | Linealización del perfil a 30 días | 59 |
| Figura 27. | Ajuste a la curva exponencial (30 días) | 60 |
| Figura 28. | Ajuste a la función error (30 días) | 60 |
| Figura 29. | Coeficientes de difusión hallados a partir de ACMT para concreto con y sin Microsílice. | 63 |
| Figura 30. | Carga pasante en probetas con y sin adición de Microsílice (RCPT) | 64 |
| Figura 31. | Carga pasante en probetas con y sin adición de Microsílice (ACMT) | 64 |
| Figura 32. | Reporte de calidad del cemento | 77 |
| Figura 33. | Reporte de calidad del agua | 79 |
| Figura 34. | Difractograma muestra sin microsílice | 81 |
| Figura 35. | Difractograma muestra con microsílice | 82 |
| Figura 36. | Perfil de cloruros 30 días, a/c: 0.4 | 84 |
| Figura 37. | Perfil de cloruros 30 días, a/c: 0.5 | 84 |
| Figura 38. | Perfil de cloruros 30 días, a/c: 0.6 | 84 |
| Figura 39. | Perfil de cloruros 45 días, a/c: 0.4 | 85 |
| Figura 40. | Perfil de cloruros 45 días, a/c: 0.5 | 85 |
| Figura 41. | Perfil de cloruros 45 días, a/c: 0.6 | 85 |
| Figura 42. | Perfil de concentración a 45 días | 87 |
| Figura 43. | Linealización del perfil a 45 días | 87 |
| Figura 44. | Ajuste a la curva exponencial a 45 días | 87 |
| Figura 45. | Ajuste a la función error a 45 días | 87 |
| Figura 46. | Perfil de concentración a 60 días | 88 |
| Figura 47. | Linealización del perfil a 60 días | 88 |
| Figura 48. | Ajuste a la curva exponencial a 60 días | 88 |
| Figura 49. | Ajuste a la función error a 60 días | 88 |
| Figura 50. | Coeficientes de difusión natural para 30 días | 90 |
| Figura 51. | Coeficientes de difusión natural para 45 días | 90 |
| Figura 52. | Coeficientes de difusión natural para 60 días | 90 |
| Figura 53. | Fotografías prueba de colorimetría difusión natural relación a/c:0.4, 0.5, 0.6 con microsílice | 91 |
| Figura 54. | Corriente Vs tiempo RCPT con microsílice | 93 |
| Figura 55. | Corriente Vs tiempo RCPT sin microsílice | 93 |
| Figura 56. | Corriente Vs tiempo ACMT con microsílice | 94 |
| Figura 57. | Corriente Vs tiempo ACMT sin microsílice | 94 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|------------------|--|
| Tabla 1. | Compuestos químicos presentes en el clinker 5 |
| Tabla 2. | Compuestos de la hidratación del cemento 9 |
| Tabla 3. | Tipos de cemento 10 |
| Tabla 4. | Tipos de cemento con adiciones 10 |
| Tabla 5. | Superficie específica característica de materiales usados 13 |
| Tabla 6. | Mecanismos de transporte en el concreto 18 |
| Tabla 7. | Penetrabilidad del ion Cloruro, basado en la carga pasante 32 |
| Tabla 8. | Composición química del cemento portland tipo I 34 |
| Tabla 9. | Composición de la microsílíce 35 |
| Tabla 10. | Variables para la elaboración de concreto 36 |
| Tabla 11. | Proporciones 36 |
| Tabla 12. | Distribución de las probetas de acuerdo al tipo de ensayo que se va a utilizar 37 |
| Tabla 13. | Resultados de compresión 39 |
| Tabla 14. | Parámetros de operación DRX 41 |
| Tabla 15. | Resultados DRX muestra sin microsílíce 47 |
| Tabla 16. | Resultados DRX muestra con microsílíce 48 |
| Tabla 17. | Coefficientes de penetración de cloruros respecto el tiempo 57 |
| Tabla 18. | Coefficientes de Difusión para las diferentes relaciones a/c a 30 días de inmersión 60 |
| Tabla 19. | Coefficientes de difusión para las diferentes relaciones a/c 61 |
| Tabla 20. | Profundidad del cloruro en el concreto medida a diferentes tiempos (difusión) 61 |
| Tabla 21. | Profundidad del cloruro en el concreto a partir de ACMT 62 |
| Tabla 22. | Resultados de permeabilidad del ion cloruro 65 |
| Tabla 23. | Equipos utilizados 74 |
| Tabla 24. | Propiedades del agregado 78 |
| Tabla 25. | Análisis granulométrico del agregado fino 78 |
| Tabla 26. | Análisis granulométrico para agregado grueso 78 |
| Tabla 27. | Diseño de mezcla para concreto con a/c: 0.4, 0.5, 0.6 79 |
| Tabla 28. | Resultados de coeficiente del ion cloruro a 45 días 87 |
| Tabla 29. | Resultados de coeficiente del ion cloruro a 60 días 88 |
| Tabla 30. | Carga pasante RCPT 93 |
| Tabla 31. | Carga pasante ACMT 93 |
| Tabla 32. | Corriente Vs tiempo RCPT 94 |
| Tabla 33. | Corriente Vs tiempo ACMT 95 |

LISTA DE ANEXOS

| | | Pág. |
|---------|--|------|
| Anexo A | Equipos utilizados | 73 |
| Anexo B | Propiedades de los materiales | 76 |
| Anexo C | Análisis difracción de rayos X | 80 |
| Anexo D | Perfiles de concentración el ion cloruro | 83 |
| Anexo E | Determinación del coeficiente a partir del perfil de concentración | 86 |
| Anexo F | Determinación del coeficiente a partir de colorimetría | 89 |
| Anexo G | Resultados RCPT y ACMT | 92 |

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA MICROSÍLICE SOBRE EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN APARENTE DEL IÓN CLORURO EN CONCRETOS EXPUESTOS A AMBIENTES CON CLORUROS*

AUTOR: GARCÍA RODRÍGUEZ NANCY ANDREA**

PALABRAS CLAVES: Microsílice, coeficiente, difusión, migración, cloruro, concreto

RESUMEN: Este trabajo presenta el estudio del efecto de la microsíllice sobre las propiedades del concreto, la penetración y el coeficiente de difusión del ión cloruro, en probetas de concreto fabricadas con cemento Portland tipo I y 10% de microsíllice, para tres relaciones agua/cemento (0.4, 0.5 y 0.6). Después de 28 días las probetas con y sin adición fueron caracterizadas mediante ensayos de Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

Posteriormente, estas probetas fueron ensayadas mediante tres métodos: Ensayo de penetración de cloruros por inmersión, Prueba de Resistencia a la Penetración de Cloruros (RCPT) y Prueba Acelerada de Migración de Cloruros (ACMT), con el propósito de evaluar el ingreso del cloruro a través de la matriz cementicia, y determinar el coeficiente de difusión en condiciones no estacionarias a partir de la Segunda Ley de Fick. Para determinar la penetración del ión cloruro se realizaron pruebas de colorimetría y el perfil de concentración de cloruros.

Los resultados muestran un aumento de la resistencia a la penetración del ión cloruro en el concreto con microsíllice, por lo tanto se presentó una disminución en el coeficiente de difusión aparente, además de un incremento considerable de la resistencia mecánica. Los coeficientes de difusión obtenidos por el perfil y por colorimetría presentan una buena correlación experimental.

* Trabajo de Grado

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

ABSTRACT

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

AUTHOR: GARCÍA RODRÍGUEZ NANCY ANDREA**

KEYWORDS: Microsilica, diffusion, migration, coefficient, chloride, concrete.

ABSTRAC: Project shows the study the effect of microsilica on the concrete properties, the penetration and the chloride diffusion coefficient in slabs made of Portland cement tipe I and 10% microsilica, for three water/cement ratios (0.4, 0.5 and 0.6). After 28 days, the specimens with microsilica and without it were characterized by X-ray diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscope (SEM).

Later, these specimen were tested through three methods: Inmersion test, Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (RCPT) and Accelerated chloride migration test, in order to evaluate the chloride ingress through the cement matrix and determinate the diffusion coefficient in non steady state conditions through colourimetric method and chloride profile.

The results show a considerable increasing of the resistance to chloride ion penetration in concrete with microsilica, therefore showed a decrease in apparent diffusion coefficient, in addition to an increase in mechanical strength. The diffusion coefficients obtained from the profile method and colourimetric method shows a good experimental correlation.

* Work of Degree

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

INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es el material más utilizado en la industria de la construcción, gracias a sus prestaciones mecánicas, fácil adaptabilidad en diversos usos y bajo costo. Sin embargo su durabilidad se ve afectada en ambientes agresivos, principalmente en zonas marinas e industriales.¹

En los últimos años, se han llevado a cabo numerosas investigaciones con el objeto de entender, mejorar y controlar varios de los más importantes mecanismos de deterioro como las reacciones álcali-agregado, ciclos de hielo-deshielo, ataques químicos (cloruros, sulfatos o carbonatación) y la corrosión del acero embebido, este último considerado el de mayor amenaza.²

Se ha estimado que el principal problema del concreto reforzado es la corrosión del acero embebido, influyendo negativamente en la durabilidad de las construcciones y siendo la causa de costosas reparaciones para mantener la funcionalidad y seguridad de las estructuras. La corrosión se inicia cuando agentes contaminantes penetran en el hormigón y rompen la capa protectora del refuerzo, despasivando la estructura.³

De todos los mecanismos de la corrosión, la producida por la penetración de los cloruros es la de mayor ocurrencia en zonas costeras y se produce casi en su totalidad por la presencia de cloruros del agua de mar. Este fenómeno es de gran interés, teniendo en cuenta que Colombia posee una variada y dinámica zona costera de 3340 Km de extensión donde se asientan los principales puertos comerciales. Por lo tanto, es necesario estudiar e investigar los problemas de

¹ TORRES, Andrés. Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Madrid.

² FERREIRA, Miguel. Probabilidad basada en el análisis de durabilidad de estructuras de hormigón en medio marino.

³ ANDRADE, C. Manual de Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras, C.S.I.C., Madrid, 1989.

corrosión en nuestra costa, para garantizar la seguridad y economía de las estructuras.⁴

Actualmente la infraestructura de concreto reforzado está sufriendo un deterioro acelerado, en muchos casos sin haber cumplido con la vida útil para la cual fue diseñada. Es por ello que cabe resaltar, la incorporación de adiciones naturales y artificiales, que pueden contribuir de manera positiva en el mejoramiento de una o varias de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o de costo. Por ejemplo la adición de microsílíce a la mezcla de concreto, permite la producción de hormigones de alta prestación (HCP), los cuales tienen elevada resistencia mecánica y durabilidad aun en ambientes agresivos.⁵ Por esta razón se decidió estudiar la influencia de la microsílíce sobre el coeficiente de difusión del ion cloruro y su contribución a la vida útil de las estructuras de concreto.

Este trabajo se desarrolló en el marco 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” dirigido por el Grupo de Investigaciones en Corrosión, financiado por Colciencias, la Armada Nacional, Universidad de Antioquia y la Universidad Industrial de Santander.

⁴ GONZALES, Manuel. La corrosión del concreto en ambiente marino. I Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción, American Concrete Institute, Capítulo Peruano, 1998.

⁵ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytet 1999.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la microsílíce sobre el coeficiente de difusión aparente de cloruros en concretos expuestos a ambientes con cloruros.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la influencia de la variación de la relación agua/cemento y la microsílíce, sobre las propiedades físicas y químicas del concreto.
- Determinar cuantitativamente la difusión del ión cloruro en el concreto con microsílíce, mediante ensayos de difusión y migración.

1. GENERALIDADES DEL CONCRETO

1.1 CONCRETO REFORZADO

También conocido como hormigón armado, se define como un material compuesto, que consta de la unión entre el concreto y acero de refuerzo, cuyas propiedades mecánicas se combinan con el fin de satisfacer las demandas de compresión y tracción respectivamente.

El concreto es un producto resistente a la compresión y frágil a cargas de tensión y flexión, además tiende a agrietarse desde su fabricación. Es por esto que se requiere el uso del acero de refuerzo para mejorar la capacidad del concreto a la aplicación de estas cargas.⁶

1.2 CONCRETO

El concreto se produce mezclando el cemento con los agregados finos y gruesos (arena y grava) más la adición de agua, a los cuales es posible incorporar en algunos casos otros materiales como aditivos y adiciones, con el propósito de lograr otras propiedades. La adición de agua a estos componentes produce un conglomerado sólido, de apariencia densa, pétreo compacta y porosa, el cual permite la entrada de líquidos y gases que provienen del exterior.

⁶ R. Velázquez Gonzalez. Electrochemical evaluation of the corrosion in grade in reinforce steel in the presence of admixtures. Portugaliae Electrochimica Acta 23 (2005) 179-194.

1.3 COMPONENTES DEL CONCRETO Y SUS PROPIEDADES

1.3.1 Cemento

Puede definirse como un material pulverizado que además de óxido de calcio, contiene sílice, alúmina, óxido de hierro y algunos componentes menores que por adición de una cantidad de agua, forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables.⁷

El cemento Portland es una mezcla de piedra caliza y arcilla, previamente triturada y sometida a cocción hasta sinterización a una temperatura alrededor de 1482°C, la cual recibe el nombre de *clinker*, que posteriormente se pulveriza junto con el yeso, material regulador de fraguado, para formar un polvo fino no menor de 1600cm²/g de superficie específica Blaine. En la tabla 1 se muestran los principales compuestos, sus fórmulas químicas y abreviaturas utilizadas a lo largo del texto.

Tabla 1. Compuestos químicos presentes en el clinker

| COMPONENTE | FORMULA | ABREVIATURA | NOMBRE DEL MINERAL |
|-------------------------------|--|--------------------|--------------------|
| Silicato tricálcico | 3CaO.SiO ₂ | C ₃ S | Alita |
| Silicato bicálcico | 2CaO.SiO ₂ | C ₂ S | Belita |
| Aluminato tricálcico | 3CaO.Al ₂ O ₃ | C ₃ A | Felita |
| Ferritoaluminato tetracálcico | 4CaO. Al ₂ O ₃ | C ₄ AF | Celita |
| Ferrito bicálcico | 2CaO.Fe ₂ O ₃ | C ₂ F | - |
| Óxido cálcico (cal libre) | CaO | C | - |
| Óxido magnésico | MgO | M | - |
| Álcalis: | | | |
| ▪ Óxido Sódico | Na ₂ O | N | - |
| ▪ Óxido Potásico | K ₂ O | K | - |
| Sulfato cálcico: | | | |
| ▪ Dihidrato | CaSO ₄ .2H ₂ O | CSH ₂ | - |
| ▪ Hemihidrato | CaSO ₄ .1/2H ₂ O | CSH _{0.5} | - |
| ▪ Anhidrita | CaSO ₄ | CS | - |

Fuente: Mejía de Gutiérrez, 1999

⁷ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytel 1999.

Los principales compuestos del *clinker* son los silicatos, los cuales constituyen del 60 al 80% del peso del cemento portland y son los responsables de su resistencia mecánica:

Silicato tricálcico (C₃S): es el principal constituyente del *clinker* aportándole altas resistencias al concreto en los primeros días.

Silicato Bicálcico (C₂S): es un constituyente metaestable que ofrece poca resistencia en los primeros días, pero la va desarrollando progresivamente hasta alcanzar al C₃S.

Aluminato Tricálcico (C₃A): Por sí solo este constituyente aporta muy poca resistencia, pero en presencia de silicatos, mejora la resistencia inicial. Es importante tener en cuenta que los *clinkers* que poseen un alto contenido de este componente dan lugar a pastas, morteros y hormigones muy sensibles a ataques por sulfatos. Sin embargo este componente tiene la capacidad de adherir al cloruro, reduciendo el riesgo de corrosión en las armaduras.

Ferrito Aluminato tetracálcico (C₄AF): tiene muy poca importancia en la resistencia del cemento; la finalidad del óxido de hierro es actuar como fundente durante la cocción de crudo.

Existen otros componentes que hacen parte del *clinker*, considerados como secundarios: CaO, MgO, K₂O y Na₂O. ⁸

⁸ 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.

1.3.1.1 Proceso de hidratación del cemento.

Al agregar agua al cemento portland se produce una reacción entre sus constituyentes y el agua, provocando una disolución, seguido de una difusión y precipitación de los componentes hidratados. Por esta razón se producen diferentes formas morfológicas de los compuestos mencionados en la tabla 1.

- El silicato tricálcico reacciona rápidamente con el agua formando la *Portlandita* (CH) y la *Tobermorita*, que tiene carácter coloidal y se le conoce también como *gel* CSH.



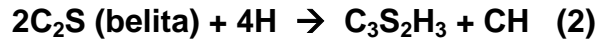
La fase CSH, constituye entre el 50 al 60 % del volumen de los sólidos de la pasta completamente hidratada, siendo el compuesto que más aporta a la resistencia mecánica del material. Se caracteriza por ser una fase poco cristalina, de composición química y morfología variable.

El *hidróxido cálcico* (CH) o *Portlandita* constituye del 20 al 25 % del volumen de los sólidos de la pasta completamente hidratada. A diferencia del CSH, se caracteriza por ser una fase cristalina, constituida por cristales de forma plana y hexagonal; además posee una composición química definida $Ca(OH)_2$. Su morfología y tamaño puede variar en función de la relación a/c y agentes extraños. Su contribución a la resistencia del cemento o del concreto es mínima, debido al gran tamaño y baja superficie específica de los cristales, haciendo que sus fuerzas de enlaces sean débiles.

Elevados contenidos de CH en la pasta, disminuyen la durabilidad química del cemento ya que tienden a solubilizarse en medios acuosos o en presencia de sustancias ácidas. Sin embargo en concretos reforzados el CH es el responsable

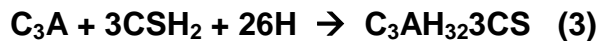
de generar la película pasiva sobre el acero, disminuyendo el riesgo de corrosión en las estructuras.

- El silicato bicálcico reacciona más lentamente de la siguiente forma:



- El aluminato tricálcico reacciona rápidamente con el agua, causando un endurecimiento rápido. Para evitarlo se agrega al *clinker* yeso dihidrato (CSH₂) con el fin de hacer la mezcla trabajable. El yeso y el aluminato reaccionan para formar:

Sulfoaluminato cálcico hidratado insoluble, también conocido como *ettringita* (fase Af_f)



y Monosulfoaluminato hidratado (fase Af_m)



Los sulfoaluminatos cálcicos (Af_f y Af_m) contribuyen entre el 15 al 20 % del volumen de los sólidos en la pasta del cemento. Aunque aportan poca resistencia mecánica, son necesarios porque ofrecen otras cualidades a la pasta.

La *ettringita* (C₆AS₃H₃₂) se produce en las primeras etapas de la hidratación, y presenta forma es de agujas prismáticas⁹

En la tabla 2 se muestran los principales compuestos hidratados del cemento, sus formulas químicas y abreviaturas utilizadas a lo largo del texto.

⁹ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytel 1999.

Tabla 2. Compuestos de la hidratación del cemento

| COMPONENTE | FORMULA | ABREVIATURA | NOMBRE DEL MINERAL |
|--------------------------------------|---|--|--------------------|
| Silicato tricálcico hidratado | $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | CSH | Tobermorita |
| Hidróxido cálcico | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | CH | Portlandita |
| Aluminato cálcico hidratado | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ | C_4AH_{13} | - |
| Sulfoaluminato cálcico hidratado | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ | $\text{C}_3\text{A} \cdot (\text{CS})_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ó $\text{C}_3\text{A}(\text{CS})_3\text{H}_{32}$ | Ettringita |
| Monosulfoaluminato cálcico hidratado | $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ | $\text{C}_3\text{A} \cdot (\text{CS})_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ó $\text{C}_3\text{A}(\text{CS})\text{H}_{12}$ | - |
| Trisulfoferrito cálcico hidratado | $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ | $\text{C}_3\text{F} \cdot (\text{CS})_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ó $\text{C}_3\text{F}(\text{CS})_3\text{H}_{32}$ | Ettringita férrica |
| Hidróxido magnésico | $\text{Mg}(\text{OH})_2$ | MH | Brucita |

Fuente: Mejía de Gutiérrez, 1999

Durante el proceso de hidratación, la pasta de cemento pasa por dos etapas de vital importancia para su morfología, que le ayudan a alcanzar mejores propiedades mecánicas:

- **Fraguado:**

Es el cambio del estado fluido al estado rígido. Este es causado por una hidratación selectiva de algunos componentes del cemento, siendo el Aluminato tricálcico (C_3A) y el Silicato tricálcico (C_3S) los que más rápido reaccionan, sin embargo, debido a la adición de yeso se retrasa la formación del C_3A hidratado y por lo tanto el C_3S fraguará primero.

- **Curado**

Este proceso se realiza con el fin de prevenir la evaporación del agua en el concreto, manteniendo la humedad (100%) para que se lleve a cabo satisfactoriamente la hidratación de los materiales cementantes y el endurecimiento apropiado del concreto. El propósito es mantener el concreto saturado, con el fin de que los productos de hidratación del cemento llenen los espacios de la pasta fresca (de concreto) que al principio estaban llenos de agua.¹⁰

¹⁰ DEL VALLE, Angélica et al. El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001.

1.3.1.2 Clasificación de los cementos.

Atendiendo a la naturaleza de sus componentes, los cementos pueden clasificarse en varios tipos, según las Normas Americanas ASTM C150. En Colombia las especificaciones de calidad son establecidas por el ICONTEC según las normas NTC 212 y 321. La tabla 3 muestra la clasificación de los cementos según la ASTM.

Tabla 3. Tipos de cementos

| | |
|----------|--|
| TIPO I | Uso general. El normal en el mercado. |
| TIPO II | Moderado calor de hidratación y resistencia a los sulfatos que atacan el concreto. |
| TIPO III | Alta resistencia inicial (alto calor de hidratación). |
| TIPO IV | Para usar cuando se desea un bajo calor de hidratación. |
| TIPO V | Alta resistencia a los sulfatos. |

Fuente ASTM C150

En cuanto a los cementos adicionados, la norma ASTM C195, los clasifica como:

Tabla 4. Tipos de cemento con adiciones

| | |
|-------------|--|
| TIPO IS | Cemento Portland con escoria de alto horno, de uso general. Su contenido en escoria puede variar entre 25 – 70 %. |
| TIPO IP | Cemento Portland con puzolana, de uso general. Su contenido adicionado puede variar entre 15-40%. |
| TIPO P | Cemento Portland con puzolana, para uso donde no se requiera altas resistencias a edades tempranas. (15-40 %) |
| TIPO S | Cemento de escoria, puede utilizarse con cemento, adicionado con un contenido mayor al 70 %. |
| TIPO I (PM) | Cemento Portland modificado con puzolana, para uso general. El contenido de puzolana adicionado debe ser menor al 15%. |
| TIPO I (SM) | Cemento Portland modificado con escoria, para uso general. El contenido de puzolana adicionado debe ser menor al 25%. |

Fuente: ASTM C595

1.3.2 Adiciones

En los últimos años ha surgido en los países industrializados una gran preocupación por las emisiones de CO₂, producto de la fabricación del cemento Portland. Su elaboración a partir de la utilización de adiciones minerales con

reemplazos parciales del *clinker* permite la disminución de emisiones de CO₂; esto explica el incremento en los últimos tiempos de los cementos adicionados.

