

**IMPACTO DE LAS ADICIONES PARA CONCRETO EN LA REDUCCIÓN DE LA  
PERMEABILIDAD AL IÓN CLORURO VS LA RELACIÓN AGUA CEMENTO**

**CRISTHIAN CAMILO MONTAÑA MUÑOZ  
RODRIGO ALONSO CARMONA HERRERA**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2015**

**IMPACTO DE LAS ADICIONES PARA CONCRETO EN LA REDUCCIÓN DE LA  
PERMEABILIDAD AL IÓN CLORURO VS LA RELACIÓN AGUA CEMENTO**

**CRISTHIAN CAMILO MONTAÑA MUÑOZ  
RODRIGO ALONSO CARMONA HERRERA**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director  
MARISOL NEMOCÓN RUIZ  
Ingeniero Civil  
FREDY ENRIQUE GARZÓN REYES  
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2015**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

---

---

---

---

Director de Investigación

---

Asesor Metodológico

---

Jurado

Bogotá D.C., junio de 2015

*Primero que todo, este logro es dedicado a Dios, por darme la sabiduría y el entendimiento, por ir de mi mano en cada uno de los pasos que di en el camino de mis estudios de pregrado y mi vida profesional.*

*A mis hijos por ser el motor de mi vida y la motivación diaria, mi razón de existir, ya que por ellos me convertí en la persona que hoy en día busca un mejor mañana, por ustedes y para ustedes, haré lo que sea necesario para poder brindarles amor, felicidad y bienestar*

*A mi esposa por su apoyo incondicional, por su confianza, paciencia y voz de aliento en la persecución de este sueño.*

*A mis padres y a mi hermano, por su amor, porque con sus palabras de aliento y su gran apoyo, hicieron de mí una persona capaz de conseguir y luchar por cada una de mis metas y sueños, por la formación ética y moral que me inculcaron y con la que buscaron fortalecerme para que fuera una persona de bien y útil a la sociedad.*

*En general a toda mi familia y amigos, en los que siempre encontré una voz de ánimo y apoyo.*

*“Este título no es mío, es un logro de todos y para todos”*

*Cristhian Camilo Montaña Muñoz*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos:

Agradecimiento total a nuestra mi familia y amigos.

A la Universidad Católica de Colombia y a cada uno de sus docentes, quienes compartieron su sabiduría y experiencia en la construcción y afianzamiento de mis conocimientos, con los cuales desarrollaré mi vida personal y profesional

A Holcim (Colombia) S.A. y a cada una de las personas de esta prestigiosa multinacional que intervinieron de una u otra forma en mi vida, en donde encontré un apoyo y una confianza, laboral y personal, en donde me han dado la oportunidad de crecer profesionalmente, donde he podido complementar mis fundamentos a través de la experiencia y el conocimiento. Por permitirme desarrollar este trabajo de investigación con el cual aportaré en la profundización de nuevos productos y nuevas tecnologías de concreto.

A mis compañeros de la universidad y ya colegas, en quienes encontré un apoyo y de quienes aprendí de cada una de sus vidas.

A mis directores de trabajo de grado, A la Ingeniera Marisol Nemocón Ruiz por parte de la Universidad Católica de Colombia y al Ingeniero Fredy Enrique Garzón Reyes, por servirme de guía en el desarrollo de este trabajo de investigación, por toda su dedicación y enseñanza.

Autor: Cristhian Camilo Montaña Muñoz

Al finalizar este trabajo de investigación para optar por el título de Ingeniero Civil debo agradecer de manera sincera y especial a mis tutores de tesis tanto de la Universidad Católica de Colombia a la ingeniera Marisol Nemocón Ruiz como al Ingeniero Fredy Garzón Reyes director del grupo de investigación y desarrollo de la empresa Holcim de Colombia, ya que gracias a su ayuda y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable tanto para el desarrollo de este trabajo como los conocimientos adquiridos para el desarrollo de mi futura vida profesional. De igual manera resalto el apoyo incondicional de mi familia ya que sin ellos este logro no había sido posible.

Autor: Rodrigo Alonso Carmona Herrera

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. ANTECEDENTES	12
2. PROBLEMÁTICA	13
2.1 DURABILIDAD DEL CONCRETO	13
2.2 IMPACTO DE LOS CLORUROS EN EL CONCRETO	15
3. OBJETIVOS	18
3.1 OBJETIVO GENERAL	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4. MARCO TEÓRICO	20
4.1 PERMEABILIDAD DEL CONCRETO ANTE EL IÓN CLORURO	20
4.1.1 Formas de ingreso de los iones cloruro al concreto	20
4.1.2 Mecanismos de transporte de fluidos	21
4.1.3 Consecuencias del ingreso de iones cloruro sobre la estructura del hormigón endurecido y las armaduras	21
4.1.4 Contenido de ión cloruro	21
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	22
4.2.1 Agregados	23
4.2.2 Cemento	24
4.2.3 Agua	25
4.2.4 Aditivos	26
4.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO	26
4.3.1 Resistencia a la compresión	28
4.3.1.1 Elaboración de muestras	29
4.3.1.2 Curado de especímenes	31
4.3.2 Caracterización del concreto de acuerdo a la relación a/mc	34
4.3.3 Adiciones para mitigar el ataque de los cloruros	35
4.3.3.1 Filler de piedra caliza	36
4.3.3.2 Microsilica	36
4.3.3.3 Metacaolín	36
4.3.3.4 Puzolanas	36
5. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	38
5.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO - PERMEABILIDAD ION CLORURO	38
5.1.1 Objeto	38
5.1.2 Alcance	38
5.1.3 Equipos y materiales consumibles	39