Las adiciones utilizadas, por lo general son de más bajo costo que el cemento Portland; las cuales pueden reaccionar con los productos obtenidos de las reacciones de hidratación del cemento o ellas mismas pueden ser materiales hidráulicos, es decir reaccionar con el agua. Es posible agregar estos materiales al cemento Portland durante su etapa de fabricación o adicionarse a la mezcla sustituyendo parcialmente el cemento Portland.

Las adiciones se definen como materiales orgánicos naturales o artificiales que se agregan con la finalidad de mejorar algunas propiedades como la fluidez, reducción de la permeabilidad, aceleración o disminución del tiempo de fraguado, así como para incrementar la resistencia a la corrosión del refuerzo de acero. Estos elementos son adicionados en pequeñas cantidades y el uso de ellos depende de la propiedad que se requiera.¹¹

Las adiciones más utilizadas son la ceniza volante, escoria de alto horno y microsilíce, las cuales se pueden clasificar de acuerdo a su comportamiento físico-químico, en adiciones activas químicamente e inactivas químicamente. En ambos casos se presentan una particular morfología caracterizada por pequeñas esferas abiertas y elevada superficie específica, lo que da lugar a una estructura más compacta.¹²

Las adiciones minerales activas presentan la capacidad de formar productos de hidratación similares a los que se producen durante la hidratación del *clinker*,

¹¹ HERNANDEZ Rodolfo, Efecto del ion cloruro en el acero de refuerzo expuesto a soluciones simuladas de concreto. 1999

¹² MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytel 1999.

mientras que las inactivas, si bien no presentan esta capacidad, suelen mejorar otras propiedades como la trabajabilidad y la resistencia temprana.¹³

Uno de los materiales adicionados más comúnmente al cemento es el **Humo de Sílice** también conocido como microsílíce, la cual se define como una puzolana artificial que se deriva de la fabricación de aleaciones de ferrosilicio, donde al condensarse los vapores de óxido de silicio a baja temperatura da lugar a una sílice amorfa de elevada área superficial.

La microsílíce es un conjunto de partículas vítreas muy finas de forma esférica y diámetro muy pequeño, cuya superficie específica está en el orden de 200.000 cm²/gr. La distribución por tamaños indica que las partículas tienen un diámetro promedio de 0.1 micrómetros, el cual es aproximadamente 100 veces menor que el diámetro promedio de las partículas de cemento.

La composición química de la microsílíce es muy constante, aunque puede tener algunos cambios dependiendo de la aleación de silicio que se está produciendo y la naturaleza de las materias primas. En la composición química predomina el SiO₂ con el 90 al 96%.

La alta superficie específica y el gran contenido de dióxido de sílice amorfa proporcionan propiedades excepcionales puzolánicas. En la tabla 5 se muestran los rangos para los valores de superficie específica de algunos materiales.¹⁴

Tabla 5. Superficie específica característica de materiales usados

| Material | Superficie específica (cm ² /gr) |
|------------------|---|
| Microsílíce | 200000 |
| Escorias | 3500-6000 |
| Cemento Portland | 3000-4000 |

Fuente: www.concrete.0catch.com/Capitulo21.htm. Portugal 2007.

¹³ BECKER, Eduardo. CEMENTO DE ALTO HORNO Características y Recomendaciones de Uso. Asesoría técnica. Loma negra.

¹⁴ Materiales para la producción de concretos de alto desempeño.2007

La puzolana se define como un material silíceo o silico-aluminoso que por sí mismo posee poco o ningún valor cementicio pero finamente molido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido cálcico a temperatura ordinaria y forma compuestos de propiedades cementantes.

La actividad puzolánica hace referencia a la máxima cantidad de hidróxido de calcio con la que la puzolana puede combinar y a la velocidad con la cual ocurre esta reacción. La reacción ocurre de la siguiente forma:

Puzolana + cal + agua → silicatos y aluminatos de calcio hidratados

Los productos de la reacción Puzolana/cal son generalmente del mismo tipo que los productos de hidratación del cemento Portland (silicatos cálcicos hidratados, aluminatos cálcicos hidratados y silico-aluminatos cálcicos hidratados)

Al incorporar la puzolana (microsilíce) al cemento Portland, esta reacciona con la *portlandita*, disminuyendo su contenido final en la mezcla. Esta reacción en la mayoría de los casos llega a materializarse después de los 7 o 15 días de producida la mezcla y da lugar a modificaciones en las reacciones de hidratación, en cuanto a velocidad, composición y microestructura de las fases hidratadas.

La actividad puzolánica depende de la naturaleza y proporción de las fases activas de la puzolana, de la reacción cal/puzolana de la mezcla, de la finura o de la superficie específica de la puzolana y de la temperatura de la reacción. ¹⁵

La microsilíce incrementa la resistencia del concreto, principalmente por la fuerte adherencia entre la pasta y las partículas del agregado. Existe una zona de transición entre la pasta y las partículas del agregado grueso; esta zona contiene más vacíos debido a la acumulación del agua de exudación y la dificultad de

¹⁵ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cyted 1999.

acomodar las partículas sólidas cerca a la superficie. Relativamente más *hidróxido de calcio* (CH) se forma en esta región que en el resto.

Sin la adición de microsilíce el tamaño de los cristales del *hidróxido de calcio* es mayor, y tienden a estar fuertemente orientados en forma paralela a las partículas de agregado. Debido a la combinación del tamaño de los cristales y a altos contenidos de vacíos la zona de transición se hace más débil, disminuyendo resistencia del concreto. ¹⁶

1.3.3 Agregados¹⁷

Las características y propiedades de los agregados son factores que influyen considerablemente al momento de diseñar una mezcla de concreto, ya que ocupan aproximadamente del 60 al 75 % del volumen del concreto y afectan sus propiedades físicas y mecánicas. En el concreto convencional, los agregados se han clasificado en agregado fino (arena) y agregado grueso (grava).

El agregado fino o arena se define como las partículas de agregado menores de 4.75mm pero mayores de 75 μm , es decir es la porción de material que pasa por malla No 4 (4.75 mm) y es retenido por malla No 200 (0.075 mm).

La arena consiste en partículas que por lo general presentan forma cúbica, duras, fuertes, y limpias, previamente lavada, tamizada, clasificada y mezclada, según se requiera para producir un agregado fino aceptable que cumpla con los requisitos establecidos en la norma ASTM C33.

El análisis granulométrico de la arena se complementa calculando su modulo de finura, el cual equivalente a la centésima parte de la suma de los porcentajes retenidos acumulados en cada una de las mallas de la serie. Por lo general se encuentran en el rango de 2.30 a 3.10.

¹⁶ Materiales para la producción de concretos de alto desempeño.2007

¹⁷ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytel 1999.

El agregado grueso se define como las partículas mayores de 4.75 mm, es decir retenido en la malla No 4, debe estar limpio y exento de de partículas alargadas o blandas, materia orgánica y otras sustancias perjudiciales.

1.3.4 Agua

El agua a utilizar en la mezcla influye significativamente en el comportamiento y propiedades del concreto; el agua debe estar exenta de impurezas tales como aceite, ácidos, álcalis, sales, sedimentos, materia orgánica u otras sustancias perjudiciales. La norma ASTM C 94 establece los requisitos que debe cumplir el agua para mezclas de concretos.

1.3.5 Aditivos¹⁸

Según las normas: ICONTEC 1299 y ASTM C 494, los aditivos se definen como sustancias que son incorporadas al concreto durante su proceso de mezclado con el fin de mejorar una o varias de sus propiedades, como:

Incrementar la trabajabilidad sin aumentar o disminuir el contenido de agua.

- Retardar o acelerar el tiempo de fraguado inicial.
- Modificar la rapidez o la capacidad de sangrado.
- Reducir la exudación y segregación.
- Modificar las propiedades del concreto endurecido (aumentar la resistencia y la durabilidad)

¹⁸ LOPEZ, Raquel. Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. Publicación Técnica No 292 Sanfandila, Qro 2006

2. DURABILIDAD DEL CONCRETO

Con los años una infraestructura del concreto reforzado tiene un deterioro acelerado, en muchos casos sin haber cumplido con la vida útil para la cual fue diseñada. La pérdida de protección natural ofrecida a la armadura por el recubrimiento de concreto, puede ocurrir a través de diversos mecanismos presentes en el ambiente, el cual es un factor muy importante para su durabilidad.

De acuerdo con el ACI (Comité 201) la durabilidad del concreto se define como la capacidad que tiene para resistir a la acción de la intemperie, el ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Esto es, un concreto durable retiene su forma original, calidad y serviciabilidad expuesto al ambiente.¹⁹

Existen diversos factores que afectan la durabilidad de una estructura de concreto armado; la calidad de sus componentes y la dosificación empleada influyen en las propiedades y en el periodo de vida útil. La barrera de protección que le proporciona el concreto a la varilla de acero es reforzada por el valor de pH alcalino que se alcanza después de las reacciones de hidratación del cemento, que pasivan al elemento metálico y lo protegen químicamente. Sin embargo, la interacción con el medio ambiente provoca que la protección se vea disminuida.

2.1. MECANISMOS DE DETERIORO

Muchos de los factores físicos, químicos o físico-químicos, conducen finalmente a la corrosión del refuerzo de las armaduras. Independientemente de cuál sea la categoría especificada, se reconoce la influencia de los componentes del concreto y su ubicación geográfica sobre la vida útil de la estructura.

¹⁹ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytod 1999

Los mecanismos físicos de deterioro se asocian con la disolución de compuestos de la pasta en el medio, con pérdida de masa, aumento de porosidad y caída de resistencia.

Los mecanismos químicos corresponden al intercambio de iones de la pasta con el medio dando lugar a compuestos solubles o no, pero de carácter no expansivo que finalmente causan efectos similares a los físicos. El fisicoquímico combina los dos conceptos anteriores, dando lugar a la formación de compuestos de tipo expansivo que provoca tensiones internas y que llevan a la fisuración y posible desintegración del componente.

Dentro de los diferentes mecanismos de deterioro, Rostam considera relevante los siguientes:

- Corrosión de la armadura
- Reacción árido – álcali
- Ataques químicos (cloruros, sulfatos o carbonatación)
- Ciclos de hielo – deshielo ²⁰

Para el desarrollo de este trabajo solo se tendrá en cuenta el ataque químico por cloruros.

2.1.1 Ataque por cloruros

El concreto es un sólido poroso, donde el agua es la causa de muchos procesos físicos de degradación y a su vez actúa como vehículo de transporte de los iones agresivos. Existen varias propiedades que controlan el transporte de los agentes agresivos hacia el interior del concreto. Entre ellas se encuentran:

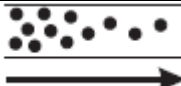


La *permeabilidad* que se define como la propiedad que permite el paso de un fluido a través de un material saturado bajo la acción de presión diferencial; la

²⁰ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cyted 1999

difusión que corresponde al movimiento iónico bajo la acción de un gradiente de concentración y la *absortividad* que es la propiedad que caracteriza la tendencia de un material poroso para absorber y transmitir agua por capilaridad.

Mediante estos mecanismos de penetración ingresan los aniones cloruro al interior del concreto y generan corrosión en las armaduras. En hormigones totalmente saturados el mecanismo predominante es la *difusión*, mientras que en hormigones parcialmente saturados los mecanismos asociados son los de *absorción* y *fuerza capilar*.²¹

Tabla 6 Mecanismos de transporte en el concreto

| Mecanismos de transporte de agentes agresivos | | |
|---|--|------------------------|
| Tipo | Fuerza conductora | Poros |
| Difusión (iones y gases) |  <p>Movimiento iónico bajo la acción de un gradiente de concentración dc</p> | Llenos de agua o aire |
| Succión capilar (líquidos) |  <p>Tensión superficial (s) de contacto (q)</p> | Llenos con aire |
| Permeación (gases y líquidos) |  <p>Diferencia de presión absoluta dp</p> | Llenos con aire o agua |

Fuente: BÖHNI, Hans, 2005.

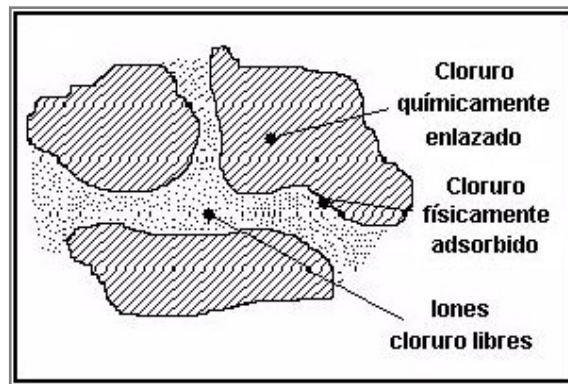
Los iones cloruros llegan al concreto por medio de agregados contaminados, aguas, cementos y aditivos durante el amasado; también pueden penetrar desde el exterior al hormigón endurecido a través de la red de poros como consecuencia de atmosferas y/o ambientes marinos. Tal es el caso de las estructuras expuestas a este ambiente, donde los iones cloruro están presentes en el agua de mar, pero es posible que también el viento de la brisa marina los desplace a la zona costera

²¹ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytel 1999.

y los deposita en estructuras de concreto cercanas a la línea de mar. Otra fuente de cloruros es en el agua de amasado, lo cual aumenta el alto riesgo de corrosión.

Cuando los cloruros penetran a la estructura desde el exterior, lo hace a través de los poros del concreto. Al avanzar al interior una cantidad reacciona, otra se adsorbe y otra fracción queda disuelta. La Figura 1 ilustra los tres casos de cloruros presentes en el concreto.

Figura 1. Tipos de cloruros presentes en el concreto



Fuente: Del Valle Moreno, 2001

Cloruro libre: es el que permanece disuelto en el agua que contiene los poros. Se desplaza por el interior del concreto mediante difusión u otros mecanismos.

Cloruro enlazado: es el que permanece unido a las fases sólidas del concreto. Este cloruro queda inmovilizado, sin posibilidad de moverse hacia el interior.

Cloruro total: Es la cantidad total de cloruro que contiene el concreto, sin hacer distinción entre el cloruro libre y enlazado.

Los iones cloruro que son dañinos para el acero de refuerzo son los que se hallan disueltos o libres, pero debido a los equilibrios que se presentan es posible que los que están adsorbidos se incorporen a la disolución y se tornen peligrosos.²²

²² DEL VALLE, Angélica et al. El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001

2.1.2 Difusión y Absorción

El anión cloruro (Cl^-) entra como ión a la estructura a través de los poros del concreto por un mecanismo de *difusión* pura o combinada con el transporte del agua en la forma de succión capilar y evaporación, y se ubica en los poros interiores del hormigón, parcial o totalmente llenos de agua, donde parte de estos iones son enlazados por los componentes del cemento mediante mecanismos químicos (reacción) y físicos (adsorción).

Por ejemplo en una estructura sumergida en agua de mar, el mecanismo lo determina la diferencia de concentración entre el exterior y el interior del concreto, es decir, se favorece un *proceso difusivo*. En obras que se hallan a la intemperie, durante el día, por efecto de la humedad relativa del ambiente, se evapora una cierta cantidad de agua contenida en los poros, quedando parcialmente llenos. Si la brisa marina deposita sal sobre su área superficial, el ingreso del ion es por *succión capilar*, es decir que la humedad relativa permite la formación de una película superficial de agua (punto de rocío) que es succionada por los poros capilares para llenarse nuevamente. En la succión, la sal que se depositó durante el día es arrastrada por el agua condensada y penetra al interior del concreto. Una combinación de las dos formas de ingreso de cloruro se observa en la zona de variación de marea, en la que los poros eliminan agua durante marea baja y se saturan en marea alta.²³

En el proceso de penetración de cloruros se produce un perfil, ya que el contenido en anión cloruro decrece en la superficie hacia el interior. Esto finalmente produce la corrosión de las armaduras metálicas del concreto, cuyo riesgo dependerá de la resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro y de su capacidad de enlace.

²³ DEL VALLE, Angélica et al. El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001

El contenido del anión cloruro y su profundidad de penetración son función de algunos factores como: la temperatura, la relación agua /cemento, tipo de cemento Portland (Contenido de C_3A y superficie específica *Blaine*), adiciones activas o no, presentes.

La reacción que ocurre entre el aluminato tricálcico del cemento Portland y el anión cloruro produce modificaciones en la estructura del concreto, dando lugar a la formación del compuesto $C_3A.CaCl_2.H_2O$, conocido comúnmente como *sal de friedel* principal responsable de la fijación de cloruros, que no resulta ser expansiva.²⁴

La porosidad del concreto es sin duda otro factor crucial en todos estos fenómenos, ya que la penetración será más rápida cuando la porosidad del concreto sea mayor. Así, para bajas relaciones a/c y relativamente altos contenidos en cemento, es posible lograr velocidades lentas de penetración de los cloruros. El tipo de cemento y su capacidad de retener o combinar cloruros es otro de los parámetros relevantes del proceso.²⁵

La penetración del ion cloruro al interior del concreto no es solo función de la porosidad total del material sino que también depende del diámetro de los poros, su distribución y continuidad.

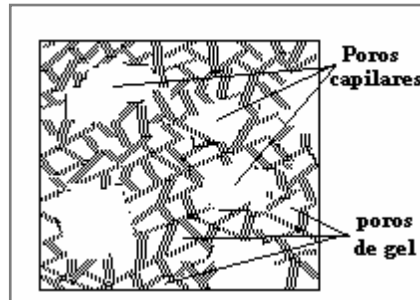
La pasta de cemento fresco es una red de partículas de cemento en agua, pero una vez que la pasta ha fraguado, su volumen permanece constante. En cualquier etapa de hidratación la pasta endurecida consta de varios compuestos hidratados, denominados colectivamente como gel de cristales de $Ca(OH)_2$, algunos componentes menores, cemento no hidratado y residuos de los

²⁴ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytel 1999.

²⁵ LOPEZ, Raquel. Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. Publicación Técnica No 292 Sanfandila, Qro 2006

espacios rellenos de agua en la pasta fresca. Estos huecos se denominan poros capilares, pero dentro del gel mismo existen huecos intersticiales llamados poros de gel. Por lo tanto, a nivel microestructural en una pasta deshidratada hay dos clases distintas de poros, ilustrados en la figura 2.²⁶

Figura 2. Estructura del gel de cemento



Fuente: Del Valle Moreno, 2001

Los poros de gel o interlaminares, tienen un tamaño entre 5 y 25 Å, por lo tanto su influencia sobre las propiedades mecánicas y permeabilidad se pueden considerar mínimas.

Los poros capilares son espacios vacíos generalmente interconectados y abiertos hacia el exterior permitiendo la entrada de un fluido, por lo tanto son considerados la principal vía de acceso de agentes agresivos desde el exterior. Su tamaño está comprendido entre 5µm y 18 Å y es función de la relación a/c y del tiempo de hidratación de la pasta del cemento.

A partir de estos conceptos se evidencia que la permeabilidad es función directa de la porosidad capilar, pues estos poros abiertos a la superficie son los que permiten la entrada de agentes agresivos.²⁷

²⁶ DEL VALLE, Angélica et al. El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001.

²⁷ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytel 1999.

2.2 COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

El coeficiente de difusión de cloruro es altamente dependiente de la composición del concreto; su determinación experimental se realiza por métodos convencionales (ensayos de celda de difusión o ensayos de inmersión).

En las pruebas de inmersión las muestras de concreto se mantienen sumergidas en una solución que contienen cloruro. El ingreso del ión cloruro se mide después, de retirar la probeta de la solución a ciertos periodos de tiempo, realizando un posterior análisis químico a la muestra de concreto pulverizada.

El coeficiente de difusión aparente puede obtenerse mediante métodos basados en la segunda ley de Fick sobre los perfiles de cloruro obtenidos. También es posible determinar el coeficiente a partir de pruebas de migración, aplicando un campo eléctrico, los cuales consumen menor tiempo.

En la literatura actual hay una gran cantidad de desacuerdos con respecto a la terminología de los coeficientes de difusión. Existen el coeficiente de difusión real (D), efectivo (D_{eff}), aparente (D_a), en estado estable (D_{ss}), en estado no estable (D_{nss}), potencial (D_p) y otros. Específicamente se tendrá en cuenta el coeficiente de difusión aparente el cual permite conocer la resistencia a la penetración del cloruro en el concreto y es calculado en estado no estacionario teniendo en cuenta la reacción del cloruro con la pasta de cemento.²⁸

²⁸ BÖHNI, Hans. Corrosion in reinforced concrete structures. Woodhead Publishing Ltd y CRC Press, Cambridge, 2005.

3. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA PENETRACIÓN DE CLORUROS EN CONCRETO

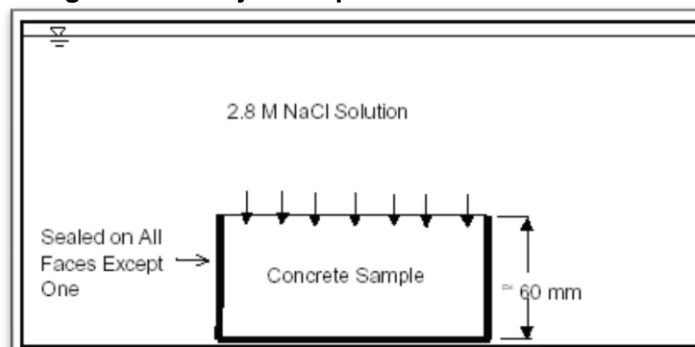
Existen diversos métodos para evaluar la penetración del ion cloruro en el concreto (*difusión y migración*), algunos desarrollados a escala de investigación y otros normalizados, como:

3.1 PRUEBA DE DIFUSIÓN NATURAL²⁹

Es un método común para medir la penetración de cloruros en el concreto, basado en la norma NordTest, NTBuild 443-94.

Las probetas son recubiertas con una resina epoxi alrededor de su cuerpo dejando una cara expuesta al medio y posteriormente sumergidas en un recipiente con solución salina al 3% (p/v) durante un periodo de 30, 45 y 60 días. Una vez cumplido este tiempo de exposición se analiza el contenido del ión cloruro a diferentes profundidades, con el objetivo de determinar el coeficiente de difusión basado en la determinación del perfil de concentración y el método de colorimetría. La figura 3 ilustra el montaje de la prueba.

Figura 3. Montaje de la prueba de difusión natural



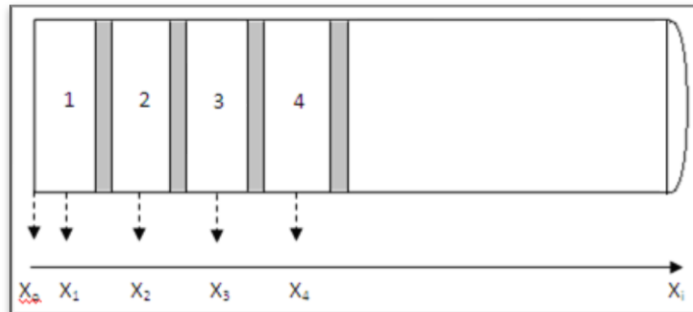
Fuente: NordTest, NTBuild 443-94.

²⁹ Concrete hardened: accelerated chloride penetration. NT BUILD 443, 1995.

3.2 PERFIL DE CONCENTRACIÓN³⁰

Este método permite la toma de muestras a diferentes profundidades de una probeta de concreto, para un posterior análisis de la concentración del anión cloruro.

Figura 4. Medida de profundidad para extracción de muestras



Fuente: Mejía de Gutiérrez, 1999

A partir de este ensayo se determina el contenido de cloruros libres en el concreto, mediante el siguiente procedimiento: (basado en la norma ASTM C 1218 y ASTM C114)

3.2.1. Extracción de muestras

Se realiza la extracción de muestras a diferentes profundidades de la probeta de concreto (1-2-3-4-5 cm), normalmente utilizando un taladro de árbol teniendo especial cuidado para evitar la contaminación de la muestra, por lo tanto se requiere el uso de guantes para la manipulación de la probeta. Se debe obtener una muestra de concreto pulverizado de aproximadamente 10 g, con una finura tal que todo el material pase por malla No 20.

³⁰ LIZARAZO, Juan. Ensayos típicos en la determinación de la durabilidad del concreto. Universidad Nacional de Colombia.

3.2.2. Titulación potenciométrica

El procedimiento consiste en realizar una digestión a la muestra pulverizada de concreto, por medio de una dilución en 50 ml de agua destilada y una posterior ebullición durante 5 minutos. Después de 24 horas de reposo se filtra la muestra y se acidula el filtrado con una solución de ácido nítrico (1:1) y se adiciona peróxido de hidrógeno (solución al 30%), se coloca a hervir durante pocos segundos y se filtra nuevamente, utilizando un papel de filtro de textura gruesa, se adiciona luego 2ml de cloruro de sodio. Esta solución se coloca en un agitador magnético y se sumergen los electrodos agitando lentamente. Utilizando una bureta se agrega periódicamente una cantidad determinada de una solución patrón de nitrato de plata, y se registra las variaciones en el potencial hasta lograr el punto de equivalencia y el volumen utilizado en la bureta para lograr este punto.[19] [20]

Con base en la curva de perfil (concentración de cloruros-profundidad) puede determinarse el coeficiente de difusión D , aplicando la segunda ley de Fick:

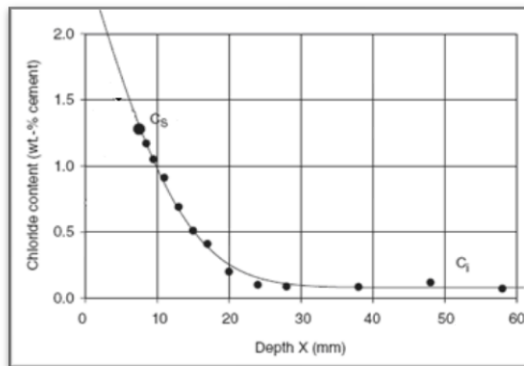
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

C : la concentración del ion cloruro; x : distancia de penetración; t : tiempo;

D_p : Coeficiente de difusión

Figura 5. Perfil típico de concentración de cloruros



Fuente: BÖHNI, Hans, 2005.

▪ **Ajuste del perfil de concentración a la curva exponencial**

Para la aplicación de esta ecuación se asume un medio semi-infinito. El valor de la difusión es constante y puede calcularse como:

$$m = \int_0^{\infty} C dt, \quad t \geq 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

Para el ensayo de difusión natural se tienen en cuenta las siguientes condiciones: $C = 0, x > 0, t = 0$; Condición de frontera: $C = 0, x = \infty, t \geq 0$; Condición con punto infinito: $C = \infty, x = 0, t = 0$. Para obtener la siguiente solución:

$$C = \frac{m}{\sqrt{\pi D_{n1} t}} \exp \frac{-x^2}{4D_{n1} t} \quad \text{Ecuación 3}$$

D_{n1} : Coeficiente de difusión para el ensayo de difusión natural determinado a partir del ajuste a la función exponencial. (D_p)

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

La difusión de cloruro en concreto está controlada por la segunda ley de difusión de Fick (Ecuación 1)

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: $C_{Cl} = C_0, x = \infty, t > 0$; se obtiene la solución de la ecuación (1):

$$C = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_{n2} t}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde $\operatorname{erf}(y)$ es la función error.

D_{n2} es el coeficiente de difusión aparente del ensayo natural a partir la función error.³¹

³¹ 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

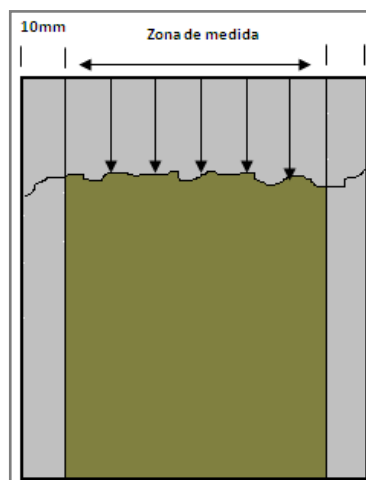
3.3 MÉTODO COLORIMÉTRICO

El método utilizado es similar a la prueba descrita en NT BUILD 492, NORDTEST. El procedimiento consiste en:

Dividir la muestra axialmente en dos pedazos. Se elige una pieza para la medición de profundidad, y la otra pieza para el análisis de contenido de cloruro (opcional). Posteriormente se aplica con spray una solución de nitrato de plata (0,1 M) a la sección dividida. Los cloruros se unen con la plata para producir cloruro de plata, produciendo una sustancia de color blanquecino. En ausencia de cloruros, se hacen presentes los hidróxidos evidenciando un color marrón.

La precipitación del cloruro de plata hace posible la medición de la penetración del cloruro en el concreto, el cual se hace visible después de unos 15 minutos de aplicado el nitrato. La profundidad se mide con ayuda de un calibrador, desde el centro a los bordes a intervalos de 10mm (ver fig. 6) para obtener varias medidas de profundidad³²

Figura 6. Medida de profundidad de la penetración del ion cloruro



Fuente: NT BUILD 492

³² Chloride Migration Coefficient From Non-Steady-State Migration Experiments, NT BUILD 492, NORDTEST, Finland, 1999.

La determinación del coeficiente se realiza a partir de las siguientes condiciones:³³

- Para determinar el coeficiente de difusión se usan las siguientes condiciones para el ensayo de difusión natural:

De frontera: $C = C_0$, $x = 0$, $t > 0$; La condición inicial: $C = 0$, $x > 0$, $t = 0$; infinito punto condición: $C = C_0$, $x = \infty$, $t > 0$, la solución de Ecuación. (1) es:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4D_{c1}t}}\right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Se tienen en cuenta las siguientes condiciones: $C_0 = 0.3N$, y $C = 0.07N$

Donde erf (y) es la función error. De la ecuación anterior se expresa el coeficiente de difusión como la profundidad dada por:

$$D_{c1} = \frac{\left[x/\operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \left(\frac{C}{C_0}\right)\right)\right]^2}{4t} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde erf-1 (y) es la función error inversa.

D_{c1} : Coeficiente de difusión hallado por el método de colorimetría para el ensayo de difusión natural.

- Para determinar el coeficiente de difusión se usan las siguientes ecuaciones y condiciones para el ensayo de migración acelerada:

El coeficiente de migración en estado no estable (D_{ns}) fue calculado a partir de la segunda ley de Fick modificada [8]:

$$\frac{dC}{dt} = D_{ns} \left(\frac{d^2C}{dx^2} - \frac{|z|FE}{RT} \frac{dC}{dx} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

³³C.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

D_{ns} : Coeficiente en estado no estable; C : es la concentración de iones cloruro como una función de la distancia x , en cualquier 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; T es la temperatura absoluta.

En este método se usaron las siguientes condiciones para obtener la solución de la ecuación (1):

Condición inicial: $C = 0, x > 0, t = 0$; Condición de frontera: $C = C_0, x = 0, t > 0$;

La condición en el punto infinito: $C = 0, x = \infty, t \gg \gg 0$.

La solución analítica para la ecuación (1) es:

$$C = \frac{C_0}{2} \left[\exp(ax) \operatorname{erfc} \left(\frac{x+aD_{ns}t}{2\sqrt{D_{ns}t}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x-aD_{ns}t}{2\sqrt{D_{ns}t}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde $a = |z|FE/RT$, y erfc es la función error complementaria. D_{ns} es igual a D_{c2} y D_{c2} es el coeficiente de difusión hallado por el método de colorimetría para el ensayo de migración acelerada.

De la ecuación (2), cuando el campo eléctrico es muy grande y la penetración es suficiente, el coeficiente de migración puede calcularse así:

$$D_{c2} = \frac{1}{a} \left(\frac{x-\alpha\sqrt{x}}{t} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\text{Donde } \alpha = 2\sqrt{\frac{1}{a}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \left(\frac{2C}{C_0} \right) \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

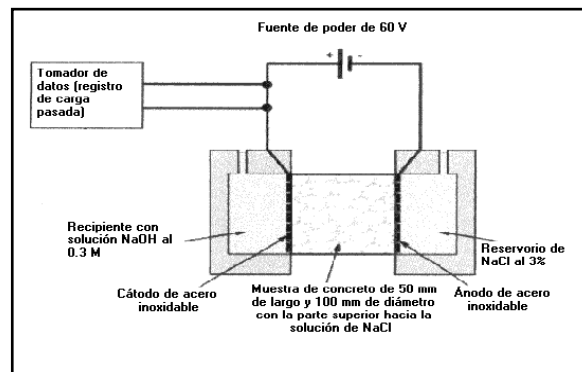
En el método colorimétrico para el ACMT, C_0 es la concentración de cloruro en el cátodo, y C es la concentración en la solución poro correspondiente al límite de cambio de color.

3.4 ENSAYO RÁPIDO DE PERMEABILIDAD DEL IÓN CLORURO (RCPT)³⁴

Este ensayo está normalizado por ASTM C 1202 Y la AASHTO T 277. Consiste en valorar la habilidad del concreto para resistir la penetración de los cloruros mediante una indicación eléctrica. El ensayo consiste en preparar una probeta de concreto, con un espesor de 50 y un espesor de 100mm la cual se expone a la aplicación de un voltaje de 60 V CD durante 6 horas, usando el montaje que se muestra en la figura 7. La probeta de concreto se coloca entre dos reservorios, el primero contiene una solución de NaCl (3%) y el segundo una solución de NaOH (0.3N). la carga total q es transmitida por este sistema es determinada y usada para valorar la permeabilidad de concreto.

Preparación de la probeta: Estas son cortadas en discos con un espesor de 50mm, recubiertos en su cuerpo con una resina epóxica. Los discos se someten al vacío en un desecador a una presión menor de 1mm de Hg (133Mpa) durante 3 horas. Posteriormente se agrega agua desaireada a la muestra hasta cubrirlas totalmente y se mantiene el vacío durante 1 hora. Las muestras se sumergen en la adición de agua durante 18 horas después de apagar la bomba.

Figura 7. Montaje para el ensayo RCPT



Fuente: Lizarazo Marriaga, 2001

³⁴ American Society for Testing and Materials. ASTM C1202

Este ensayo fue realizado por Whiting en 1981 y se conoce como “Ensayo rápido de permeabilidad el cloruro”, aunque realmente no mide la permeabilidad sino el intercambio iónico.

Tabla 7. Penetrabilidad del ion Cloruro, basado en la carga pasante

| Carga transmitida (Coulombs) | Permeabilidad al ión cloruro |
|---|---|
| > 4000 | Alto |
| 2000 – 4000 | Moderado |
| 1000 – 2000 | Bajo |
| 100 – 1000 | Muy bajo |
| < 100 | Insignificante |

Fuente: Lizarazo Marriaga, 2001

3.5 ENSAYO DE MIGRACIÓN ACELERADA DEL ION CLORURO (ACMT)³⁵

El ACMT es una versión modificada del método RCPT. El montaje utilizado es igual al RCPT.

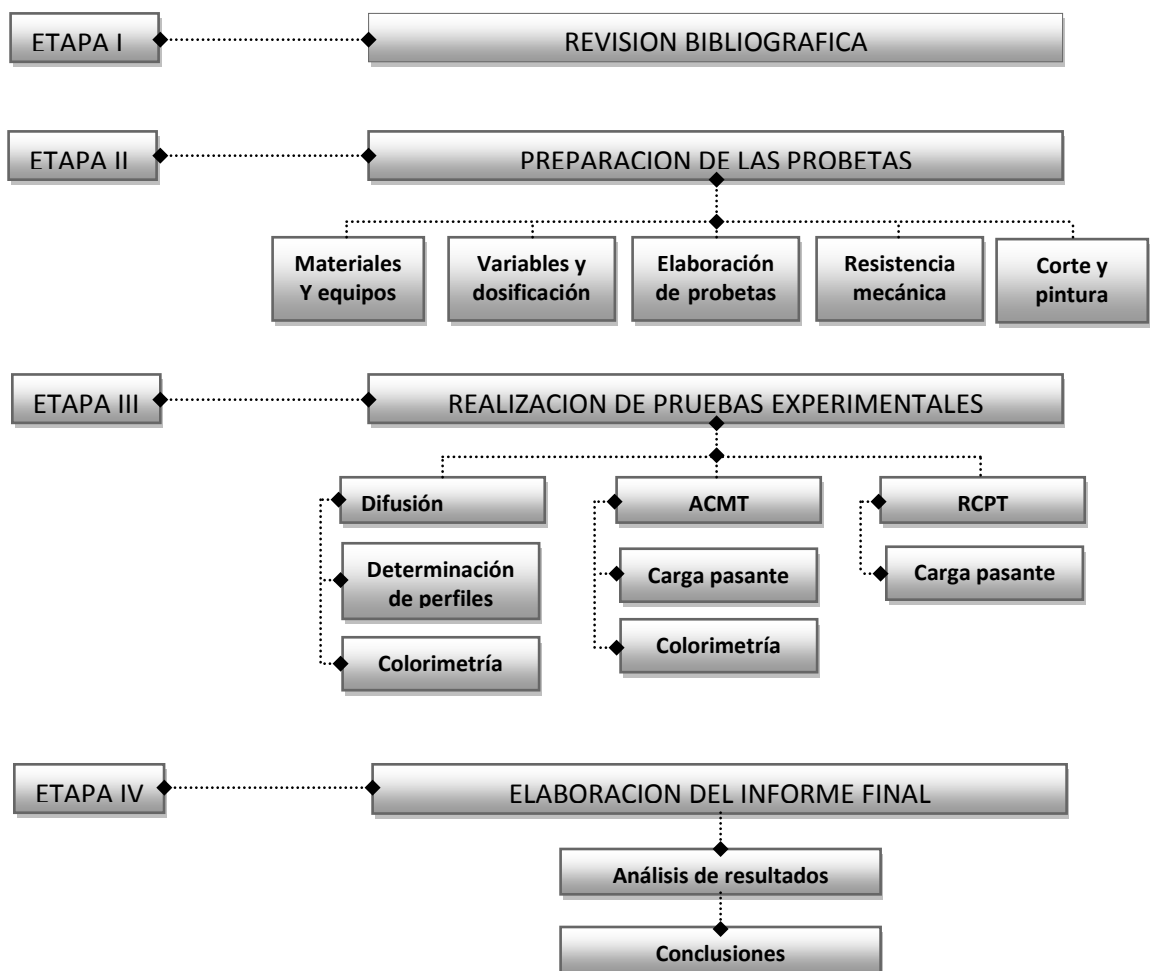
Debido a que el alto voltaje aplicado durante el ensayo RCPT incrementa la temperatura, especialmente para concretos de baja calidad, Yang, y colaboradores realizaron una modificación para disminuir el efecto Joule en los resultados de la prueba. Algunas variaciones para lograr este resultado son: disminución en el potencial a 24 V, el aumento del tamaño de la celda a 4.750 L, el espesor de la probeta a 30mm y el tiempo de aplicación 9h. La preparación de las probetas es igual al método RCPT.

³⁵ YANG, CC. An electrochemical method for accelerated chloride migration test of diffusion coefficient in cement-based materials, 2003.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se muestran todos los aspectos relacionados con la preparación de las probetas, materiales empleados, procedimientos para la realización de las pruebas de determinación del coeficiente de difusión y algunos de los equipos utilizados.

Figura 8. Metodología



4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica se llevó a cabo durante todo el desarrollo de la investigación, recopilando información acerca de estructuras de concretos reforzado: generalidades del cemento, tipos de adiciones, fenómeno de corrosión, propiedades de permeación (permeabilidad, difusión y absorción) y métodos para determinar la penetración de cloruros en el concreto.

Utilizando la base de datos de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander fue posible consultar libros, trabajos de grado, normas, revistas científicas, entre otros, con el fin de utilizar esta información para el desarrollo de este proyecto.

4.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

4.2.1 Caracterización del material.

4.2.1.1 Cemento.

Se utilizó cemento Portland tipo I, fabricado por Cemex Colombia S.A., bajo el nombre comercial de Cemento Diamante.

Los análisis químicos fueron realizados por el grupo de investigación GIMBA de la Universidad Industrial de Santander y se relacionan en la tabla 8; a su vez, los análisis físicos fueron suministrados por el fabricante y son relacionados en el Anexo B, cumpliendo con las normas NTC 121 y 321, para un cemento portland tipo I.

Tabla 8. Composición química del cemento Portland tipo I

| Compuesto | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | SO ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | SrO | TiO ₂ | MnO | ZrO ₂ |
|------------|--------|------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|
| Porcentaje | 72.496 | 14.917 | 4.312 | 3.297 | 2.679 | 1.376 | 0.540 | 0.208 | 0.132 | 0.026 | 0.018 |

Fuente: GIMBA

4.2.1.2. Microsílice.

Se empleó como adición, con el fin de mejorar la resistencia química y mecánica del concreto. Según el fabricante SIKA COLOMBIA, esta adición garantiza una alta densidad en el concreto, pues se obtiene una porosidad hasta 10 veces menor que la obtenida en un concreto convencional. La disminución de la permeabilidad de la matriz del concreto impide la penetración de agentes agresivos, aumentando la vida útil del concreto.

Tabla 9 Composición de la microsíllice

| Aspecto | Polvo fino gris oscuro |
|-------------------------------|------------------------|
| Contenido de SiO ₂ | > 90% |
| Pérdida al fuego | < 5% |
| Superficie específica | > 30 m ² /g |
| Humedad | < 5 % aprox |
| % pasa por tamiz 325 | 99 % |
| Diámetro promedio | 0.5 μm |

Fuente: SIKA

4.2.1.3 Agregados

Se utilizaron agregados finos y gruesos suministrados por PREVESA. La caracterización de ellos se realizó de acuerdo a las normas ASTM C33 y C192, en el Centro de caracterización de Materiales, de la Escuela de Ingeniería Civil, de la Universidad Industrial de Santander. Los resultados reportados por los análisis se muestran en Anexo B.

4.2.1.4 Agua

El agua utilizada para la fabricación del concreto fue agua potable suministrada desde el acueducto de Bucaramanga, bajo los requisitos de la norma ASTM C 94. Sus respectivos análisis fueron realizados por la misma empresa y son relacionados en el Anexo B.

4.2.2 Elaboración de probetas

4.2.2.1 Variables para el diseño de mezclas

La calidad de los materiales y el diseño de las mezclas son considerados factores muy importantes en las propiedades finales de la estructura tales como resistencia y grado de protección ofrecido por el concreto al refuerzo de acero.

Existen distintos tipos de mezclas que ofrecen diferentes resultados. Estas mezclas incluyen la relación a/c, las adiciones y aditivos incorporados a ellas.³⁶

Tabla 10. Variables para la elaboración de concreto

| | |
|-----------------------|-------------------|
| Relación agua/cemento | 0.4 |
| | 0.5 |
| | 0.6 |
| Tipo de adición | Microsílice (10%) |

4.2.2.2 Dosificación

El objetivo de la dosificación del concreto es determinar las proporciones en que deben mezclarse los materiales que componen el concreto, para obtener sus condiciones previstas. Durante el desarrollo de esta investigación se utilizó la relación suministrada por el fabricante del cemento CEMEX, para obtener las proporciones de las diferentes relaciones a/c. Se tiene que para fabricar un 1 m³ de concreto, de relación a/c 0.4, las cantidades a emplear son:

Tabla 11. Proporciones

| Cemento (Kg/m ³) | Arena | Grueso | Agua |
|------------------------------|-------|--------|------|
| 525 | 787 | 848 | 210 |

El peso de cada componente de la mezcla para cada relación a/c obtenida se muestra en el Anexo B.

³⁶ HERNÁNDEZ, Rodolfo. SUÁREZ, Sandra. Efecto del ión cloruro en el acero de refuerzo expuesto a soluciones simuladas de concreto. UIS, 1999.

4.2.2.3 Distribución de las probetas

Tabla 12 Distribución de las probetas de acuerdo al tipo de ensayo a utilizar

| Prueba | Tipos de probeta | Relación a/c | | |
|------------------|------------------------------------|--------------|-------|-------|
| | | 0.4 M | 0.5 M | 0.6 M |
| Compresión | Cilindros (d: 7.5 cm, h: 15 cm) | 3 | 3 | 3 |
| | | 6 | 6 | 6 |
| Difusión natural | Cilindros (d: 7.5 cm, h: 15 cm) | 3 | 3 | 3 |
| RCPT | Discos (d: 7.5 cm, e: 5 cm) | 3 | 3 | 3 |
| ACMT | Discos (d: 7.5 cm, e: 3 cm) | 3 | 3 | 3 |

M: microsílíce

4.2.2.4 Fabricación de probetas

En este aparte se describe los procedimientos de elaboración y curado de las probetas de concreto en el laboratorio, basados en la norma ASTM C 192.

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

Para garantizar la distribución homogénea de la microsílíce se empleó el siguiente esquema recomendado por el fabricante (SIKA):

Inicialmente se mezclaron los agregados (arena y grava) previamente pesados en la balanza analítica mostrada en la tabla 23; se adicionó la cantidad de microsílíce (SikaFume) requerida y se mezcló por un minuto, como se muestra en la figura 9a; luego se adicionó el cemento y se continuó el mezclado vigorosamente por unos minutos más (ver figura 9b). Se agregó el agua de amasado con el superplastificante (Sikament) disuelto en ella en la dosis requerida para lograr la consistencia deseada de la mezcla. (0.5 – 1% de los componentes cementantes) y se continuo el mezclado, hasta obtener una pasta manejable y homogénea, como se observa en la figura 9c.