	pág.	
5.1.4	Elementos de ensayo	40
5.1.5	Condiciones ambientales	41
5.1.6	Descripción del ensayo	42
5.1.7	Cálculos	43
5.1.8	Tiempos de ejecución	44
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
6.1	MEZCLA TESTIGO	45
6.2	MEZCLA CON ADICIÓN DE FILLER	47
6.3	MEZCLA CON ADICIÓN DE METACAOLIN	50
6.4	MEZCLA CON ADICIÓN DE MICROSILICE 1	53
6.5	MEZCLA CON ADICIÓN DE MICROSILICE 2	55
6.6	MEZCLA CON ADICIÓN DE CERÁMICO BLANCO	58
7.	CONCLUSIONES	62
	BIBLIOGRAFÍA	64



## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Contenido máximo de ión cloruro	21
Tabla 2. Requisitos del concreto según la clase de exposición	25
Tabla 3. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla testigo	45
Tabla 4. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla testigo	46
Tabla 5. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Filler	48
Tabla 6. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Filler	48
Tabla 7. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Metacaolín	50
Tabla 8. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Metacaolín	51
Tabla 9. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Microsílice 1	53
Tabla 10. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Microsílice 1	54
Tabla 11. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Microsílice 2	55
Tabla 12. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Microsílice 2	56
Tabla 13. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Cerámico blanco	59
Tabla 14. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Cerámico blanco	60

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Factores que afectan la durabilidad del concreto	13
Figura 2. Efectos del Ión Cloruro	16
Figura 3. Agregados pétreos	24
Figura 4. Composición del concreto	27
Figura 5. Especímenes cilíndricos para ensayos	31
Figura 6. Cuarto de curado	32
Figura 7. Prensa para ensayos de concreto en estado endurecido	34
Figura 8. Olla de vacío y bomba	39
Figura 9. Equipo para ensayo de Permeabilidad Ión Cloruro	40
Figura 10. Celdas de acrílico	40
Figura 11. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla testigo	45
Figura 12. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla testigo	46
Figura 13. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla testigo	47
Figura 14. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Filler	48
Figura 15. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Filler	49
Figura 16. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla con adición de Filler	50
Figura 17. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Metacaolín	51
Figura 18. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Metacaolín	52
Figura 19. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla con adición de Metacaolín	52
Figura 20. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Microsílice 1	53
Figura 21. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Microsílice 1	54
Figura 22. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla con adición de Microsílice 1	55
Figura 23. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Microsílice 2	56
Figura 24. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Microsílice 2	57
Figura 25. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla con adición de Microsílice 2	58
Figura 26. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Cerámico blanco	59
Figura 27. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Cerámico blanco	60
Figura 28. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla con adición de Cerámico blanco	61

## INTRODUCCIÓN

Los elementos en la construcción, fabricados en concreto reforzado y que se encuentran expuestos al ataque de los cloruros tienen un periodo corto de servicio. El ataque del Ión Cloruro logra penetrar a través del concreto, logrando la corrosión del acero de refuerzo convirtiéndose, alterando y debilitando el elemento de acuerdo a lo que fue diseñado, obteniendo como resultado afectaciones en la durabilidad y el óptimo funcionamiento de las construcciones.

Este problema es identificado a gran escala en ciudades costeras, ya que los sulfatos presentes en las aguas marinas, son catalogados como agentes nocivos para el concreto, generando desintegración, erosión, expansión y corrosión en el material. Todos los anteriores efectos son de naturaleza exógena, es decir atacan desde la parte externa hacia el interior del elemento. De la misma forma, existen ataques químicos endógenos que tienen un efecto altamente nocivo para las estructuras, es decir, se producen desde el interior de la matriz del material, siendo una de las más estudiadas la reacción álcali-sílice, la cual provoca una expansión interna del hormigón causando la expansión y desintegración del mismo.<sup>1</sup>

En el caso de los ataques exógenos que puede sufrir el concreto no solamente se encuentran los que están sometidos al contacto con aguas marinas, también el concreto está propenso a ataques biológicos por interacción directa con aguas residuales o ambientes que contengan microorganismos como bacterias u hongos.

Por los problemas mencionados con el ataque de los cloruros es que se ha determinado realizar este trabajo de investigación, buscando por medio de adiciones a la mezcla, mitigar estas condiciones de deterioro prematuro del material y con el fin de plantear propuestas que conlleven a obtener una durabilidad de las estructuras, permitiendo a las partes involucradas en la investigación, tener criterios para definir las relaciones de materiales más convenientes a la hora de participar en un proyecto de ingeniería.

---

<sup>1</sup> GONZALES, Manuel. IV Coloquio de química del cemento comportamiento del cemento en la corrosión del acero por cloruros en el concreto armado [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: [http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f\\_doc/concreto/ataque\\_quimico/MGC42\\_concreto\\_armado.pdf](http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/concreto/ataque_quimico/MGC42_concreto_armado.pdf)>.