Figura 9: Mezcla de los materiales para la elaboración de las probetas



Antes de verter la mezcla a los moldes, estos fueron ligeramente recubiertos con aceite mineral para facilitar el desmoldeo de las probetas. Posterior a ello se agregó la mezcla en los moldes cilíndricos de PVC y se apisonaron siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C 192.

La mezcla se conservó el molde durante 24 ± 1 horas de fraguado y posteriormente se sumergió en agua fresca para su curado a 28 días.

4.2.3 Pruebas de Resistencia mecánica.

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm^2).³⁷

Para determinar la resistencia a la compresión, se realizaron pruebas sobre especímenes cilíndricos de concreto con 7.5 cm. de diámetro y 15 cm. de altura, curados durante 28 días bajo agua.

³⁷ LOPEZ, Raquel. Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. Publicación Técnica No 292 Sanfandila, Qro 2006

Para cada relación a/c se utilizaron 3 probetas, con el fin de verificar los requerimientos de resistencia mecánica superior a 5000 psi para una relación de a/c de 0.4, requerida en este proyecto.

Estos ensayos se realizaron de acuerdo con el "Método para ensayos de cilindros de concreto a la compresión" (designación C-39 de la ASTM) en la máquina de ensayos Trebel, ubicada en el Centro de Caracterización de Materiales de Construcción de la UIS, Los resultados son reportados en la tabla 13

Tabla 13. Resultados de compresión

| Relación a/c | Resistencia prom (psi) | Resistencia prom (Kg/cm ²) |
|--------------|------------------------|--|
| 0.4B | 5939 | 415.73 |
| 0.5 B | 4850 | 339.5 |
| 0.6 B | 3632 | 254.24 |
| 0.4 M | 8730,51 | 611.13 |
| 0.5 M | 5917,35 | 414.2 |
| 0.6 M | 4850,28 | 339.5 |

B: Blanco M: microsílíce

La preparación de las probetas para la aplicación de este ensayo consistió en depositar una capa de azufre con el objetivo de lograr superficies completamente planas y paralelas y así obtener un contacto uniforme con las matrices de la maquina. La figura 10 muestra la máquina de ensayos.

Figura 10. Maquina de Universal de Ensayos



4.2.4 Corte y pintura de las probetas.

Para la aplicación de las pruebas de RCPT y ACMT, las probetas fueron cortadas y pintadas previamente, según las especificaciones dimensionales de cada una (5 cm y 3 cm de espesor respectivamente). Posterior al proceso de corte las probetas fueron recubiertas con una pintura epóxica, del tipo epoxi-poliamida marca Pintuco, para asegurar la penetración uniaxial del cloruro.

De igual forma los especímenes utilizados para la prueba de difusión natural fueron recubiertos también con esta pintura alrededor de su cuerpo dejando una sola cara da área circular expuesta a la solución de cloruro de sodio.

4.2.5 Caracterización de la microestructura del concreto

En la industria de la construcción es importante conocer la composición química de la materia prima y las reacciones que ocurren en la pasta de cemento mezclada con agua con el fin de obtener productos que cumpla con las especificaciones técnicas esperadas. Por esta razón, se han empleado las técnicas de difracción de rayos X y Microscopia de barrido electrónico, para analizar principalmente las propiedades físicas y químicas del cemento con y sin adición de microsílíce.³⁸

4.2.5.1 Difracción de rayos X (DRX)

Se realizó un análisis de tipo cuantitativo a 4 muestras previamente pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38µm. El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un portamuestra de aluminio mediante la técnica de llenado lateral, realizado en el laboratorio de Difracción de Rayos X, de la Universidad Industrial de Santander.

³⁸ Giraldo, Manuel.; Tobón Jorge. Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. 2005

La toma de datos se realizó en un difractor de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB bajo las siguientes condiciones:

Tabla 14. Parámetros de operación DRX

| Parámetros | Datos |
|--------------------|-----------------------|
| Voltaje | 40 KV |
| Corriente | 30 mA |
| Rendijas (Slits) | DS RS SS |
| | 1.0° 0.3mm 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 |

La identificación 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).

La cuantificación de dichas fases 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%.

4.2.5.2 Microscopia de Barrido Electrónico (SEM)

Con el fin de determinar el efecto de la microsílíce sobre la morfología del concreto fue aplicada esta técnica.

El acondicionamiento de las muestras fue el siguiente: Inicialmente se cortaron 2 muestras de concreto con microsílíce y posteriormente fueron pulidas con diferentes lijas (150, 400, 600 y 1200) y abrasivos de alúmina (0.3 y 0.05 micras) para darle el acabado espejo a la superficie. Este ensayo fue realizado por la universidad de Antioquia.

4.3 ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

4.3.1 Ensayo de difusión natural

Este método se basó en la norma NordTest, NTBuild 443-94 y los equipos y materiales utilizados fueron:

- Estanque de concreto: (2m*2m, h=0.2m)
- Conductímetro
- Sal de mar (3%)
- Agua potable (80 L)

Figura 11. Estanque para inmersión de probetas



La metodología para evaluar la penetración de ión cloruro empleando diferentes relaciones agua cemento, fue la siguiente:

Se utilizaron 18 probetas de concreto con microsílíce al 10%, de 7.5 cm de diámetro y 15 cm de altura, con las relaciones a/c de 0.4, 0.5 y 0.6. La dosificación y fabricación de estas probetas fue explicada en 4.2.2.2 y 4.2.2.4.

Posteriormente las probetas fueron sumergidas en un estanque cuadrado con dimensiones de 2 x 2 m, llenado hasta un nivel de 20 cm, con una solución de sal marina al 3 % (p/v) durante 30, 45 y 60 días. Al cumplir estos tiempos, fueron extraídas 2 probetas por cada relación a/c, según la distribución antes mencionada

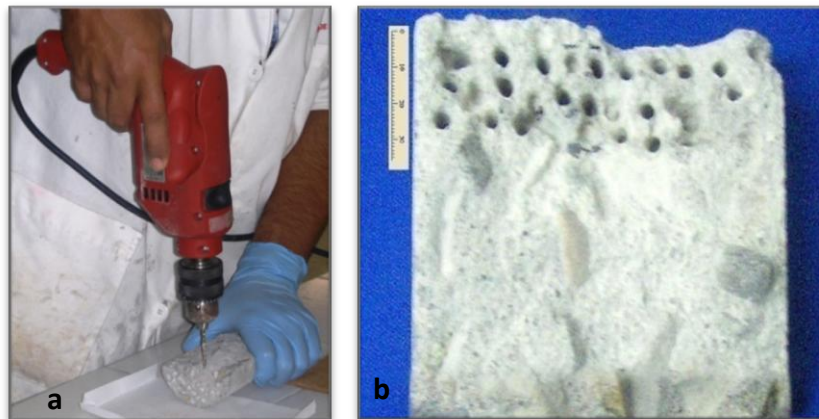
con el fin de tomar las respectivas muestras para la determinación del perfil de concentración de cloruros y realizar las pruebas de colorimetría.

Antes de realizar la solución con sal marina, se determinó el contenido de cloruros en ella ($58.46 \pm 0.35 \%$) realizado en el Grupo en Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA). El valor de conductividad de la solución se mantuvo durante toda la prueba (48 mS/cm).

La extracción de muestras para determinar el perfil de concentración se basó en la norma ASTM C1218 (Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete) y fue explicado en 3.2.1

Las muestras fueron extraídas con un taladro de percusión marca PERLES de 600 W perforando a intervalos entre 0 – 10 mm, 10 – 20 mm, 20 – 30 mm, para una probeta sumergida durante 30 días como se observa en la Figura 12b. Intervalos de 0 hasta 40mm se realizaron para una probeta de 45 días de inmersión y de 0 hasta 50mm para una probeta sumergida durante 60 días.

Figura 12. Extracción de las muestras



La determinación del contenido de cloruro en las muestras extraídas fue realizada por Grupo en Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA), de la Universidad Industrial de Santander.

El método colorimétrico fue basado en la norma NT CONSTRUIR 492. Y su procedimiento fue descrito en 3.3.

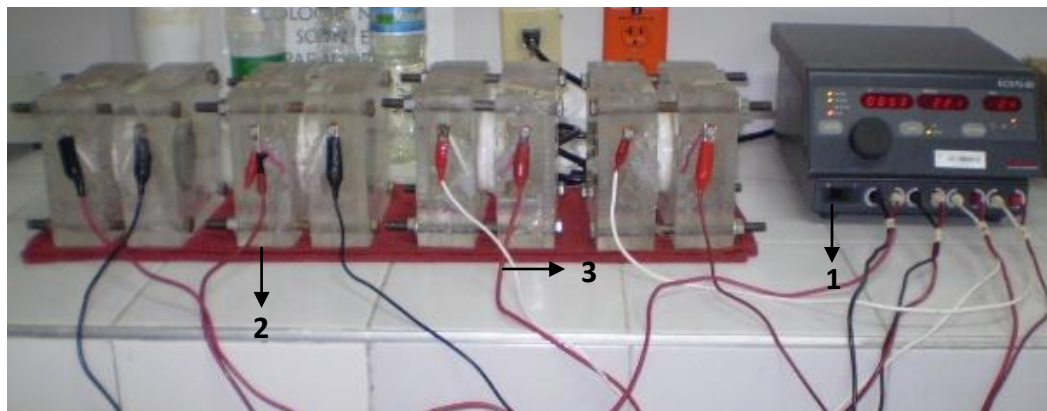
4.3.2 Ensayo rápido de permeabilidad del ión cloruro (RCPT)

Mediante este ensayo normalizado por la ASTM C 1202, se determinó la habilidad del concreto para resistir la penetración de los cloruros mediante una indicación eléctrica.

En el ensayo se utilizaron especímenes de concreto con adición de microsílíce con un espesor de 5 cm y un diámetro de 7.5 cm, colocados entre dos celdas, la primera con una solución de NaCl (3%) y la segunda con una solución de NaOH (0.3N), como se ilustra en la figura 13.

Estos especímenes fueron sometidos a la aplicación de un voltaje de 60 V durante 6 horas, donde fue medida la corriente transmitida por este sistema, a partir de la cual se determinó la carga pasante usada para valorar la penetrabilidad del ion cloruro a la probeta de concreto.

Figura 13. Montaje experimental para RCPT



El montaje utilizado para la prueba de RCPT consistió en:

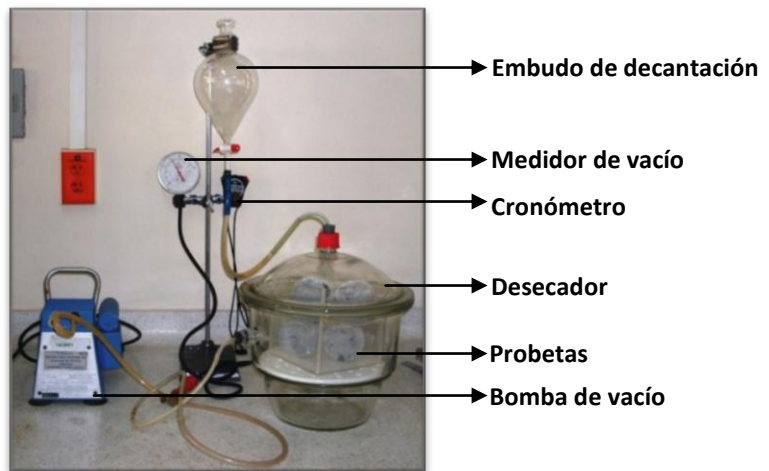
1. Fuente reguladora de poder: los parámetros fijados fueron (Voltaje constante de 60V, tiempo de 6h y corriente variable)

2. Celdas de difusión: Fueron construidas en acrílicos y constan de dos depósitos uno con solución de NaOH (ánodo) y el otro con una solución de NaCl (3% p/v) (cátodo).

3. Cables conectores # 14: unen cada uno de los reservorios a la fuente reguladora.

Acondicionamiento de muestras: Las probetas empleadas en este ensayo fueron previamente cortadas en discos con un espesor de 5 cm, recubiertos en su cuerpo con una resina epóxica; posteriormente se coloraron en un recipiente dentro de un desecador, evitando el contacto entre las caras de las probetas y luego fueron sometidas al vacío a una presión menor a 40 mm de Hg durante 3 horas. Cumplido este tiempo se agregó agua desaireada al recipiente que contenía las probetas hasta cubrir las completamente y se mantuvo el vacío durante una hora. Finalmente se apagó la bomba y se dejaron las probetas 18 ± 2 horas más en el montaje. (Ver figura 14)

Figura 14. Montaje para el acondicionamiento de las probetas



4.3.3 Ensayo de migración acelerada de cloruros (ACMT)

El ACMT es una versión modificada del método RCPT, propuesta por Yang, y colaboradores, con el fin de disminuir el efecto Joule producido por el alto voltaje aplicado durante la prueba de RCPT.

Las variaciones empleadas fueron: disminución en el potencial a 24 V, el espesor de la probeta a 3 cm y tiempo de aplicación 9h. El volumen de la celda y la preparación de las probetas fueron igual al utilizado en el método RCPT.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA DEL CONCRETO

5.1.1 DRX:

● Concreto sin microsílíce

En la tabla 15, se muestra los compuestos encontrados para la muestra sin contenido de microsílíce donde se observa, la presencia de *Portlandita* con un contenido de 6.3 % y *Etringita* con un porcentaje de 1.5%, los cuales son productos de las reacciones de hidratación del cemento. Adicionalmente se observan compuestos asociados con los agregados utilizados para la fabricación del concreto, tales como el *Cuarzo*, *Calcita*, *Microclina*, *Albita*, entre otros.

Es posible encontrar bajas cantidades de yeso y calcita producto de la fabricación del cemento Portland, los cuales no afectan las propiedades del cemento producido. En el Anexo C se muestra el Difractograma de cada uno de los componentes encontrados.

Tabla 15. Resultados DRX muestra sin microsílíce

| FASE | Nº TARJETA PDF 2 | NOMBRE | CUANTITATIVO | |
|-------------------|---|-------------|--------------------|--------------------|
| cristalinos | SiO ₂ | 000-46-1045 | Cuarzo | 36.3 % (D.E = 0.2) |
| | CaCO ₃ | 010-83-0578 | Calcita | 13.0 % (D.E = 0.2) |
| | Ca(OH) ₂ | 010-78-0315 | Portlandita | 6.3 % (D.E = 0.1) |
| | KAlSi 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) |
| | CaSO ₄ 2H ₂ O | 000-06-0047 | Yeso | 3.5 % (D.E = 0.1) |
| | Na(AlSi ₃ O ₈) | 000-09-0466 | Albita | 12.5 % (D.E = 0.1) |
| | KAl ₂ (SiAl) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 000-58-2037 | Moscovita | 9.4 % (D.E = 0.2) |
| | (MgFe) ₆ (SiAl) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | 000-29-0701 | Clinodoro | 4.5 % (D.E = 0.1) |
| Total cristalinos | | | 94.1 % | |
| Amorfos y otros | | | 5.9 % | |

■ Concreto con microsílíce

Las muestras con contenido de microsílíce, presentaron una disminución en el porcentaje de *Portlandita* y *Etringita*, de 2.7 y 1.0 % respectivamente, (Ver tabla 16). La disminución de la *portlandita* se atribuye a la reacción que ocurre entre ésta y la microsílíce, conocida como actividad puzolánica, la cual permite su combinación durante el proceso de hidratación disminuyendo el contenido de *portlandita* en la pasta.

La disminución del contenido de *etringita* se debe a la reducción del yeso en la mezcla, ya que se reemplazó el 10 % del cemento por microsílíce.

De igual forma es posible apreciar la presencia de otros compuestos asociados a los agregados tales como el *Cuarzo*, *Calcita*, *Microclina*, *Albita*, entre otros.

Tabla 16. Resultados DRX muestra con microsílíce

| FASE | Nº TARJETA PDF 2 | NOMBRE | CUANTITATIVO | |
|-------------------|---|-------------|--------------|--------------------|
| cristalinos | SiO ₂ | 010-85-0794 | Cuarzo | 31.0 % (D.E = 0.3) |
| | CaCO ₃ | 010-72-4582 | Calcita | 16.0 % (D.E = 0.2) |
| | Ca(OH) ₂ | 010-78-0315 | Portlandita | 2.7 % (D.E = 0.1) |
| | KAlSi ₃ O ₈ | 000-19-0932 | Microclina | 10.3 % (D.E = 0.2) |
| | Ca ₆ (Al(OH) ₆ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₂₆ | 010-73-6239 | Etringita | 1.0% (D.E = 0.1) |
| | CaSO ₄ 2H ₂ O | 010-74-1904 | Yeso | 2.0 % (D.E = 0.1) |
| | Na(AlSi ₃ O ₈) | 000-20-0554 | Albita | 16.7 % (D.E = 0.8) |
| | KAl ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 000-58-2037 | Moscovita | 6.5 % (D.E = 0.1) |
| | (Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | 000-29-0701 | Clinodoro | 3.1 % (D.E = 0.1) |
| | CaMg(CO ₃) ₂ | 010-75-1759 | Dolomita | 1.6 % (D.E = 0.1) |
| Total cristalinos | | | 90.4 % | |
| Amorfos y otros | | | 9.1 % | |

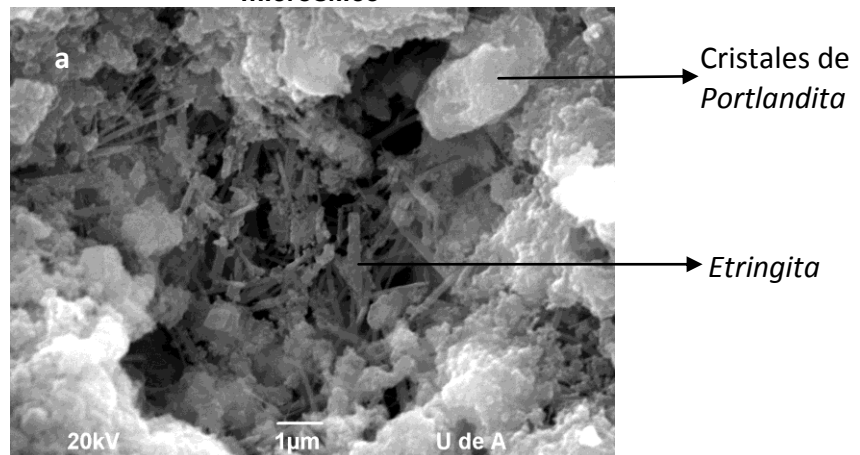
5.1.2 SEM

■ Concreto sin microsílíce

Mediante esta técnica fue posible identificar la morfología de la pasta del cemento, apreciada en la figuras 15.

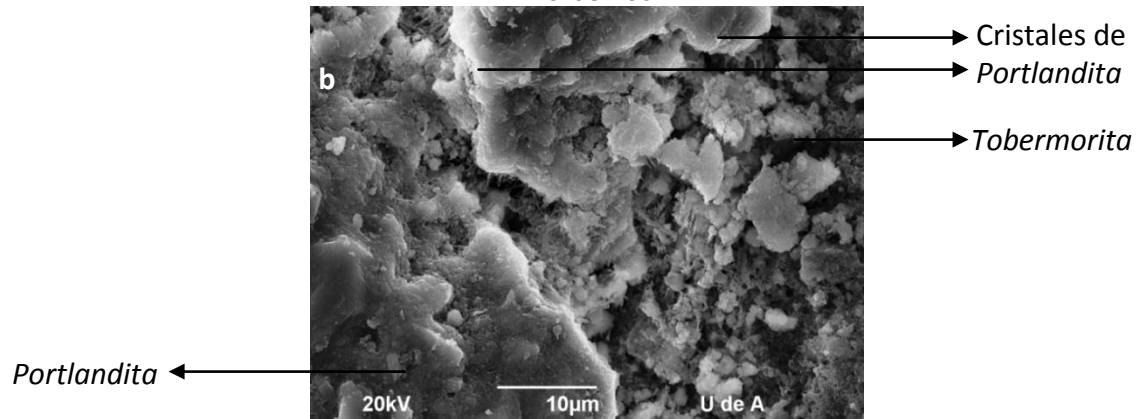
En la figura 15a y 15b se observa la *Portlandita* en forma de plaquetas hexagonales, agrupadas en depósitos masivos. De acuerdo a la figura 15c es posible apreciar que la forma hexagonal de las plaquetas no es muy definida por lo tanto no se puede determinar de cuál de los dos silicatos cálcicos proviene el cristal formado, ya que no hay un criterio microscópico definido para establecer a partir del hábito mineral, su procedencia.³⁹

Figura 15a. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra sin microsílíce



³⁹ Giraldo, Manuel.; Tobón Jorge. Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. 2005

Figura 15b. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra sin microsílíce

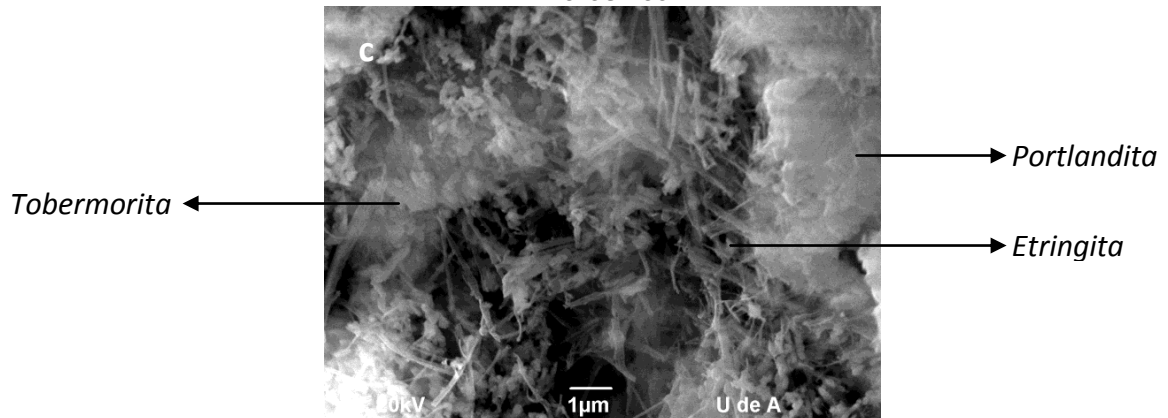


La *Tobermorita gel* principal producto de hidratación de la pasta, se puede apreciar en la figura 15b y 15c, como regiones de baja cristalinidad en forma de racimos.

Los cristales de *Etringita* se observan en formas alargadas, con morfología de agujas produciendo estructuras que asemejan una rejilla la cual le proporciona al cemento mayor cohesión. (Ver figura 15a y 15c)

La *Etringita* expansiva se encuentra generalmente dentro de las fisuras y grietas y se produce en edades tardías mayores a 28 días, por lo tanto aquí no se presenta.

Figura 15c. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra sin microsílíce

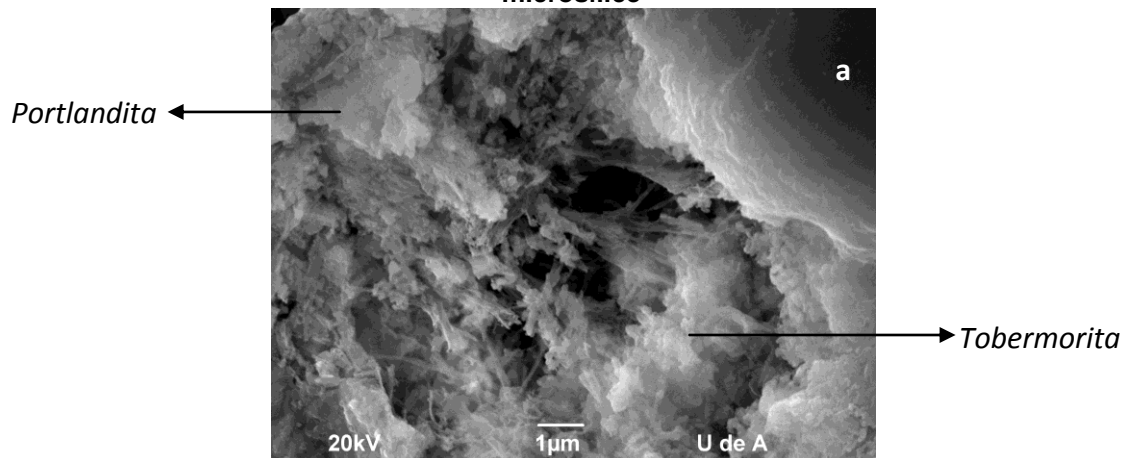


■ Concreto con microsílíce

Las muestras con adición de microsílíce inspeccionadas por microscopia electrónica de barrido se observan en la figura 16.

La principal característica observada en estas microestructuras son la presencia de regiones de baja cristalinidad y alta densidad, propias de la *Tobermorita* y la *microsílíce*, presentando forma botroidal o de racimos. Esto se le atribuye a la alta superficie específica de la microsílíce que en contacto con el agua forma un gel denso de cemento-microsílíce el cual se aglomera entre los granos del cemento no hidratado, revistiendo los granos en el proceso. El hidróxido de calcio reacciona con la superficie exterior de este gel para formar *CSH* llenando los espacios vacíos, produciendo una estructura muy densa.⁴⁰ Por lo tanto los cristales de Portlandita no se pueden observar con claridad ya que los pocos cristales formados se encuentran agrupados en depósitos masivos, y en menor tamaño lo cual hace difícil reconocerlos del *gel Tobermorita*. Además es posible apreciar la *Ettringita* en forma de agujas pero en menor proporción que en las muestras que no contienen microsílíce.

Figura 16a. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra con microsílíce



⁴⁰ Materiales para la producción de concretos de alto desempeño.2007

Figura 16b. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra con microsílíce

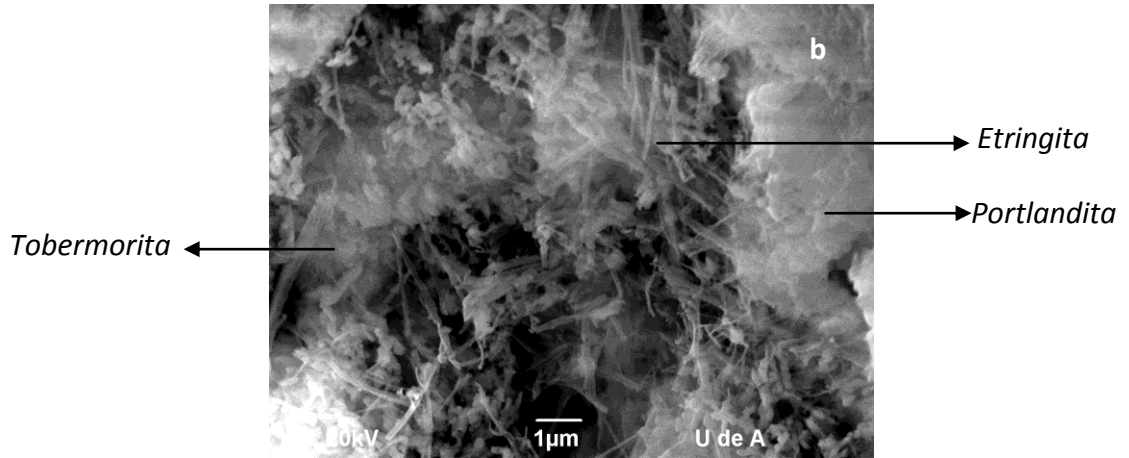
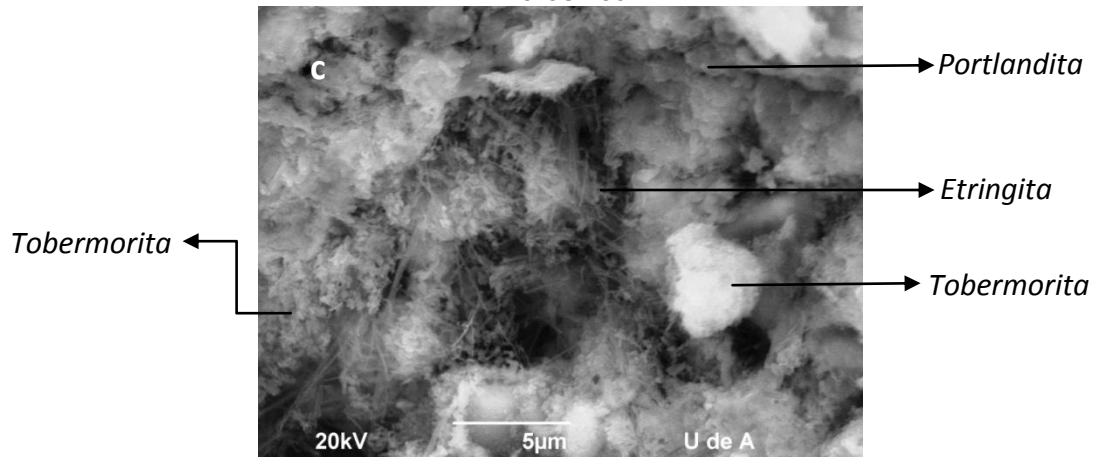


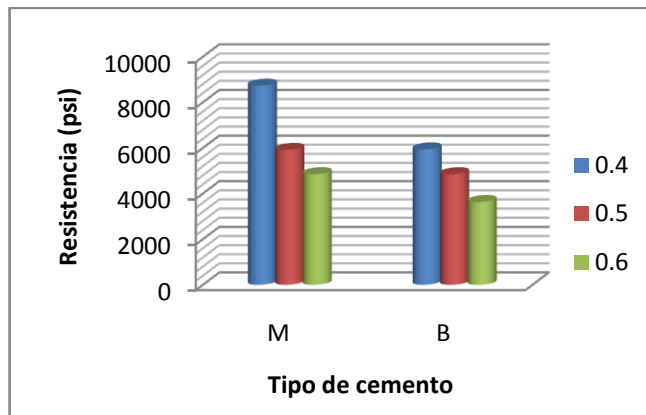
Figura 16c. Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido, de la muestra con microsílíce



5.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La elevada superficie específica de la microsílíce, tiene un efecto pronunciado sobre la resistencia mecánica del concreto. Los ensayos de resistencia realizados a las probetas, muestran una elevada resistencia en el concreto que contiene microsílíce. (Ver figura 17)

Figura 17. Resistencia Mecánica



Previo al análisis de SEM, las probetas fueron preparadas y observadas en el microscopio Olympus BX51 a diferentes aumentos.

Figura 18. Micrografías de concreto sin adición de Microsílice

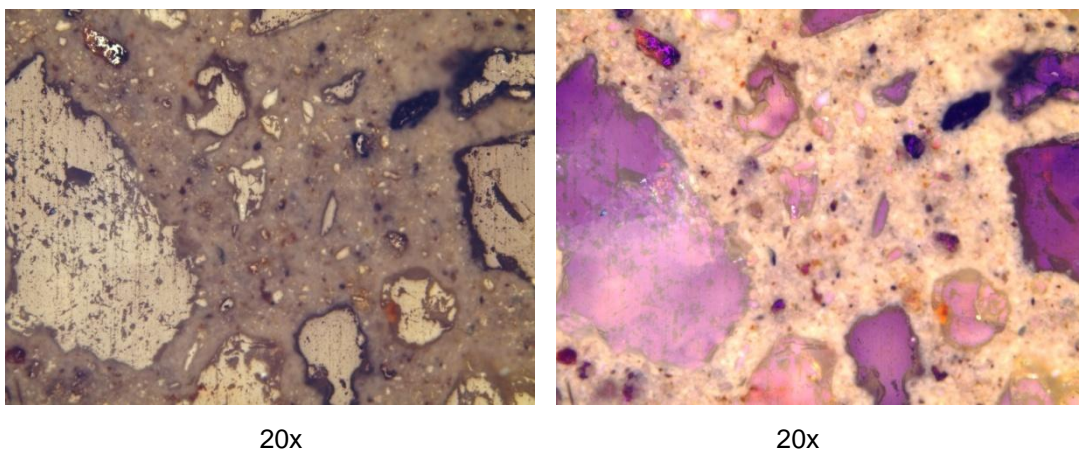


Figura 19. Micrografías de concreto con adición de Microsílice

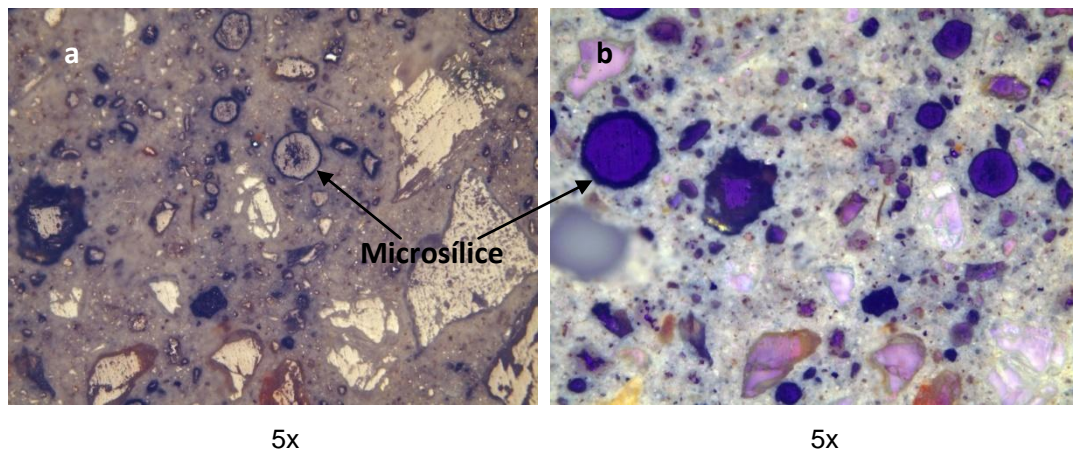
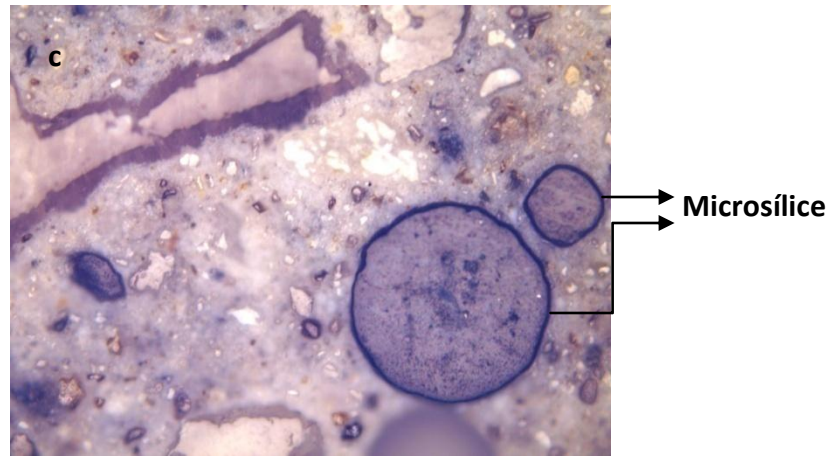


Figura 19c. Micrografías de concreto con adición de Microsilíce



20x

La interfase entre la pasta de cemento y el agregado tiene especial importancia ya que ésta es una zona heterogénea con respecto al resto del concreto y es especialmente débil desde el punto de vista de la durabilidad.⁴¹

La figura 19(a, b y c) muestra una zona de transición de color oscuro alrededor del agregado, lo cual indica mayor densidad y menor porosidad en esa zona, por lo tanto existen enlaces más fuertes que aumentan la resistencia mecánica del material debido a la adherencia entre la pasta y el agregado.⁴²

5.3 DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE CLORUROS PARA EL ENSAYO DE DIFUSIÓN NATURAL MEDIANTE INMERSIÓN

Observación: Los datos nombrados como blanco (B), hacen referencia al concreto sin adición de microsilíce y fueron tomados del trabajo de investigación Determinación experimental del coeficiente de difusión aparente del ión cloruro en concreto expuesto a ambientes con cloruros.⁴³

⁴¹ SANJUÁN, Miguel. Calculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón. 1992

⁴² Materiales para la producción de concretos de alto desempeño.2007

⁴³ LEÓN, Claudia.; OROSTEGUI, Sandra. Determinación experimental del coeficiente de difusión aparente del ión cloruro en concreto expuesto a ambientes con cloruros. 2009

Las figuras 20, 21 y 23 muestran el perfil de concentración del ión cloruro al interior del concreto, para las relaciones a/c de 0.4, 0.5 y 0.6 con y sin adición de microsílíce a 60 días de inmersión. La tendencia presentada es bastante similar para todos los casos.

Fig. 20: Perfil de cloruros 60 días, a/c: 0.4

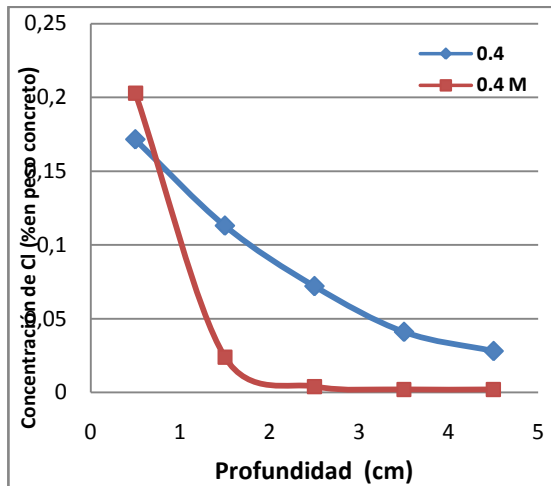
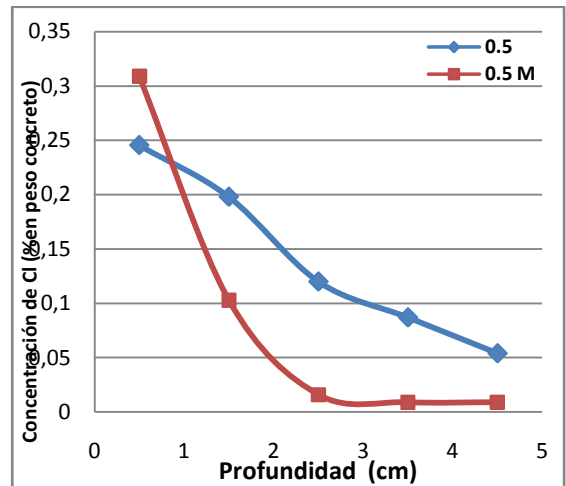


Fig. 21: Perfil de cloruros 60 días, a/c: 0.5

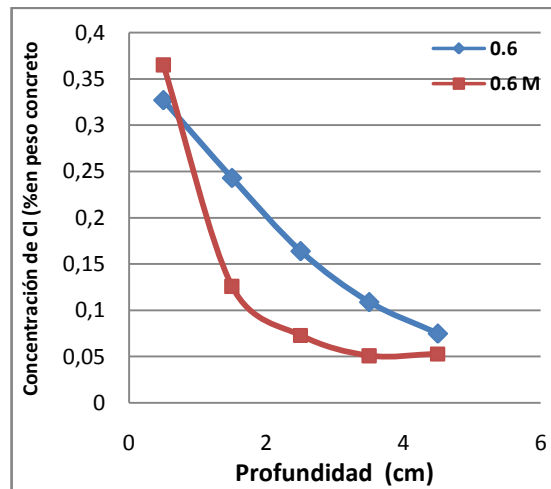


En la figura 20 se observa el perfil de concentración de cloruros, para la relación a/c de 0.4, con y sin adición de microsílíce a 60 días de inmersión, donde se puede observar una concentración mayor del ion cloruro entre 0 y 10 mm de profundidad, para la muestras que contienen microsílíce, sin embargo a medida que la profundidad aumenta, el contenido de cloruro disminuye drásticamente hasta hacerse constante, aproximándose a cero.

Esta caída de concentración se le atribuye a la influencia de la microsílíce sobre la porosidad del concreto. El bajo tamaño de partícula de la microsílíce le permite ubicarse en los poros que están conectados con el exterior obstruyendo el paso de agentes agresivos, es decir modifica la porosidad de abierta a cerrada.⁴⁴

⁴⁴ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cyted 1999.

Fig. 22: Perfil de cloruros 60 días, a/c: 0,6



A mayor relación a/c, se conserva el mismo comportamiento para las muestras con microsilíce, sin embargo, se observan valores mayores en la concentración (ver fig. 21 y 22), ya que un aumento de agua en la mezcla causa un incremento en los poros capilares de la pasta permitiendo el paso de agentes agresivos.⁴⁵

Las muestras que no contienen microsilíce presentan concentraciones más altas debido a que no contienen adiciones que modifiquen su porosidad, lo cual concuerda con observaciones de SAN JUAN, donde el concreto sin adiciones presenta una mayor porosidad capilar.⁴⁶

5.4 PENETRACIÓN DE CLORUROS POR INMERSIÓN

En cuanto al tiempo que tardan los cloruros en llegar a la armadura en una estructura ya construida, lo importante es conocer a qué profundidad han penetrado en el momento de hacer la inspección, ya que el recubrimiento de

⁴⁵ MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytel 1999.

⁴⁶ SANJUÁN, Miguel. Calculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón. 1992

concreto debe ser mayor a la profundidad que sean capaces de alcanzar estas condiciones en el tiempo previsto de vida útil de la estructura. ⁴⁷

La velocidad de avance o penetración de los cloruros en la pasta cementicia es, en general, una función de la raíz cuadrada del tiempo; y se determinó aplicando la siguiente fórmula:

$$X = K \cdot (t)^{1/2}$$

X = profundidad alcanzada por los cloruros.

K = coeficiente de penetración

t = tiempo

Los coeficientes de penetración de acuerdo a las ecuaciones obtenidas de las regresiones lineales se muestran en la Tabla 17, para las diferentes relaciones a/c, con y sin adición de microsilíce.

Tabla 17. Coeficientes de penetración de cloruros respecto el tiempo

| | Coeficiente de penetración del ión cloruro K (cm/ $\sqrt{\text{días}}$) | | |
|----------|--|-------|-------|
| | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| M | 0.17 | 0.245 | 0.329 |
| B | 0.319 | 0.418 | 0.455 |

M: microsilíce B: blanco

En las figuras 23 y 24 se observa la linealización correspondiente a los puntos experimentales con su respectivo coeficiente de determinación R^2 , los cuales muestran una tendencia definida, de la capacidad de penetración del ion cloruro, a través de la estructura cementicia con y sin adición de microsilíce para las relaciones a/c de 0.4, 0.5 y 0.6, con y sin microsilíce.

⁴⁷ DEL VALLE, Angélica et al. El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001.

Fig.23. Profundidad de penetración del ión cloruro Vs. Tiempo, (Microsílice)

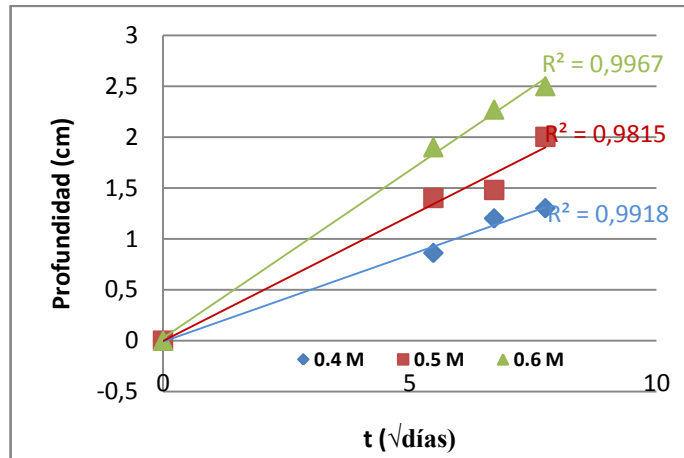
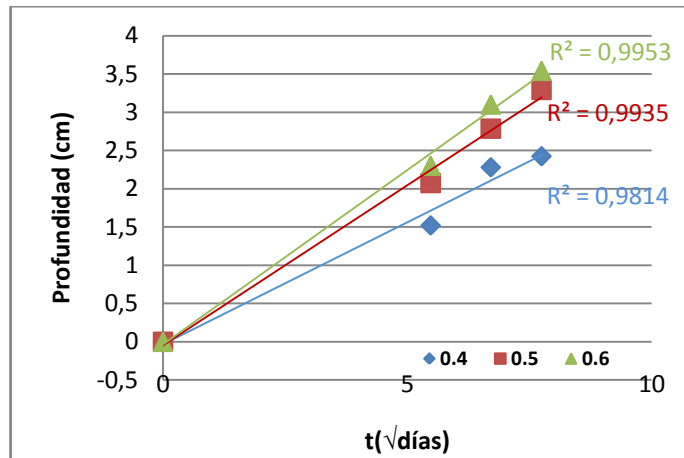


Fig. 24. Profundidad de penetración del ión cloruro Vs. Tiempo, (blanco)



Se observa un aumento de la penetración a medida que incrementa el tiempo y la relación a/c, debido al aumento de poros capilares que permiten el paso de los iones. Las mezclas con microsílice presentan una mayor resistencia en el bloqueo del paso de los iones, gracias a la modificación en la porosidad.

5.5 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

5.5.1 Determinación del coeficiente de difusión de cloruros a partir del perfil de concentración.

Para determinar el coeficiente de difusión se utilizaron los métodos descritos anteriormente (ajuste a las curvas: exponencial y error)

Las siguientes figuras muestran las graficas para la determinación del coeficiente de difusión en las probetas de concreto con adición de microsilíce a 30 días de inmersión para cada relación a/c.