## 1. ANTECEDENTES

Existe una conciencia general en la práctica constructiva común respecto de las precauciones que deben seguirse en la fabricación de elementos y estructuras de concreto claramente expuestos a ambientes de carácter agresivo, por el deterioro que ocasiona el contacto directo con sustancias naturales en el suelo o en el agua. Dada su elevada concentración de cloruros (más de 20,000 ppm), destaca como medio ofensivo el agua de mar en su estado normal porque favorece la corrosión del acero de refuerzo.

Las primeras experiencias de corrosión inducidas por el ión cloruro fueron estudiadas en el período 1940 a 1960, tratándose mayoritariamente de estructuras pretensadas de concreto con aditivos de cloruro de calcio y posteriormente con el aumento de sales de deshielo a base de cloruro de calcio. En pavimentos, se presentó un gran incremento en la literatura relacionada con el tema de corrosión en los años 1965 a 1975. Finalmente, por el desarrollo de las estructuras Marítimas, como es el caso de las plataformas de petróleo y el incremento de la construcción en Oriente Medio y Golfo Árabe entre otros, se observaron nuevos problemas de corrosión inducida por cloruros, potenciada por el ambiente marino, clima cálido y las circunstancias de las zonas áridas, en las cuales se comprobó la ineficacia de las regulaciones de protección generalmente aceptadas en países del norte.<sup>2</sup>

No obstante, se presentan en la actualidad serios y veloces deterioros estructurales por el ataque al concreto de cloruros disueltos en el aire, presentes en ambientes marinos con alta humedad relativa y acción constante del viento, tales como las zonas costeras. En algunas circunstancias, el problema se agrava por la presencia de intensa y variada actividad industrial.

En el desarrollo de este trabajo de investigación, revisaremos el proceso de afectación del concreto y del acero de refuerzo sometidos a ambientes que no resultan por sí mismos tan claramente agresivos, a causa de la acción de los cloruros, a no ser por la evidencia de ataques anteriores que han resultado en su degradación o destrucción.

---

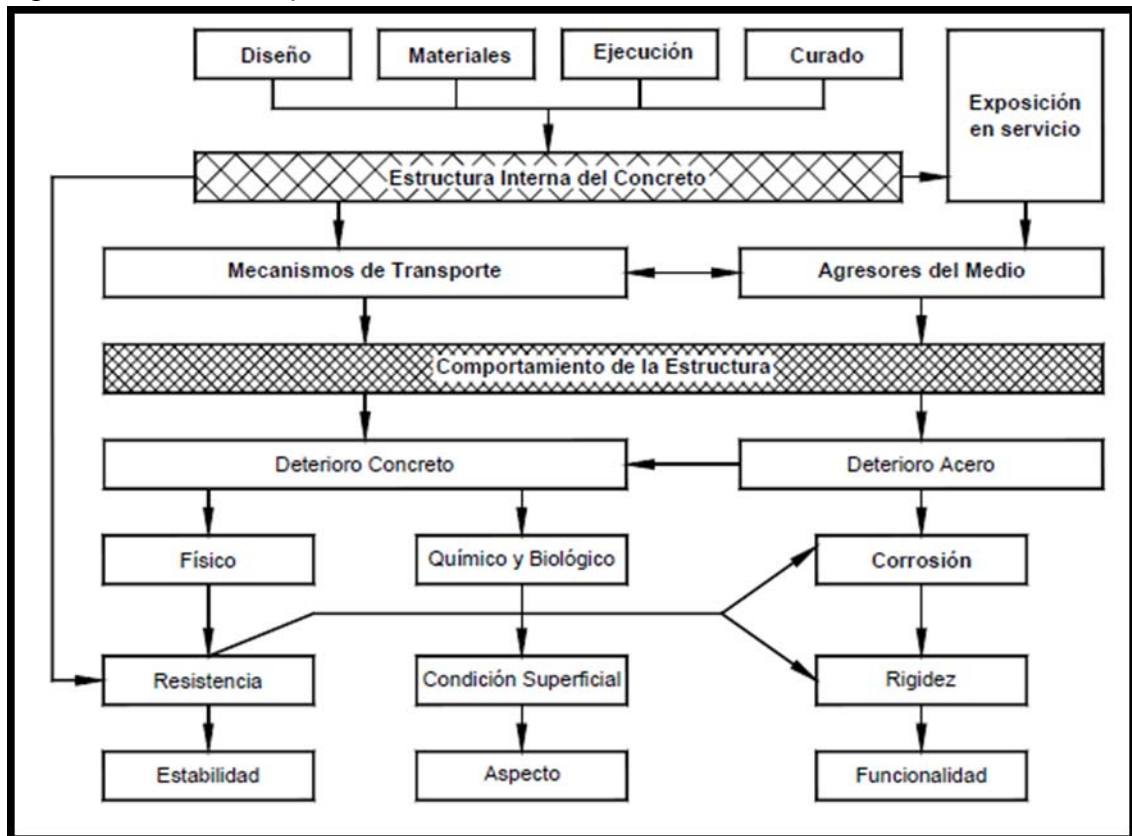
<sup>2</sup> Ibíd.

## 2. PROBLEMÁTICA

### 2.1 DURABILIDAD DEL CONCRETO

Buscando una durabilidad de las construcciones, no solamente las realizadas en concreto reforzado, sino también con los diferentes materiales y procesos constructivos usados actualmente en el campo de las obras de infraestructura, se ha planteado poder obtener proyectos durables los cuales tengan la capacidad de poder ofrecer un óptimo servicio de acuerdo al diseño estipulado inicialmente. Para ello, se contempla ir más allá que un simple cumplimiento de las especificaciones y normatividades durante las diferentes etapas de ejecución de las obras, sino que también sea obligatorio realizar una proyección de la durabilidad de las mismas<sup>3</sup>.

Figura 1. Factores que afectan la durabilidad del concreto.



Fuente: ICONTEC. Durabilidad de estructuras de concreto. Bogotá D.C: ICONTEC, 2007. p. 6. [NTC 5551].

<sup>3</sup> ICONTEC. Durabilidad de estructuras de concreto. Bogotá D.C: ICONTEC, 2007. p. 7. [NTC 5551].

En la normatividad colombiana, específicamente para el caso en el cual se use concreto como material estructural, se han planteado diferentes parámetros, los cuales deben ser tenidos en cuenta, como los relacionados a continuación:

- Materiales. Los materiales usados para la fabricación de concreto, deben cumplir con los diferentes parámetros establecidos en la NTC 3318, siendo estas las condiciones básicas para poder obtener un concreto durable. Allí, se deben tener en cuenta los diferentes tipos de materiales que son usados en la mezcla, tales como<sup>4</sup>:

- Cemento
- Agregados
- Agua
- Aditivos químicos
- Adiciones
- Otros materiales

- Curado. Es uno de los factores más importantes en el concreto luego de su colocación, ya que si garantizamos buenas condiciones de humedad y temperatura para la óptima hidratación del cementante, podremos potencializar la integridad del concreto, excelente desempeño y desarrollo de las diferentes propiedades que tiene este material en los diferentes elementos estructurales y no estructurales. Así mismo se evitara la aparición de fisuras por contracción plástica y de secado<sup>5</sup>.

- Control de agrietamiento. Este control está vinculado desde el diseño del elemento en cuanto a la cuantía de acero de refuerzo en zonas donde el elemento se va a ver sometido a soportar fuerzas de tensión, tanto como en el tipo de mezcla que se va a usar y las precauciones pertinentes durante su manipulación y reacciones posteriores que se puedan presentar durante el fraguado. De acuerdo al proceso constructivo, se determinan valores máximos de separación de fisuras.<sup>6</sup>

- Reactividad Alkali – Agregado. Este es otro de los parámetros más medidos actualmente en las construcciones y que es de vital importancia en la durabilidad del concreto. Consiste en validar la reacción que pueden llegar a tener los álcalis del cemento con los agregados, pudiendo ocasionar expansión en la mezcla, generando fisuramiento, lo cual deteriora y disminuye la durabilidad. Esta medida se basa en análisis petrográficos y realización de ensayos de reactividad potencial por el método químico o el método de barras de mortero.<sup>7</sup>

---

<sup>4</sup> ICONTEC. Producción de concreto. Bogotá D.C: ICONTEC, 2008. p. 11. [NTC 3318].

<sup>5</sup> ICONTEC. Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra. Bogotá D.C: ICONTEC, 2000. p. 5. [NTC 550].

<sup>6</sup> *Ibíd.*, p. 4.

<sup>7</sup> *Ibíd.*, p. 3.

- Exposición del concreto a los ataques de sulfatos. Se debe tener en cuenta los diferentes agentes (suelos y aguas) a los cuales se va a ver sometido el concreto, siendo los más nocivos las aguas marinas, aguas de residuos industriales, aguas residuales entre otros. Para esto se debe contemplar el uso de cementantes resistentes al ataque de los sulfatos o adiciones que lo ayuden a mitigar.<sup>8</sup>
- Recubrimiento del acero de refuerzo. Este ítem está amarrado al cumplimiento de los requerimientos mínimos de recubrimientos en concreto, ya sea por condiciones ambientales o por protección del acero de refuerzo en los elementos. Para ellos se deben validar las tolerancias mínimas estipuladas en los manuales de diseño o en la NSR 10<sup>9</sup>

Año tras año se presentan diferentes casos en los cuales las pérdidas por la corrosión del acero de refuerzo suman cantidades importantes de dinero y una de las más representativas es la corrosión inducida por el ión cloruro.<sup>10</sup>

En términos generales, las estructuras se diseñan para una vida útil de 50 años. Para ello, hay que garantizar que los materiales, componentes y otros, se comportarán óptima y adecuadamente durante ese período, sin acarrear un costo inesperado de mantenimiento<sup>11</sup>.

## 2.2 IMPACTO DE LOS CLORUROS EN EL CONCRETO

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto es el problema más común que afecta a la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado. La corrosión inducida por el ataque de cloruros es uno de los principales mecanismos de deterioro que afecta al funcionamiento de las estructuras sobre todo en ambientes agresivos como las que están cerca de las zonas costeras.<sup>12</sup>

El concreto es el material que se encarga de brindar una protección física y química al acero de refuerzo mediante su recubrimiento, evitando la penetración de cloruros que pueden causar despasivación del acero que conlleva a un alto riesgo de corrosión. Teniendo en cuenta que el concreto tiene una apariencia de sólido compacto, puede ser permeable a diferentes fluidos dado que posee poros capilares que pueden formar canalículos que conectándose entre sí, pueden conducir comunicación con la superficie del elemento. De esta manera, la estructura se hace débil ante el flujo del ión cloruro a través del concreto desde la

<sup>8</sup> INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA. Revista Tecnología en marcha. En: Revista Tecnología en marcha, 2008, p. 114.