Fig.25. Perfil de concentración a 30 días

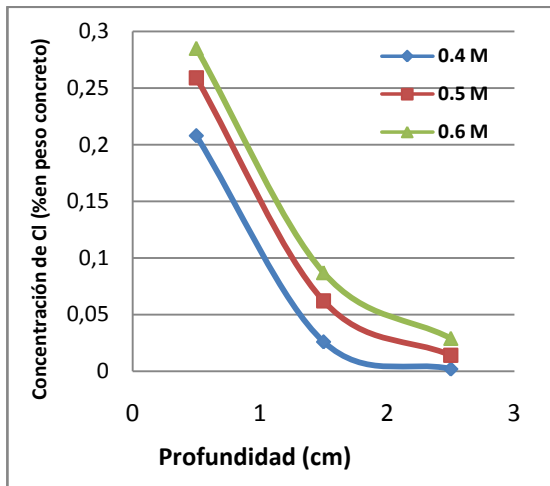
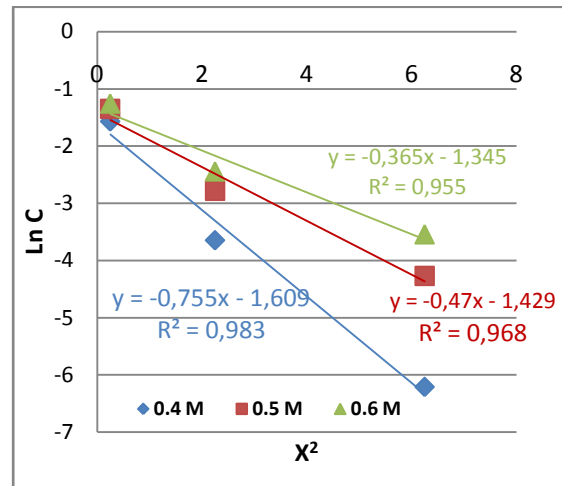


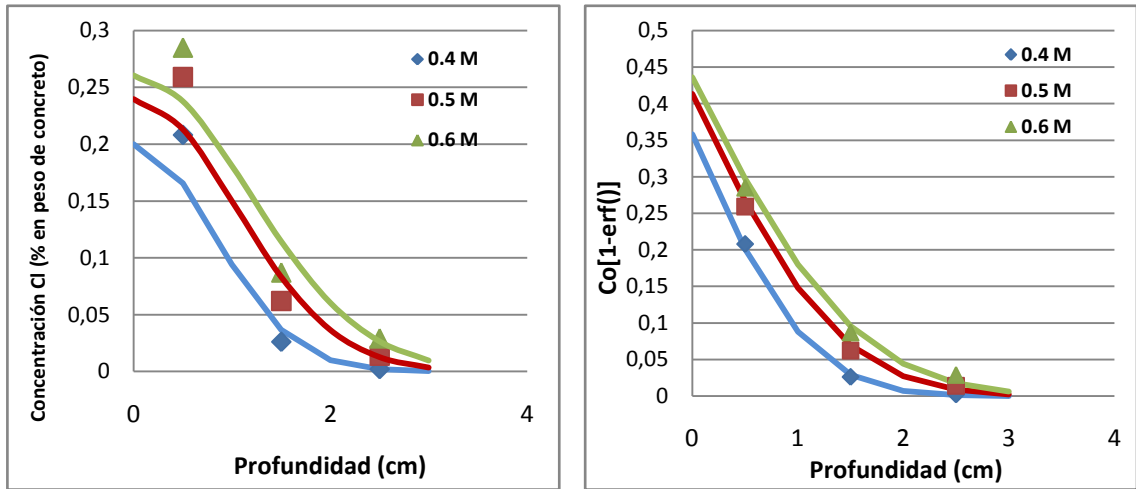
Fig.26. Linealización del perfil a 30 días



R^2 determinado a partir de los ajustes de las curvas: exponencial y función error.

| 0.4M | | 0.5M | | 0.6M | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Exp | Erf | Exp | Erf | Exp | Erf |
| 0.991 | 0.999 | 0.971 | 0.998 | 0.956 | 0.997 |

Fig.27. Ajuste a la curva exponencial (30 días) Fig.28. Ajuste a la función error (30 días)



A partir de los coeficientes de determinación R^2 presentados por las Figuras 27 y 28, es posible inferir que para la determinación del coeficiente de difusión en concreto con adición de microsilíce, existe un mejor ajuste a la función error.

Los valores de coeficiente de difusión obtenidos confirman las observaciones mencionadas, ya que son menores para las probetas con microsilíce donde la proporción de poros capilares disminuye, lo cual conduce a una disminución en la velocidad de difusión. (Ver tabla 18)

Tabla 18. Coeficientes de Difusión para las diferentes relaciones a/c a 30 días de inmersión

| Coeficiente Relación a/c | Blanco | | Microsilíce | |
|-----------------------------|--|--|----------------------------------|--|
| | D Ajuste exp E-11 (m ² /s) | D Ajuste erf E-11 (m ² /s) | D Ajuste exp (m ² /S) | D Ajuste erf E-11 (m ² /s) |
| 0.4 | 2.088 | 2,43 ±0.31 | 1,28 | 1,43 ±0.2 |
| 0.5 | 2.78 | 2,99 ± 0.71 | 2,05 | 2,28 ± 0.5 |
| 0.6 | 3,63 | 4,40 ± 0.9 | 2,64 | 2,87 ± 0.7 |

En el Anexo E se muestra la determinación del coeficiente de difusión de cloruros a partir del perfil de concentración a 45 y 60 días, así como los valores de coeficientes hallados.

5.5.2 Determinación del coeficiente de difusión de cloruros a partir del método de colorimetría.

Tabla 19. Coeficientes de difusión para las diferentes relaciones a/c

| Tiempo | Difusión natural D (E-11 m ² /s) | | | | | | ACMT (E-11 m ² /s) | |
|--------------|---|-------|---------|------|---------|------|-------------------------------|------|
| | 30 días | | 45 días | | 60 días | | 9h | 2h |
| Relación a/c | M | B | M | B | M | B | M | B |
| 0.4 | 0.647 | 2.018 | 0.83 | 3.03 | 0.738 | 2.57 | 0.535 | 4.73 |
| 0.5 | 1.71 | 3.76 | 1.27 | 4.52 | 1.74 | 4.73 | 1.08 | 8.79 |
| 0.6 | 3.15 | 4.74 | 3.0 | 5.59 | 2.72 | 5.47 | 1.59 | 9.97 |

M: microsílíce B: blanco

En la tabla 19 se pueden observar los coeficientes determinados a partir del método colorimétrico aplicando la segunda ley de Fick para el ensayo de inmersión y las ecuaciones propuestas por Tang y Nilsson para el ACMT.

Los coeficientes determinados para el método de difusión natural son más bajos para las probetas que contienen microsílíce, que aquellos concretos que no tienen la adición.

Estos coeficientes fueron determinados a partir de la medida de profundidad alcanzada por los cloruros en la matriz cementicia, observada al rociar nitrato de plata (0.1N) y tomadas con un calibrador pie de rey de 0,01 mm de precisión. (Ver tabla 20)

Tabla 20. Profundidad del cloruro en el concreto medida a diferentes tiempos (difusión)

| Tiempo | Profundidad (cm) | | | | | |
|--------------|------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| | 0.4 | | 0.5 | | 0.6 | |
| Relación a/c | M | B | M | B | M | B |
| 30 días | 0,86 ± 0.007 | 1,52 ± 0.18 | 1.4 ± 0.009 | 2,075 ± 0.077 | 1,9 ± 0.01 | 2,33 ± 0.17 |
| 45 días | 1,2 ± 0.025 | 2,28 ± 0.04 | 1,48 ± 0.04 | 2,785 ± 0.03 | 2,27 ± 0.05 | 3,1 ± 0.04 |
| 60 días | 1,3 ± 0.1 | 2,425 ± 0.21 | 2 ± 0.15 | 3,29 ± 0.14 | 2.5 ± 0.2 | 3,54 ± 0.04 |

M: microsílíce B: blanco

Tabla 21. Profundidad del cloruro en el concreto a partir de ACMT

| Relación a/c | Profundidad (cm) | |
|--------------|--------------------|-------------------|
| | Microsílice | blanco |
| 0.4 | 0.567 \pm 0.0015 | 1.067 \pm 0.057 |
| 0.5 | 1.1 \pm 0.0017 | 1.933 \pm 0.057 |
| 0.6 | 1.6 \pm 0.001 | 2.18 \pm 0.1 |

Los valores de penetración del ion cloruro observados en la tabla 20, muestran que a medida que aumenta el tiempo y la relación a/c hay un incremento de la penetración en el concreto. Esto se le atribuye a la porosidad del material ya que la penetración será más rápida cuando la porosidad del concreto sea mayor.

Comparando los datos de penetración de las probetas con y sin adición de microsílíce se observa que las muestras de concreto que tienen esta adición presentan mayor resistencia a la penetración del ion cloruro.

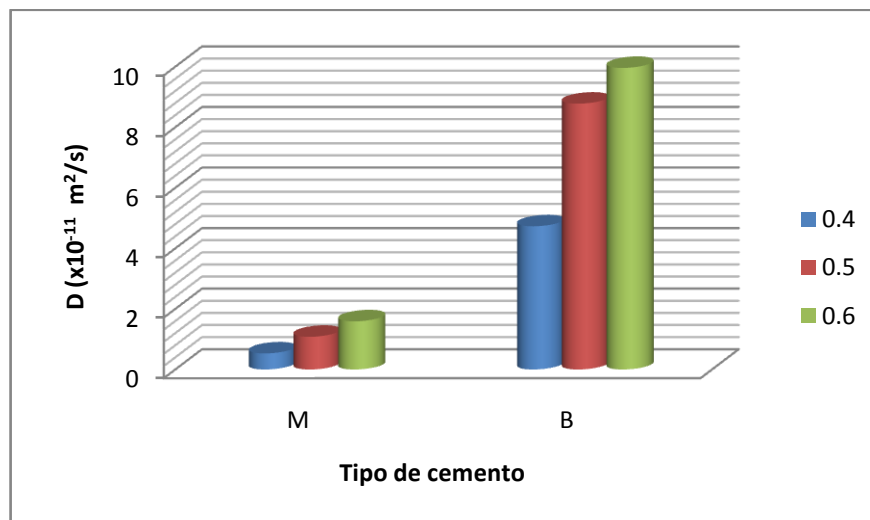
La absorción de este ión agresivo en la pasta de cemento está asociada no solo con la porosidad total del material, sino también con el tamaño de los poros, distribución y continuidad de estos. La incorporación de adiciones puzolánicas como la microsílíce modifican la porosidad del concreto, como se observa en los resultados obtenidos.

Respecto al fenómeno que ocurre en el concreto con microsílíce algunos autores indican que esta adición reduce notablemente la alcalinidad del medio, debido a su reacción con el hidróxido de calcio, y por tanto una marcada tendencia de la sal Friedel a disolverse; por lo cual la capacidad de enlace por los iones cloruros se reduciría al aumentar el porcentaje de humo de sílice presente en el hormigón. (Page et al). Por el contrario Byfords y colaboradores indican que el pH de las pastas adicionadas con microsílíce no se modifica notablemente y que la

capacidad de enlace es mayor lo cual atribuyen a la elevada superficie específica del gel en la pasta.⁴⁸

Los coeficientes hallados mediante la prueba ACMT, al igual que los determinados por el método de difusión muestran valores menores para los concretos que contienen microsilíce, debido a lo explicado anteriormente. (Ver figura 29)

Fig. 29 Coeficientes de difusión hallados a partir de ACMT para concreto con y sin Microsilíce.

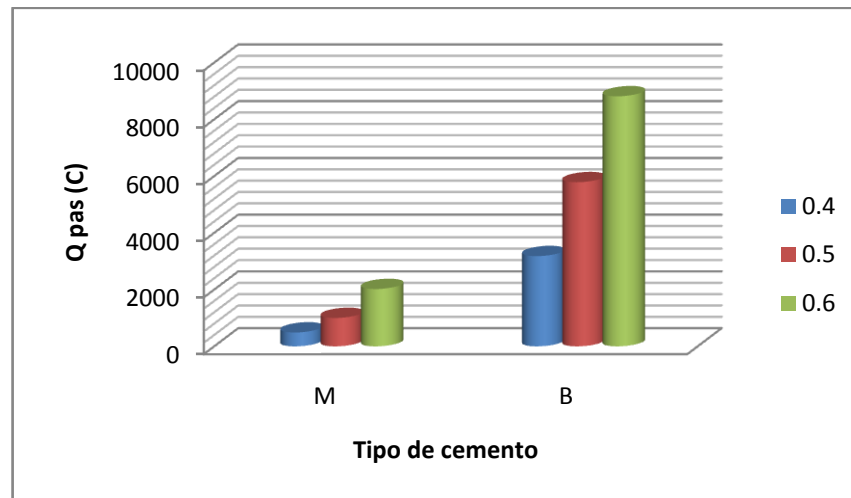


5.6 DETERMINACIÓN DE CARGA PASANTE DURANTE LAS PRUEBAS RCPT Y ACMT

La carga pasante fue determinada como el área bajo la curva de la corriente medida durante la aplicación de los ensayo RCPT y ACMT.

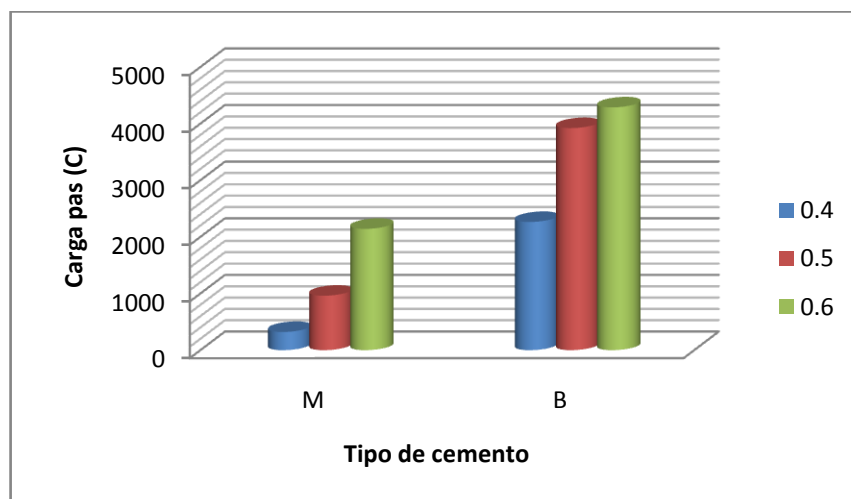
⁴⁸MEJIA, Ruby. Durabilidad y Corrosión en Materiales Cementicios. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Cytel 1999.

Fig. 30. Carga pasante en probetas con y sin adición de Microsílice (RCPT)



En la figura 30 se observa que los valores de carga para las probetas con microsílice son menores que las que no presentan esta adición. Esto se debe al efecto de la microsílice sobre la porosidad del concreto que disminuye el paso de corriente. Cabe resaltar que durante esta prueba la temperatura solo aumento 1°C para cada relación a/c (0.4, 0.5 y 0.6) respectivamente; caso contrario a las probetas sin adición de microsílice donde el aumento fue de 7°C para cada relación a/c.

Fig. 31. Carga pasante en probetas con y sin adición de Microsílice (ACMT)



Para la prueba de ACMT, el comportamiento fue similar a la prueba de RCPT para las probetas con y sin microsílíce. La disminución en los valores de carga se debe a una reducción en el voltaje y temperatura. En este caso para las probetas de microsílíce la temperatura no varió para ninguna relación, se mantuvo a temperatura ambiente.

Según Whiting aunque el “Ensayo rápido de permeabilidad del cloruro”, no mide realmente la permeabilidad sino el intercambio iónico, este da una medida indirecta de la calidad y durabilidad del concreto cualitativamente.

De acuerdo a los ensayos de carga realizados se determinó que:

Tabla 22. Resultados de permeabilidad del ion cloruro

| Relación a/c | Permeabilidad al ion cloruro | |
|--------------|------------------------------|----------|
| | Microsílíce | Blanco |
| 0.4 | Muy bajo | Moderado |
| 0.5 | Bajo | Alto |
| 0.6 | Moderado | Alto |

Lo cual indica que las mezclas de concreto con adición de microsílíce, ofrecen mayor calidad y durabilidad que las mezclas que no contienen esta adición.

Los resultados de corriente medida para los ensayos RCPT y ACMT, se reportan en el Anexo G.

CONCLUSIONES

La microsílíce utilizada como adición puzolánica en las mezclas de concreto, causa un efecto favorable sobre la permeabilidad y porosidad, ya que esta adición se ubica en los poros que están conectados con el exterior obstruyendo el paso de agentes agresivos, es decir, modifica la porosidad y por ende disminuye el coeficiente de difusión aparente; por lo tanto es posible concluir que la microsílíce proporciona una mayor resistencia a la penetración del ion cloruro en el concreto.

La relación a/c influye negativamente sobre el coeficiente de difusión aparente, permitiendo un aumento a medida que aumenta dicha relación, debido a una mayor cantidad de poros que permiten la difusión de los iones.

El uso de la microsílíce en mezclas de concreto, mejora la durabilidad y resistencia mecánica de las estructuras, además la utilización de esta adición como reemplazo parcial del clinker permite la disminución de emisiones de CO_2 , y genera un impacto económico favorable sobre la inversión en este tipo de proyectos.⁴⁹

Los ensayos RCPT y ACMT son indicadores confiables del comportamiento del ión cloruro en concretos con y sin adición de microsílíce expuestos a medios salinos, sin embargo la prueba ACMT es más conveniente ya que nos arroja datos cuantitativos de la difusión del ión cloruro.

A partir de los ensayos realizados se concluye que las mezclas de concreto con menor relación agua/cemento presentan mayor resistencia mecánica. Esto se debe a una menor cantidad de agua en la mezcla, lo que permite una estructura

⁴⁹ HERNANDEZ Rodolfo, Efecto del ion cloruro en el acero de refuerzo expuesto a soluciones simuladas de concreto. 1999

mejor compactada y con menor cantidad de porosidad interconectada que disminuye la penetración de líquidos y gases. Las mezclas con adición de microsilíce presentaron resistencias elevadas gracias a la cohesión entre las partículas de la pasta y el agregado.

La microestructura de las probetas con microsilíce no presenta cambios respecto a las que no tienen esta adición, sin embargo el contenido de gel CSH aumenta, confiriéndole una mayor resistencia mecánica al concreto.

RECOMENDACIONES

Los ensayos de difusión natural deben realizarse durante un tiempo prolongado (al menos mayor a 6 meses) con el fin de observar mejor el comportamiento del coeficiente de difusión aparente en el tiempo, ya que la velocidad de difusión en estos procesos es pequeña.

Para el ensayo ACMT, es recomendable medir la concentración del ion cloruro en la celda anódica, para determinar el tiempo en el cual ocurre el cambio de estado no estable a estable.

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.

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

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

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

ANDRADE, C. *Manual de Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras,* C.S.I.C., Madrid, 1989.

BECKER, Eduardo. *CEMENTO DE ALTO HORNO Características y Recomendaciones de Uso. Asesoría técnica. Loma negra.* 2001

BÖHNI, Hans. *Corrosion in reinforced concrete structures. Woodhead Publishing Ltd y CRC Press, Cambridge,* 2005. Págs. 98-102

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). Págs. 116-125.

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). Págs. 240–246

DEL VALLE, Angélica et al. *El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado.* Publicación Técnica No. 182 Sanfandila, Qro, 2001. Págs. 29-30, 32-35, 40-44.

FERREIRA, Miguel. *Probability-based durability analysis of Concrete Structures in Marine Environment.* University of Minho, School of Engineering. 2004. Págs. 8-9.

GIRALDO, Manuel.; TOBÓN Iván. *Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.* 2005. Págs. 70-80.

GONZALES, Manuel. *La corrosión del concreto en ambiente marino.* I Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción, American Concrete Institute, Capítulo Peruano, 1998. Pág. 3.

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

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

LÓPEZ, Raquel. *Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México.* Publicación Técnica No 292 Sanfandila, Qro 2006. Págs. 12, 17, 19.

Materiales para la producción de concretos de alto desempeño. [Consultado en junio de 2008]. Disponible en internet: <http://www.concrete.0catch.com/Capitulo21.htm>. Portugal 2007

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

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. Págs. 2, 4, 5-8, 21.



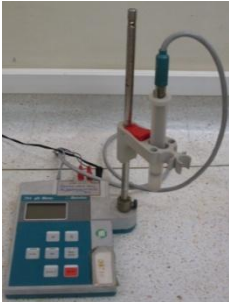



SAN JUAN, Miguel. *Calculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón.* Instituto de ciencias de la construcción "Eduardo Torroja" Madrid 1992

VELÁZQUEZ GONZÁLEZ, R. *Electrochemical evaluation of the corrosion in grade in reinforce steel in the presence of admixtures.* Portugaliae Electrochimica Acta 23 (2005) 179-194.

ANEXOS

ANEXO A.
“Equipos utilizados”

Tabla 23. Equipos utilizados

| Equipo | Uso | Equipo | Uso |
|---|--|---|--|
| <p>Balanza analítica</p>  <p>Mettler AE240</p> | <p>Medir los pesos de reactivos y muestras.</p> | <p>Medidor de vacío</p>  <p>SUN, Engine Vacuum</p> | <p>Preparación de las probetas para pruebas de RCPT y ACMT.</p> |
| <p>pH metro</p>  <p>pH 744 Meter</p> | <p>Comprobar el pH de la solución salina del estanque de la prueba de inmersión.</p> | <p>Fuente Reguladora</p>  <p>Thermo EC570-90</p> | <p>Medir datos de corriente (mA) fijando un voltaje y tiempo constante. Ensayos RCPT y ACMT.</p> |
| <p>Conductímetro</p>  <p>Conductivity Meter Quick marca HACH Sension5</p> | <p>Medir y verificar la conductividad de la solución salina del estanque.</p> | <p>Máquina de ensayos</p>  <p>Trebel</p> | <p>Determinar la resistencia a la compresión de las probetas.</p> |


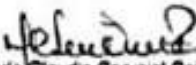
| | | | |
|--|---|---|---|
| <p>Bomba de vacío</p>  | <p>Preparación de las probetas para pruebas de RCPT y ACMT.</p> | <p>Taladro</p>  <p>Marca: perles</p> | <p>Perforar probetas de concretos para determinación de perfil de concentración</p> |
| <p>Microscopio</p>  <p>Olympus BX51</p> | <p>Observar la microestructura del concreto</p> | <p>Celda</p>  | <p>Recipiente en acrílico para el desarrollo de las pruebas RCPT y ACMT</p> |

ANEXO B
“Propiedades de los materiales “

► **Cemento:**

En la Figura 32 se muestra el reporte de calidad del fabricante.

Figura 32. Reporte de calidad del cemento

| CEMEX COLOMBIA S.A., PLANTA BUCARAMANGA | | | |
|--|------------|---|---------------|
|  | | km 4 Via Rio Negro Bucaramanga Colombia TEL. (097) 6402600 / 31714, FAX (097) 6402660 / 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 | Maximo 3.5 | Cumple |
| % MgO | | Maximo 7.0 | Cumple |
| Analisis fisicos | | Requisitos Norma NTC 121 | Observaciones |
| Superficie especifica Blaine (cm ² /g) | 4113 | Minimo 2800 | Cumple |
| Tiempos de fraguado Vicat (minutos) | | | |
| Inicial | 119 | Minimo 45 | Cumple |
| Final | 179 | Maximo 480 | Cumple |
| Expansión en autoclave (%) | 0.0025 | Maximo 0.80 | Cumple |
| Resistencias a compresión (kg/cm ²) | | | |
| 3 días | 165 | Minimo 80 | Cumple |
| 7 días | 210 | Minimo 150 | Cumple |
| 28 días | 264 | Minimo 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 | | | |

Fuente: Cemex Colombia

▮ **Agregado**

Tabla 24. Propiedades del agregado

| | A fino | A grueso |
|---|--------|----------|
| Gravedades Especificas: | | |
| Real | 2.69 | 2.70 |
| Aparente | 2.56 | 2.60 |
| Aparente s s s | 2.65 | 2.67 |
| Peso unitario suelto (Kg/m ³) | 1560 | 1530 |
| Peso unitario compactado (Kg/m ³) | 1600 | 1590 |
| Absorción % | 2.0 | 1.5 |
| Absorción % | 35.0 | 38.0 |

Tabla 25. Análisis granulométrico del agregado fino

| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO | | | | |
|--|-------------------|------------|-----------------|------------|
| Tamiz | Peso retenido (g) | % Retenido | % Retenido acum | % que pasa |
| 4 | 0 | - | - | - |
| 8 | 0 | - | - | - |
| 16 | 156.2 | 15.62 | 15.42 | 84.38 |
| 30 | 335.2 | 33.52 | 49.14 | 50.86 |
| 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 |
| Modulo de finura: 2.3 | | | | |

Tabla 26. Análisis granulométrico para agregado grueso

| ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO | | | | |
|--|-------------------|------------|-----------------|------------|
| Tamiz | Peso retenido (g) | % Retenido | % Retenido acum | % que pasa |
| 3/4 | 0 | - | - | - |
| 1/2 | 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 | | | | |

Agua

Figura 33. Reporte de calidad del agua

| MUNICIPIO: | | BUCARAMANGA | | AÑO: | | 2008 | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-----------------------------|--------------------------------------|---------------|--------------------|-------------|--|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|
| PARAMETROS MES | | Parámetros Fisicoquímicos | | | | | | | | | | | | |
| | | No. Muestras Fisicoquímicas | 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 |
| Enero | 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 |
| 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 | 24,6 | 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 | 21,6 | 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 |
| Octubre | 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 |
| Noviembre | 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 |
| Diciembre | 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 |

Fuente: www.amb.com.co

Diseño de la mezcla

Con base en las proporciones dadas por el fabricante (Ver sección 4.2.2.2), se determinó las proporciones empleadas para fabricar las probetas para las tres diferentes relaciones a/c:

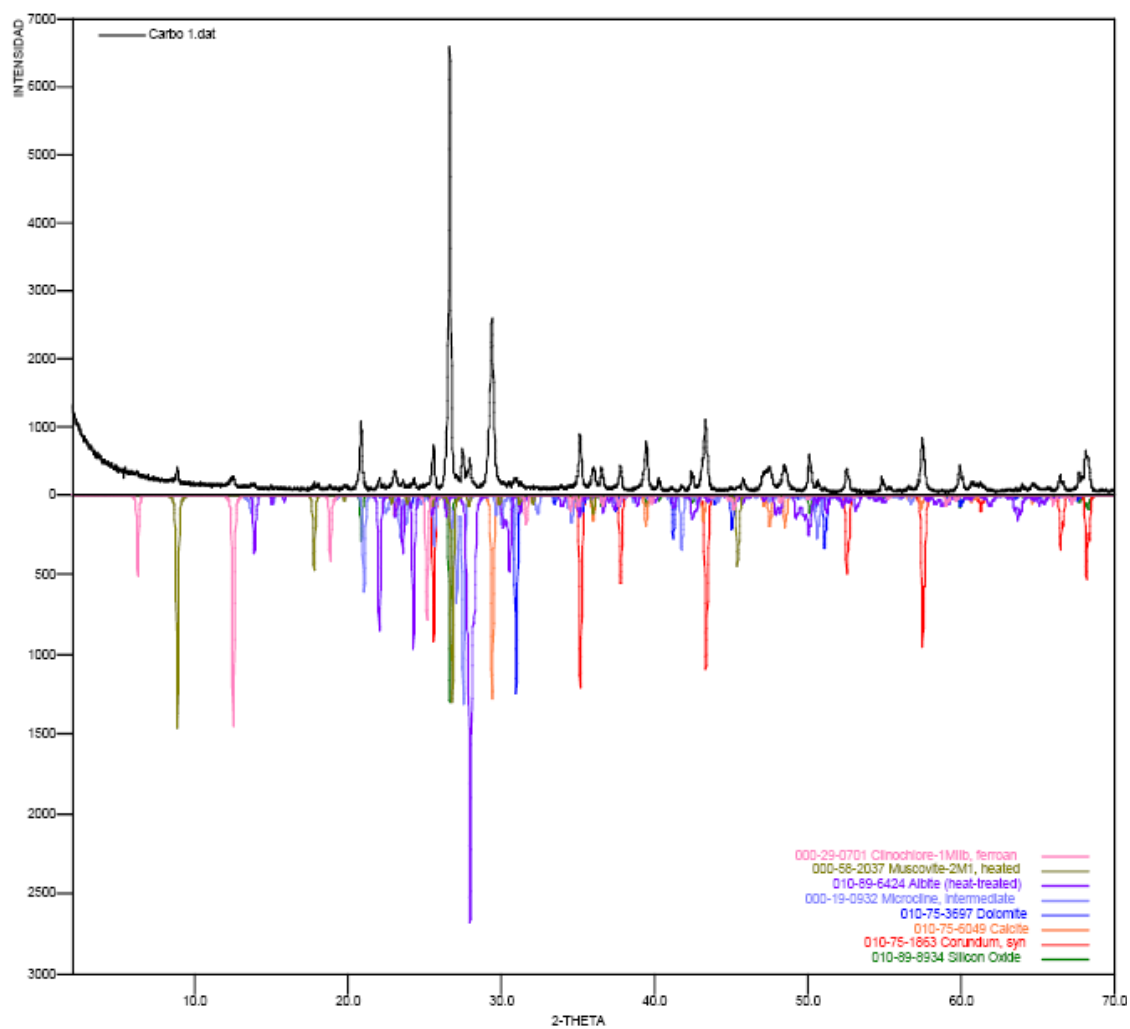
Tabla 27. Diseño de mezcla para concreto con a/c: 0.4, 0.5, 0.6

| Relación a/c | BLANCOS (Kg) | | | MICROSÍLICE (Kg) | | |
|----------------|--------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| Cemento | 11.13 | 11.13 | 11.13 | 10.017 | 10.017 | 10.017 |
| Grueso (grava) | 17.98 | 17.98 | 17.98 | 17.98 | 17.98 | 17.98 |
| Fino (arena) | 16.68 | 16.68 | 16.68 | 16.68 | 16.68 | 16.68 |
| Microsílice | - | - | - | 1.172 | 1.172 | 1.172 |
| Agua | 4.45 L | 5.56 L | 6.68 L | 4.47 L | 5.59 L | 6.71 L |

ANEXO C.
“Análisis difracción de rayos X”

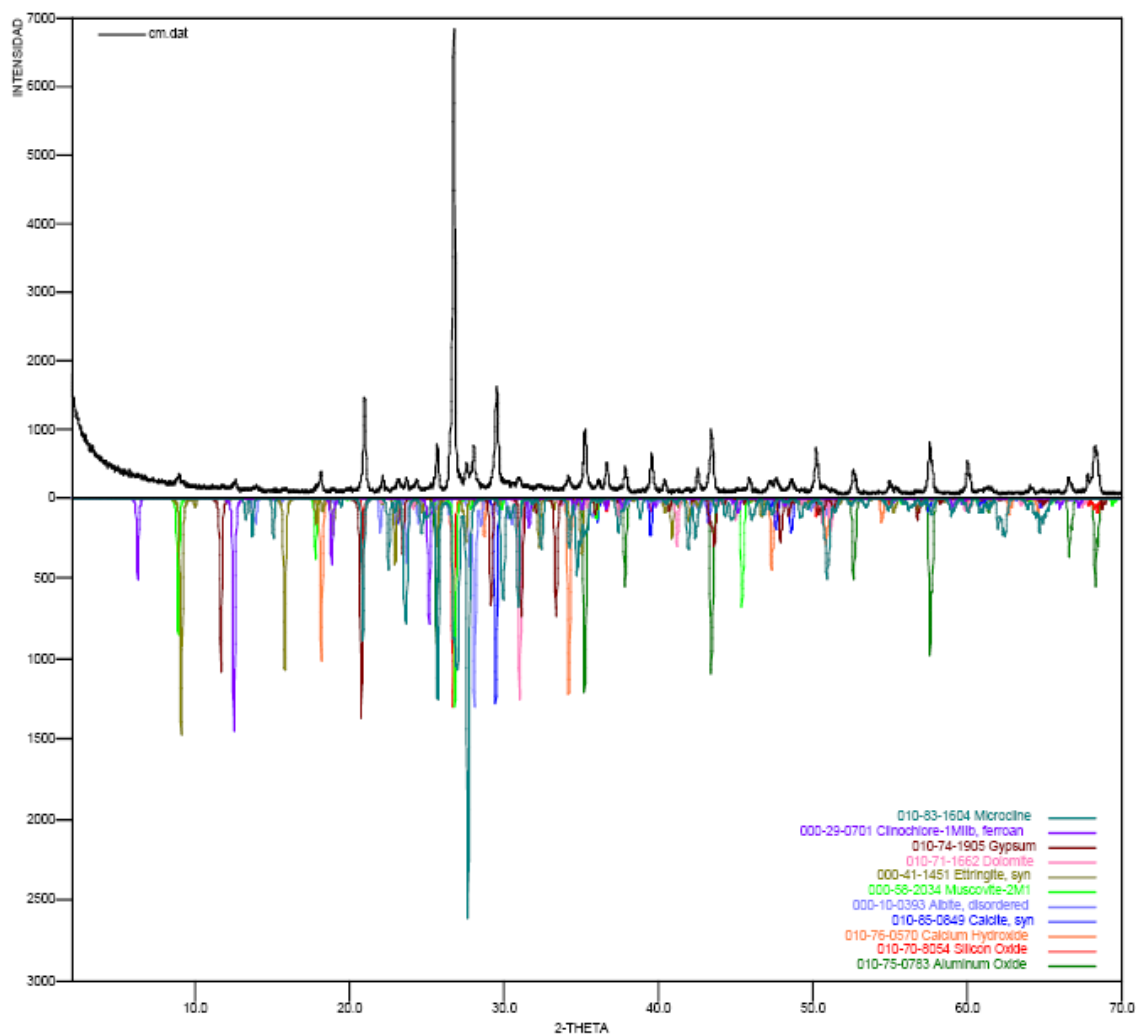
Difractograma muestra sin microsílíce

Figura 34. Difractograma de muestra sin microsílíce



► **Difractograma muestra con microsílice**

Figura 35. Difractograma de muestra con microsílice



ANEXO D.
“Perfiles de concentración del ion cloruro”

Los valores del contenido de cloruro dan una idea del grado de contaminación y de la evolución posible del daño de la estructura. A continuación se muestran los perfiles hallados para 30 y 45 días de las muestras de concreto con y sin microsílíce.

Perfiles a 30 días con y sin microsílíce

Fig. 36. Perfil de cloruros 30 días, a/c: 0.4

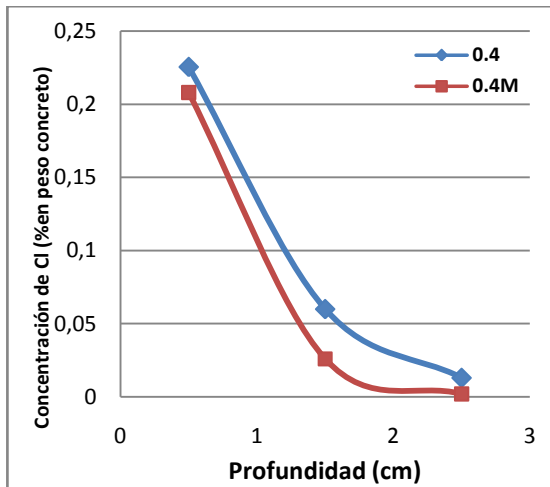


Fig. 37: Perfil de cloruros 30 días, a/c: 0.5

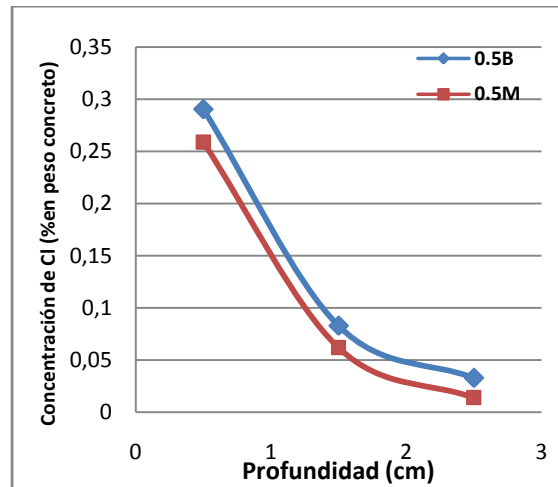
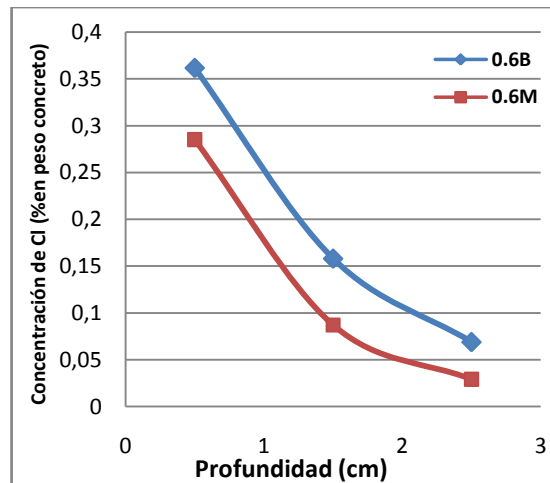


Fig. 38. Perfil de cloruros 30 días, a/c: 0.6



Perfiles a 45 días con y sin microsílíce

Fig. 39. Perfil de cloruros 45 días, a/c: 0.4

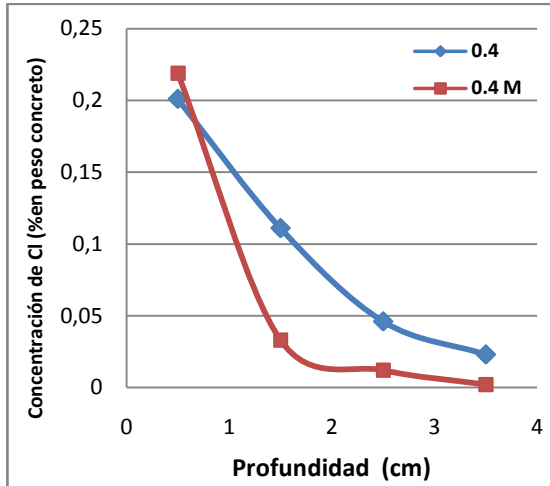


Fig. 40. Perfil de cloruros 45 días, a/c: 0.5

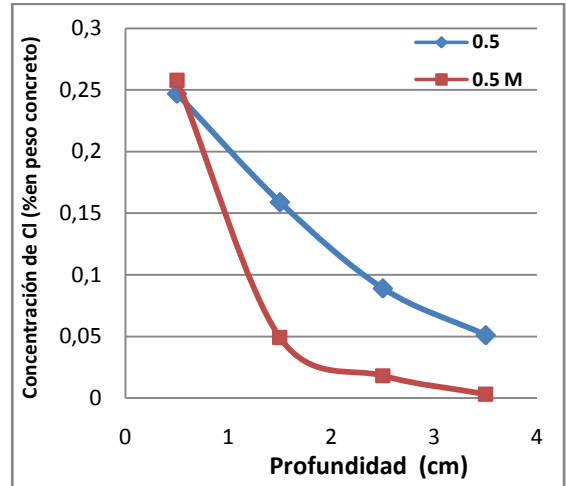
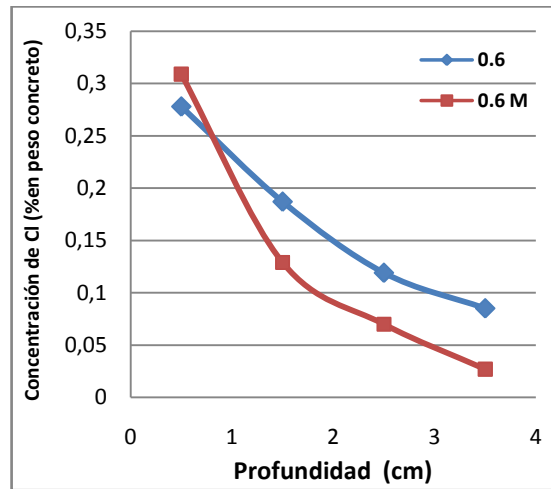


Fig. 41. Perfil de cloruros 45 días, a/c: 0.6



ANEXO E.
**“Determinación del coeficiente a partir del perfil de
concentración”**

▮ Graficas para la determinación del coeficiente de difusión a 45 días.

Fig. 42. Perfil de concentración a 45 días

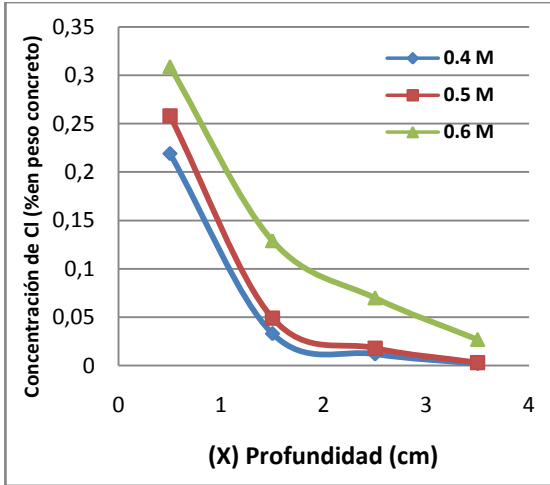


Fig. 43. Linealización del perfil a 45 días

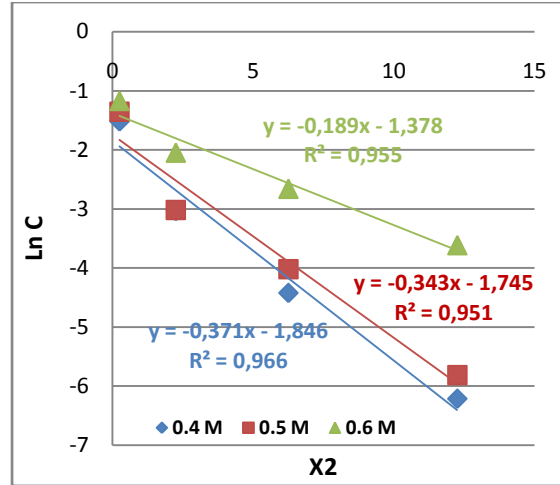


Fig. 44. Ajuste a la curva exponencial

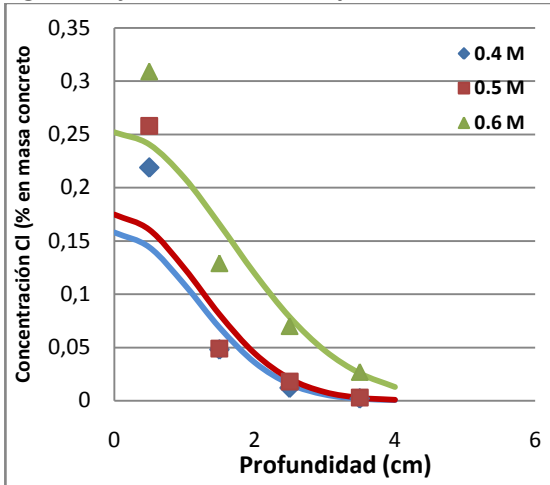


Fig. 45. Ajuste a la función error

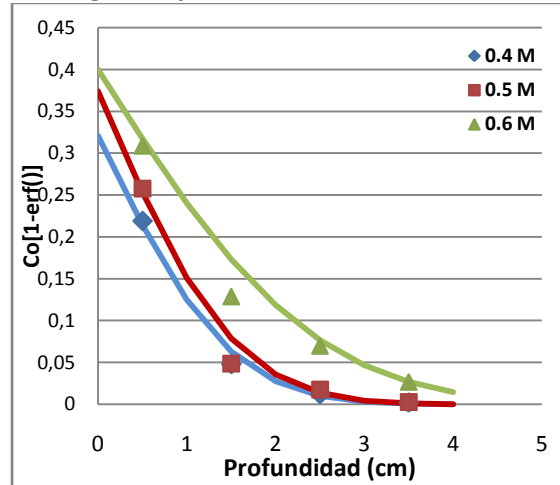


Tabla 28. Resultados de coeficiente de difusión del ion cloruro a 45 días

| Coeficiente Relación a/c | Blanco | | Microsílice | |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| | D Ajuste exp E-11 (m2/s) | D Ajuste erf E-11 (m2/s) | D Ajuste exp (m2/S) | D Ajuste erf E-11 (m2/s) |
| 0.4 | 3.63 | 4.55 | 1.73 | 1.74 |
| 0.5 | 5.06 | 8.31 | 1.87 | 1.85 |
| 0.6 | 6.84 | 9.24 | 3.43 | 4.71 |

■ Graficas para la determinación del coeficiente de difusión a 60 días.