<sup>9</sup> REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE - NSR 10. TÍTULO C Durabilidad del concreto. Bogotá D.C: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010, p. 372.

<sup>10</sup> GONZALES DE LA COTERA, Manuel. Op. Cit.

<sup>11</sup> *Ibíd.*

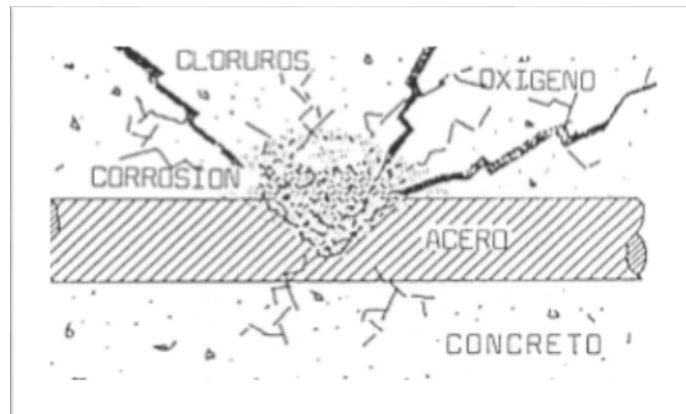
<sup>12</sup> *Ibíd.*

parte exterior hacia la parte interna haciendo facil la difusión ya sea por medio propio o por medio del agua.<sup>13</sup>

La difusión del ión cloruro en el concreto se reduce por la capacidad del cemento para combinarlo química o físicamente, en cuanto reacciona con los productos de hidratación. Los componentes del cemento que reaccionan son el aluminato tricálcico (C3A) o  $3CaO \cdot Al_2O_3$  que forman cloro-aluminatos cálcicos de composición aproximada:  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$  y la fase ferrita reaccionando el ferroaluminato tetra cálcico, (C 4 FA) o  $4CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot Al_2O_3$  con la formación del cloroferrito cálcico, de composición:  $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ .<sup>14</sup>

El ión cloruro que actúa alrededor del refuerzo destruye localmente la película protectora pasivante. El tipo de cloruro presente actúa de manera singular en el valor de la alcalinidad. Por ejemplo el cloruro de calcio la reduce ligeramente, por incrementar la resistencia iónica total, mientras que, por el contrario el cloruro de sodio incrementa débilmente debido a la alta alcalinidad del ión sodio.<sup>15</sup>

Figura 2. Efectos del Ión Cloruro.



Fuente: GONZALES DE LA COTERA, Manuel. IV Coloquio de química del cemento comportamiento del cemento en la corrosión del acero por cloruros en el concreto armado [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: [http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f\\_doc/concreto/ataque\\_quimico/MGC42\\_concreto\\_armado.pdf](http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/concreto/ataque_quimico/MGC42_concreto_armado.pdf)>.

Existe una concentración crítica de cloruros para el inicio de la corrosión , pero no existe parametros sobre el nivel de esta concentración, en razón de la intervención de factores propios del concreto, como la relación agua-material cementante (a/mc), el tipo de cemento y el estado de endurecimiento. Para que se presente la

<sup>13</sup> Ibíd.

<sup>14</sup> Ibíd.

<sup>15</sup> Ibíd.



corrosión por cloruro, además de la presencia de oxígeno y humedad se requiere de un determinado valor denominado potencial crítico de cloruros, llamado también potencial de corrosión, en función del contenido de cloruros.<sup>16</sup>

Teniendo en cuenta que los factores mas influyentes en la conducción al ión cloruro pueden ser el clima y las altas humedades, como en las zonas costeras, se hace necesario buscar mitigar estas condiciones por diferentes medios, siendo la mas practica y economica la disminucion de la relación a/mc, aumentando el recubrimiento del acero o aplicando algun recubrimiento protector impermeable. Cuando las condiciones son mas agresivas, será necesario implementar medidas mas extremas como el uso de de resinas epóxicas o protección catodica.<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> Ibíd.

<sup>17</sup> Ibíd.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar la capacidad del concreto para resistir el ataque del Ión cloruro de acuerdo a las variaciones de relación a/mc, usando adiciones que mitiguen este fenómeno.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conocer la problemática que genera la corrosión del acero de refuerzo producida por el ión cloruro, y sus impactos en los elementos estructurales.
- Realizar una mezcla de concreto sin ningún tipo de adiciones, con el fin de obtener resultados como parámetro de medición de permeabilidad al ión cloruro y resistencia a la compresión.
- Realizar mezclas de concreto a diferentes relaciones a/mc (0.25, 0.35, 0.50, 0.65, 0.75) y a su vez adicionando materiales (Filler, Cerámicos, Adiciones específicas) para mitigar la permeabilidad del concreto al ión cloruro.
- Obtener especímenes cilíndricos de 100mm de diámetro y 200mm de altura de cada una de las mezclas de concreto, los cuales serán usados para los ensayos de Resistencia a la compresión y Permeabilidad del concreto al ión cloruro.
- Recopilar la información obtenida de los resultados de ensayos de laboratorios, con el fin de estimar ajustes de mezclas con adiciones que genere concretos de baja permeabilidad.
- Analizar los resultados obtenidos con cada uno de los materiales de mitigación, validando su influencia en el comportamiento de resistencia y permeabilidad.
- Realizar gráficas y tablas con el fin de determinar conclusiones y recomendaciones de acuerdo a los diferentes resultados obtenidos.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 PERMEABILIDAD DEL CONCRETO ANTE EL IÓN CLORURO

La penetración de los cloruros depende de la permeabilidad del concreto y está determinada por la facilidad relativa con que el concreto puede saturarse de agua, por lo tanto, la permeabilidad se asocia mucho con la vulnerabilidad del concreto a la congelación. Además, la permeabilidad del concreto es importante también en relación a lo hermético de las estructuras que retienen líquidos, inclusive, la penetración de humedad en el concreto afecta sus propiedades de aislamiento térmico<sup>18</sup>.

La permeabilidad del concreto no es solamente función de su porosidad, sino que depende también del tamaño, la distribución y la continuidad de los poros. La permeabilidad del concreto se ve afectada por las propiedades del cemento. Para una misma relación a/mc, el cemento grueso tiende a producir una pasta de más porosidad que un cemento fino. La composición del cemento afecta la permeabilidad en cuanto a su influencia sobre la rapidez de hidratación, pero el grado final de porosidad y de permeabilidad no se afecta.<sup>19</sup>

Un concreto con baja relación a/mc (con mínimo contenido de agua), buena gradación de los agregados, manejable y bien compactado es casi impermeable, por lo tanto muy durable.

4.1.1 Formas de ingreso de los iones cloruro al concreto. La presencia de iones cloruro en el concreto puede deberse a dos situaciones diferentes: ingresaron en el momento de preparación de la mezcla; e ingresaron durante la vida en servicio de la estructura.<sup>20</sup>

El primer caso es lógicamente más severo que el segundo, aunque es el más fácil de evitar con un adecuado control de los componentes de la mezcla. Las situaciones más comunes son que los iones cloruro integren el agua de amasado (aguas salobres), constituyan una contaminación del agregado fino o formen parte de los aditivos (particularmente, aditivos Acelerantes).<sup>21</sup>

En el segundo caso, corresponde a situaciones típicas de estructuras cerca de un ambiente agresor, por ejemplo el marino, en las que el ión cloruro ingresa

---

<sup>18</sup> RIVERA, Gerardo. Concreto simple [en línea]. Popayán [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/doc/189675237/Tecnologia-Del-Concreto>>.

<sup>19</sup> Ibíd.

<sup>20</sup> REVISTA CEMENTO. Durabilidad de las estructuras: corrosión inducida por el ión cloruro [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.icpa.org.ar/publico/files/rev27ion.pdf>>.

<sup>21</sup> Ibíd.

lentamente desde el exterior y cuando alcanza las barras, se inicia el deterioro propiamente dicho. El ingreso del ión cloruro a la estructura está vinculado al transporte de fluidos en un medio poroso, por lo que se centrará la atención en comprender los distintos mecanismos que intervienen:

4.1.2 Mecanismos de transporte de fluidos. Sin pretender un tratamiento completo del tema, es útil señalar que existen básicamente 4 mecanismos de transporte de fluidos dentro del concreto: Succión capilar, difusión, permeabilidad y una combinación de succión y permeabilidad conocida como efecto "mecha".

La succión capilar se produce cuando el concreto seco se pone en contacto con un líquido, en nuestro caso, agua con iones cloruro disueltos. El efecto de la tensión capilar provoca un ingreso rápido del agua dentro del concreto, cuanto peor sea la calidad del concreto de recubrimiento. Obviamente, para un concreto saturado su capacidad de absorción capilar es nula.

El transporte de un fluido está controlado por la permeabilidad del concreto cuando existe una diferencia de presión hidráulica entre dos secciones adyacentes que provoca o induce el movimiento del fluido. Es claro también que un concreto más denso, menos poroso (más resistente) y bien curado, es menos permeable. Es condición necesaria que ambas caras del concreto estén en contacto con el fluido (agua) para poder considerar que el mecanismo de transporte es la permeabilidad. Afortunadamente, los concretos de buena calidad son muy poco permeables.

El transporte de una solución puede producirse por diferencias de concentración entre dos zonas adyacentes, es decir, en una zona del concreto la concentración es mayor que en otra; esto genera un movimiento desde la zona más concentrada hacia la zona menos concentrada, intentando establecer un equilibrio. Este tipo de proceso se conoce como "difusivo" y es bastante lento. Un ejemplo típico es el ingreso de  $\text{CO}_2$  desde la atmósfera, provocando la carbonatación del concreto.

La cuarta forma de transporte combina dos fenómenos. Por una cara "húmeda", ingresa el fluido, controlado por la permeabilidad del material. Por la cara opuesta, en contacto con el aire, se evapora agua y existe una zona intermedia, en el interior del material, donde se producen meniscos que aceleran el proceso de transporte. La evaporación en la superficie "seca" acelera el ingreso de fluido desde la parte húmeda y, por analogía, se lo denomina "efecto mecha". Este proceso es más rápido que el transporte por difusión y que el controlado por la permeabilidad, aunque es más lento que la succión capilar.