Fig. 46. Perfil de concentración a 60 días

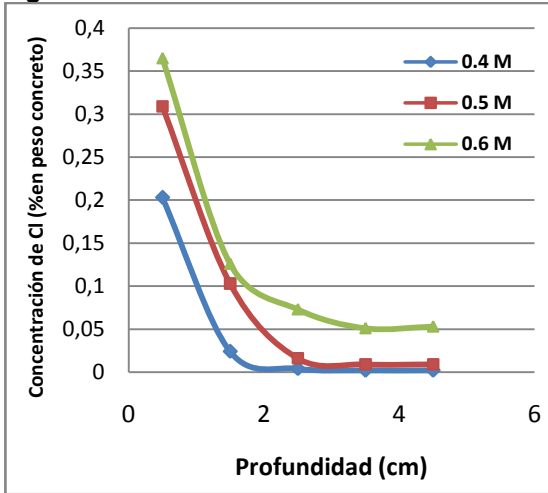


Fig.47. Linealización del perfil a 60 días

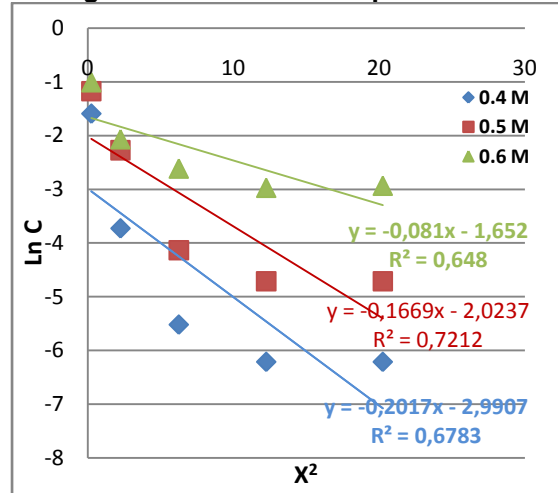


Fig. 48. Ajuste a la curva exponencial

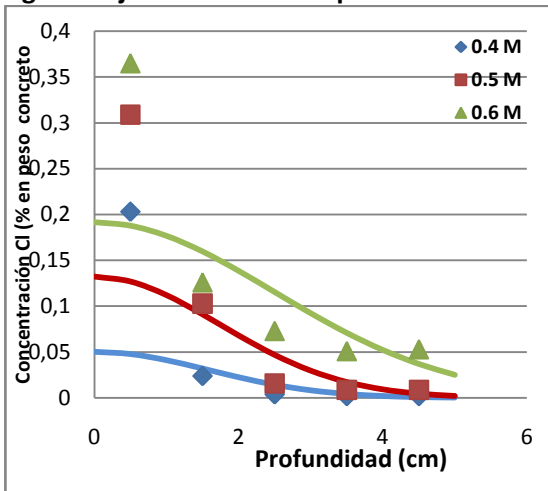
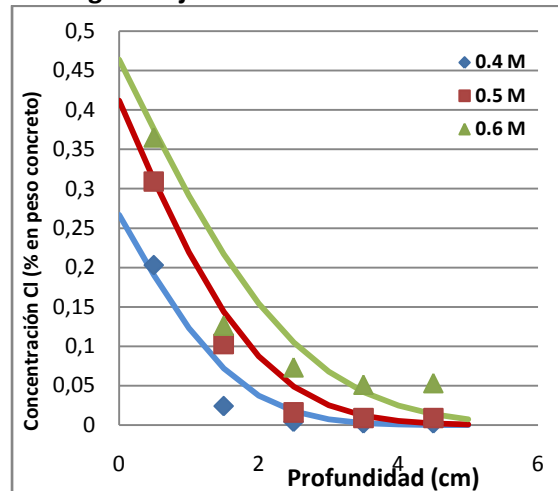


Fig. 49. Ajuste a la función error



Las curvas muestran que para 60 días los valores hallados no se ajustan a las curvas exponencial error. Esto se le atribuye a factores externos difíciles de controlar en estos procesos.

Tabla 29. Resultados de coeficiente del ion cloruro a 60 días

| Coeficiente Relación a/c | Blanco | | Microsilíce | |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| | D Ajuste exp E-11 (m2/s) | D Ajuste erf E-11 (m2/s) | D Ajuste exp (m2/S) | D Ajuste erf E-11 (m2/s) |
| 0.4 | 5.48 | 5.38 | 2.39 | 1.78 |
| 0.5 | 6.52 | 9.05 | 2.91 | 2.47 |
| 0.6 | 6.79 | 9.55 | 5.95 | 4.11 |

ANEXO F.
“Determinación del coeficiente a partir de colorimetría”

Las graficas muestran los coeficientes de difusión de cloruros determinados a partir del método colorimétrico para concretos con y sin microsílíce.

Fig.50 Coeficientes de difusión natural para 30 días

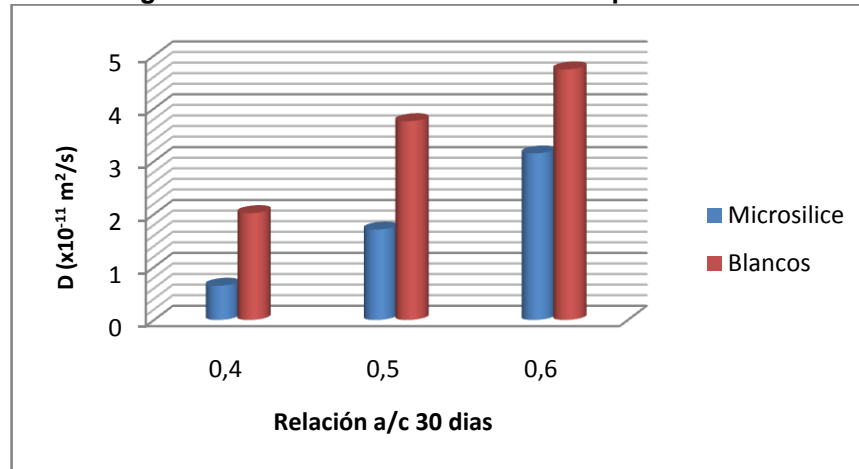


Fig.51. Coeficientes de difusión natural para 45 días

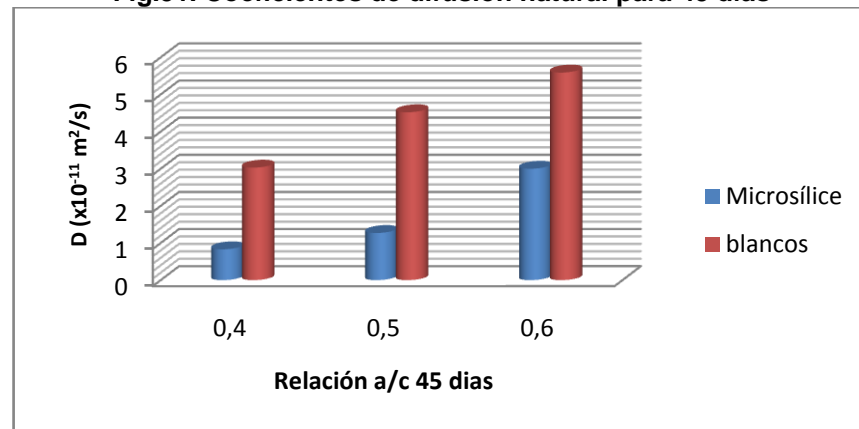
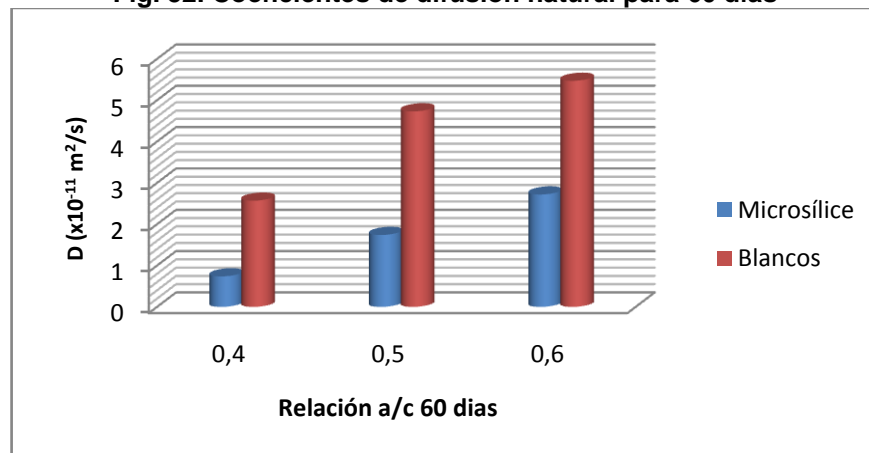
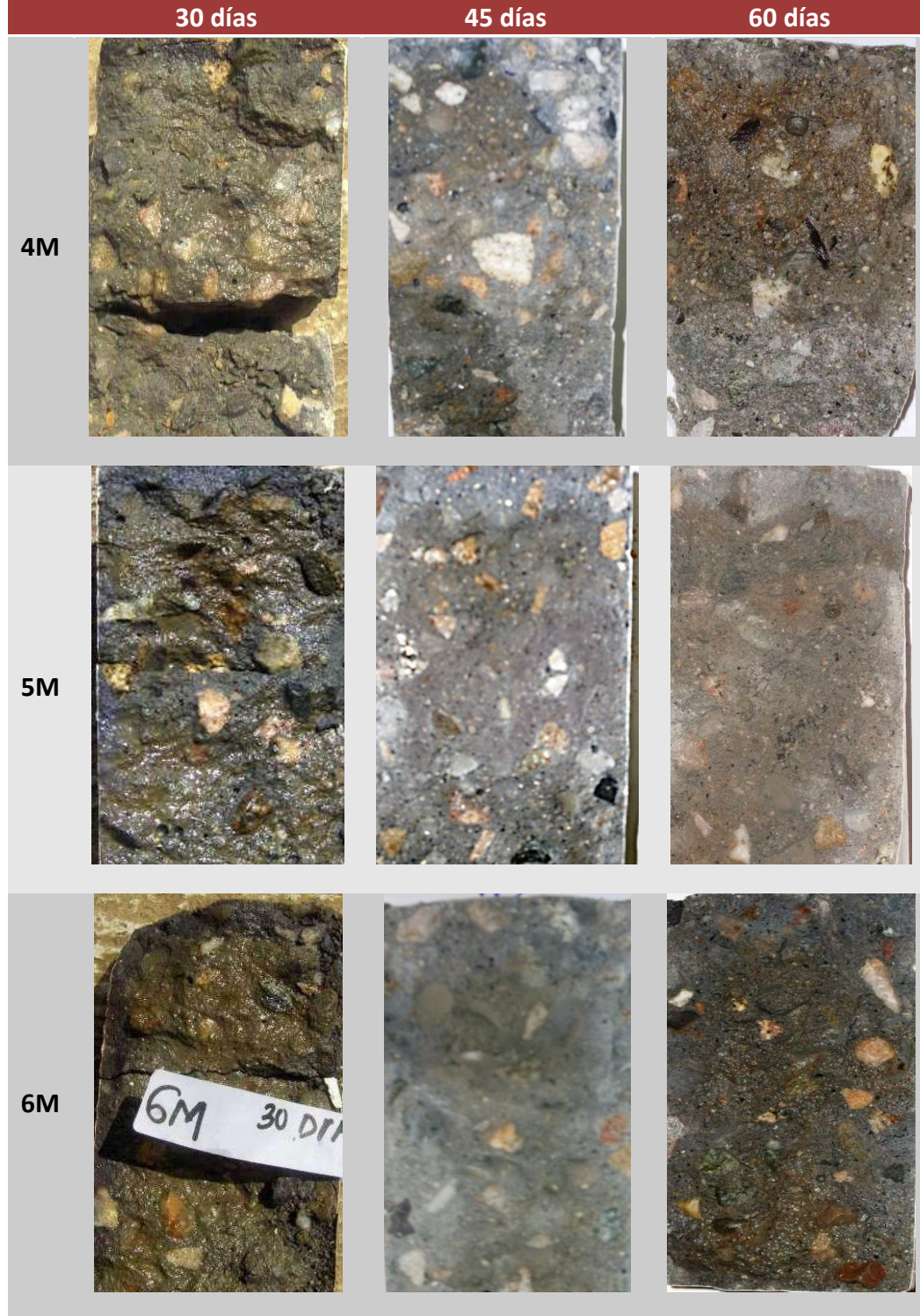


Fig. 52. Coeficientes de difusión natural para 60 días



En la figura se muestra la penetración del ion cloruro, medida a partir del cambio de color en la probeta.

Fig. 53 Fotografías prueba de colorimetría difusión natural relación a/c:0.4, 0.5, 0.6 con microsílíce



ANEXO G.
“RESULTADOS RCPT Y ACMT”

La corriente pasante a través de las probetas de concreto permitió calcular la carga pasante a partir del área bajo la curva de la corriente medida.

▮ Carga pasante

Tabla 30. Carga pasante RCPT

| Relación a/c | 0.4 | | 0.5 | | 0.6 | |
|---------------------------------|---------|-------------|----------|-------------|---------|-------------|
| Tipo de cemento | Blanco | Microsílice | Blanco | Microsílice | Blanco | Microsílice |
| Q_{pasante} (Coulombs) | 3181.13 | 589.27 | 5786.108 | 1001.17 | 8813.63 | 2020.87 |

Tabla 31. Carga pasante ACMT

| Relación a/c | 0.4 | | 0.5 | | 0.6 | |
|---------------------------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|
| Tipo de cemento | Blanco | Microsílice | Blanco | Microsílice | Blanco | Microsílice |
| Q_{pasante} (Coulombs) | 2263.47 | 320.57 | 3921.36 | 939.8 | 4286.87 | 2103.43 |

▮ Resultados de corriente

Corriente Vs tiempo RCPT

Figura 54. Microsílice

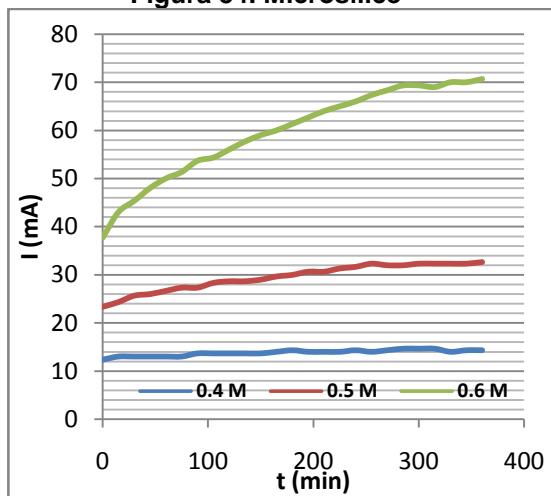
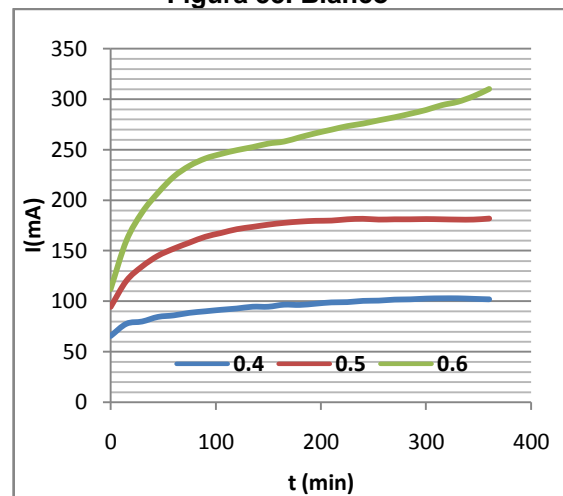


Figura 55. Blanco



Corriente Vs tiempo ACMT

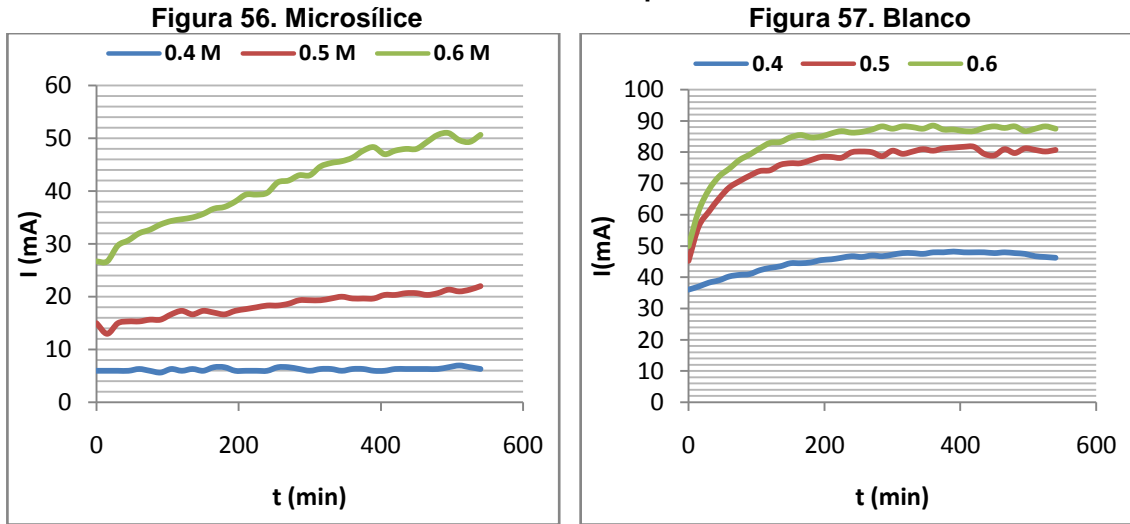


Tabla 32. Corriente Vs tiempo RCPT

| I prom (mA) RCPT Microsílice | | | | I prom (mA) RCPT Blancos | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------|-------------|-------------|
| t (min) | 0.4M | 0.5M | 0.6M | 0.4B | 0.5B | 0.6B |
| 0 | 12.3 | 23.3 | 37.7 | 65.7 | 94.5 | 112.2 |
| 15 | 13 | 24.3 | 43 | 77.7 | 120.2 | 160 |
| 30 | 13 | 25.7 | 45.3 | 80 | 134.5 | 188 |
| 45 | 13 | 26 | 48 | 84.5 | 145 | 207.2 |
| 60 | 13 | 26.7 | 50 | 86 | 152 | 223.2 |
| 75 | 13 | 27.3 | 51.3 | 88.5 | 158 | 234 |
| 90 | 13.7 | 27.3 | 53.7 | 90 | 163.7 | 241.2 |
| 105 | 13.7 | 28.3 | 54.3 | 91.5 | 167.5 | 245.7 |
| 120 | 13.7 | 28.7 | 56 | 92.7 | 171.2 | 249.5 |
| 135 | 13.7 | 28.7 | 57.7 | 94.5 | 173.5 | 252.5 |
| 150 | 13.7 | 29 | 59 | 94.5 | 175.7 | 256 |
| 165 | 14 | 29.7 | 60 | 96.5 | 177.5 | 258 |
| 180 | 14.3 | 30 | 61.3 | 96.2 | 178.7 | 262.2 |
| 195 | 14 | 30.7 | 62.7 | 97.5 | 179.5 | 266.2 |
| 210 | 14 | 30.7 | 64 | 98.7 | 179.7 | 269.7 |
| 225 | 14 | 31.3 | 65 | 99 | 181 | 273.2 |
| 240 | 14.3 | 31.7 | 66 | 100.25 | 181.5 | 275.7 |
| 255 | 14 | 32.3 | 67.3 | 100.5 | 180.7 | 279 |
| 270 | 14.3 | 32 | 68.3 | 101.5 | 181 | 282 |
| 285 | 14.7 | 32 | 69.3 | 101.7 | 181 | 285.5 |
| 300 | 14.7 | 32.3 | 69.3 | 102.5 | 181.2 | 289.2 |
| 315 | 14.7 | 32.3 | 69 | 102.7 | 181 | 294 |
| 330 | 14 | 32.3 | 70 | 102.7 | 180.7 | 297.2 |
| 345 | 14.3 | 32.3 | 70 | 102.2 | 180.7 | 302.7 |
| 360 | 14.3 | 32.7 | 70.7 | 101.7 | 181.7 | 310 |

Tabla 33. Corriente Vs tiempo RCPT

| I prom (mA) ACMT Microsilíce | | | | I prom (mA) ACMT Blancos | | |
|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------|------------|------------|
| t (min) | 0.4 M | 0.5 M | 0.6 M | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| 0 | 6 | 15 | 26.7 | 36 | 45,25 | 50 |
| 15 | 6 | 13 | 26.7 | 37 | 56,25 | 61,25 |
| 30 | 6 | 15 | 29.7 | 38,25 | 61 | 68 |
| 45 | 6 | 15.3 | 30.7 | 39 | 65,25 | 72,25 |
| 60 | 6.3 | 15.3 | 32 | 40,25 | 68,75 | 74,75 |
| 75 | 6 | 15.7 | 32.7 | 40,75 | 70,75 | 77,5 |
| 90 | 5.7 | 15.7 | 33.7 | 41 | 72,5 | 79,25 |
| 105 | 6.3 | 16.7 | 34.3 | 42,25 | 74 | 81,25 |
| 120 | 6 | 17.3 | 34.7 | 43 | 74,25 | 83 |
| 135 | 6.3 | 16.7 | 35 | 43,5 | 76 | 83,25 |
| 150 | 6 | 17.3 | 35.7 | 44,5 | 76,5 | 84,75 |
| 165 | 6.7 | 17 | 36.7 | 44,5 | 76,5 | 85,5 |
| 180 | 6.7 | 16.7 | 37 | 44,75 | 77,5 | 84,75 |
| 195 | 6 | 17.3 | 38 | 45,5 | 78,5 | 85 |
| 210 | 6 | 17.7 | 39.3 | 45,75 | 78,5 | 86 |
| 225 | 6 | 18 | 39.3 | 46,25 | 78,25 | 86,75 |
| 240 | 6 | 18.3 | 39.7 | 46,75 | 80 | 86,25 |
| 255 | 6.7 | 18.3 | 41.7 | 46,5 | 80,25 | 86,5 |
| 270 | 6.7 | 18.7 | 42 | 47 | 80 | 87,25 |
| 285 | 6.3 | 19.3 | 43 | 46,75 | 78,75 | 88,25 |
| 300 | 6 | 19.3 | 43 | 47,25 | 80,5 | 87,5 |
| 315 | 6.3 | 19.3 | 44.7 | 47,75 | 79,5 | 88,25 |
| 330 | 6.3 | 19.7 | 45.3 | 47,75 | 80,25 | 88 |
| 345 | 6 | 20 | 45.7 | 47,5 | 81 | 87,5 |
| 360 | 6.3 | 19.7 | 46.3 | 48 | 80,5 | 88,5 |
| 375 | 6.3 | 19.7 | 47.7 | 48 | 81,25 | 87,25 |
| 390 | 6 | 19.7 | 48.3 | 48,25 | 81,5 | 87,25 |
| 405 | 6 | 20.3 | 47 | 48 | 81,75 | 86,75 |
| 420 | 6.3 | 20.3 | 47.7 | 48 | 81,75 | 86,75 |
| 435 | 6.3 | 20.7 | 48 | 48 | 79,5 | 87,75 |
| 450 | 6.3 | 20.7 | 48 | 47,75 | 79 | 88,25 |
| 465 | 6.3 | 20.3 | 49.3 | 48 | 81 | 87,75 |
| 480 | 6.3 | 20.7 | 50.7 | 47,75 | 79,75 | 88,25 |
| 495 | 6.7 | 21.3 | 51 | 47,5 | 81,25 | 86,75 |
| 510 | 7 | 21 | 49.7 | 46,75 | 80,75 | 87,5 |
| 525 | 6.7 | 21.3 | 49.3 | 46,5 | 80,25 | 88,25 |
| 540 | 6.3 | 22 | 50.7 | 46,25 | 80,75 | 87,5 |