Dependiendo de las condiciones de exposición del concreto y su contenido de humedad, prevalecerá un mecanismo u otro, cambiando la velocidad de

ingreso del fluido (agua con iones cloruro en nuestro caso) en el material y alterando la duración del período de incubación del deterioro.

El contenido máximo de ión cloruro, en el concreto endurecido, para evitar la despasivación del acero de refuerzo por picado es del orden de 0.25% del peso del material cementante.

4.1.3 Consecuencias del ingreso de iones cloruro sobre la estructura del hormigón endurecido y las armaduras. El ión cloruro reacciona con las fases aluminato para formar un compuesto relativamente insoluble conocido como Sal de Friedel. Este compuesto es levemente expansivo pero no es capaz de inducir tensiones severas que deterioren al concreto. La formación de esta sal, inmoviliza temporalmente los iones cloruro, reduciendo su movilidad para alcanzar a las armaduras y romper su condición pasiva.

Ciertamente, el daño más severo asociado al ingreso de iones cloruro se produce en el concreto armado, porque la corrosión del acero va acompañada de incremento de volumen, figuración del concreto y desprendimiento del recubrimiento. El óxido de hierro no es resistente a la tracción, se debilita la adherencia entre el concreto y acero y, cuando la pérdida de la sección útil es significativa, puede llegar a producir el colapso de la estructura.

4.1.4 Contenido de ión cloruro. El contenido máximo de ión cloruro aportado por los ingredientes de la mezcla no debe ser mayor a lo establecido en la siguiente tabla.<sup>22</sup>

Tabla 1. Contenido máximo de ión cloruro.

Tipo de elemento	Contenido máximo del ión cloruro (Cl expresado como porcentaje de peso de material cementante)
Concreto preesforzado	0,06
Concreto reforzado expuesto al cloruro en servicio	0,15
Concreto reforzado que estará seco o protegido de la humedad en servicio	1,00
Otros tipos de construcción en concreto reforzado	0,30

Fuente: ICONTEC. Durabilidad de estructuras de concreto. Bogotá D.C: ICONTEC, 2007. p. 8. [NTC 5551].

Según la especificación NSR 10 en el título C, capítulo C4 - Requisitos de durabilidad: Cuando los concretos se ensayan para obtener el contenido de ión cloruro soluble en el agua, los ensayos deben hacerse a una edad de 28 a 42 días, donde los límites máximos permitidos de porcentaje por masa son:

---

<sup>22</sup> Ibíd., p. 435.

Tabla 2. Requisitos del concreto según la clase de exposición.

Tipo de construcción y condición	Límites de iones cloruro, porcentaje por masa		
	Método de ensayo		
	Soluble en ácido	Soluble en agua	
	ASTM C1152	NTC 4049 (ASTM C1218M)	Soxhlet*
Concreto preesforzado	0.08	0.06	0.06
Concreto reforzado húmedo en servicio	0.10	0.08	0.08
Concreto reforzado seco en servicio	0.20	0.15	0.15

Fuente: REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE - NSR 10. TITULO C Durabilidad del concreto. Bogotá D.C: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010, p. 378.

Estos límites deben aplicarse a los cloruros aportados por los componentes del concreto y no al ambiente que lo rodea. Este aporte de cloruros se debe generalmente al agua que se usó para la preparación de la mezcla o a los diferentes aditivos que suelen ser adicionados en la preparación de la mezcla.<sup>23</sup>

#### 4.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La selección de materiales usados en la mezcla de concreto, se hace de acuerdo a lo establecido en la NTC 3318 – Producción de concreto, y a una serie de especificaciones que determinan la calidad de cada uno de los componentes, con el fin de dar cumplimiento a diferentes características y propiedades de la mezcla, como la resistencia, una óptima dosificación, homogeneidad de la mezcla, manejabilidad, durabilidad, entre otros.

La selección de los materiales usados para las mezclas de concreto y sus dosificaciones, se basan en los materiales clasificados que tienen en la planta de concreto para la producción y de los cuales se hará una breve descripción.

<sup>23</sup> INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA. Op. Cit., p. 115.

4.2.1 Agregados. La palabra agregados se refiere a cualquier combinación de arena, grava o roca triturada en su estado natural o procesado. Son minerales comunes, resultado de encontrados en ríos y valles, donde han sido depositados por las corrientes de agua. Los depósitos de arena y grava están constituidos por materiales que han sido separados más o menos de otros.

El agregado constituye una de las partes más importantes de concreto, desde el punto de vista de volumen, ya que ocupa alrededor del 70% de la mezcla. Una de sus funciones es la de llenante de la mezcla y dejar la menor cantidad de espacios entre cada una de las partículas, para que estos sean llenados por la pasta de cemento. Adicional a ser un componente llenante de la mezcla, los agregados deben cumplir con diferentes requisitos de calidad, los cuales serán una de las propiedades y características para la durabilidad del concreto. Una de las propiedades de los agregados es que sean de naturaleza inerte, ya que con ello se busca garantizar que no haya reacciones químicas con los otros componentes de la mezcla o con el medio ambiente que los rodea. También es importante que el comportamiento mecánico y su resistencia sean acorde a las solicitudes a las que se va a ver expuesto.

Los parámetros que se validan en un agregado sea fino (Todo material que pase por el tamiz N° 4) o grueso (Material que pasa por malla con aberturas de 4" y que está retenido en el tamiz N° 4) que va a ser usado para una mezcla de concreto, se encuentran estipulados en la Norma NTC 174 "Especificaciones de los agregados para concreto" y de los cuales se resaltan los siguientes:

- Agregado Fino.

- Gradación
- Sustancias dañinas
- Impurezas orgánicas
- Sanidad
- Densidad y absorción
- Equivalente de arena
- Límites e índices de plasticidad
- Reactividad álcali - agregado

- Agregado grueso.

- Gradación
- Sustancias dañinas
- Sanidad
- % de caras fracturadas
- Índices de aplanamiento y alargamiento
- Densidad y absorción

- Equivalente de arena
- Terrones de arcilla y partículas deleznales
- Partículas livianas
- Desgastes

Los agregados usados en la producción de concreto y de las mezclas generadas para la investigación, son proceso de trituración de materiales de río, procedentes de la zona de Saldaña (Tolima) y de los cuales se validan los parámetros estipulados en la normatividad.

Figura 3. Agregados pétreos.



Fuente: CABRERA, Rouseel. Geología aplicada a la ingeniería civil [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://rouseelcabrera.blogspot.com/p/semana-16.html>>.

4.2.2 Cemento. Es un material conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. Hasta este punto la molienda entre estas rocas es llamada Clinker, esta se convierte en cemento cuando se le agrega yeso, este le da la propiedad a esta mezcla para que pueda fraguar y endurecerse. Mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece, adquiriendo consistencia pétreo, denominada concreto.

El cemento usado para las mezclas de concreto, debe cumplir con lo estipulado en las Normas NTC 121 “Cemento portland, Especificaciones físicas y mecánicas” y NTC 321 “Cemento portland, Especificaciones químicas” o en su defecto en las normas ASTM. Dentro de los parámetros medidos para la calidad del cemento, se destacan los siguientes:



- Finura.
- Expansión en autoclave.
- Tiempos de fraguado.
- Resistencia a la compresión.
- Calor de hidratación.
- Expansión a los sulfatos.

El cemento que se utilizó para la realización de las mezclas de concreto, está clasificado como un Cemento ART de acuerdo a la clasificación de la norma NTC 121.

4.2.3 Agua. El agua para la producción de concreto debe ser limpia y libre de cualquier tipo de sustancia que pueda ser dañina para la mezcla como tal, como para el refuerzo del material o el elemento estructural, lo cual se va a ver reflejado en la durabilidad del concreto. Si hay algún tipo de agua del cual se tenga alguna duda de su calidad o comportamiento en la mezcla, solamente se podrá usar si se tienen ensayos que sustenten el comportamiento de ésta o algún registro que valide que no se verá perjudicada la mezcla o el producto final.

Las aguas para la producción de concreto pueden ser de fuentes naturales, aguas superficiales o aguas de lavado (proveniente de la limpieza de las mezcladoras), siempre y cuando cumpla con los parámetros estipulados en la Norma NTC 3459 "Agua para la elaboración de concreto". Las variaciones de la calidad del agua para concreto, se verán reflejados notablemente en los resultados de los tiempos de fraguado y la resistencia a la compresión, entre otros.

Dentro de los parámetros medidos para la calidad del agua, se destacan los siguientes:

- Ensayos Químicos.
  - Calcio
  - Magnesio
  - Sodio
  - Potasio
  - Bicarbonato
  - Sulfatos
  - Cloruros
  - Nitratos
  - Carbonatos
  - Álcalis
  - Sólidos totales

- Ensayos Físicos.
- Tiempos de fraguado
- Resistencia a la compresión a los 7 días

4.2.4 Aditivos. Los aditivos para las mezclas de concreto que se realizaron, son compuestos químicos en este caso líquidos, que le dan cierta característica al concreto, sin que pierda las propiedades para el cual fue diseñado.

Dentro de las diferentes familias de los aditivos podemos encontrar:

- Reductores de agua
- Retardantes
- Acelerantes
- Inclusores de aire
- Plastificantes
- Inhibidores de corrosión
- Reductores de contracción

Los aditivos deben cumplir con lo especificado en las Normas NTC 1299 “Aditivos químicos para concreto”, NTC 3502 “Aditivos Incorporadores de aire para concreto” y NTC 4023 “Especificaciones para aditivos químicos usados en la producción de concreto fluido”.

De acuerdo a las dosificaciones de las mezclas estipuladas por el fabricante de concreto, se usaran aditivos Retardantes de fraguado y en caso de ser necesario, aditivo plastificante.

En general, para los diferentes materiales usados en las mezclas de concreto, se deben garantizar condiciones óptimas de almacenamiento y disposición, cumplimiento de los parámetros de control de calidad de acuerdo a la normatividad, adecuada dosificación de los materiales teniendo en cuenta el cumplimiento de los resultados esperados, tanto como para el cliente como para el productor, de esta manera se mitigaran variaciones y estará ajustados los resultados al buen comportamiento del producto y sus diferentes usos.

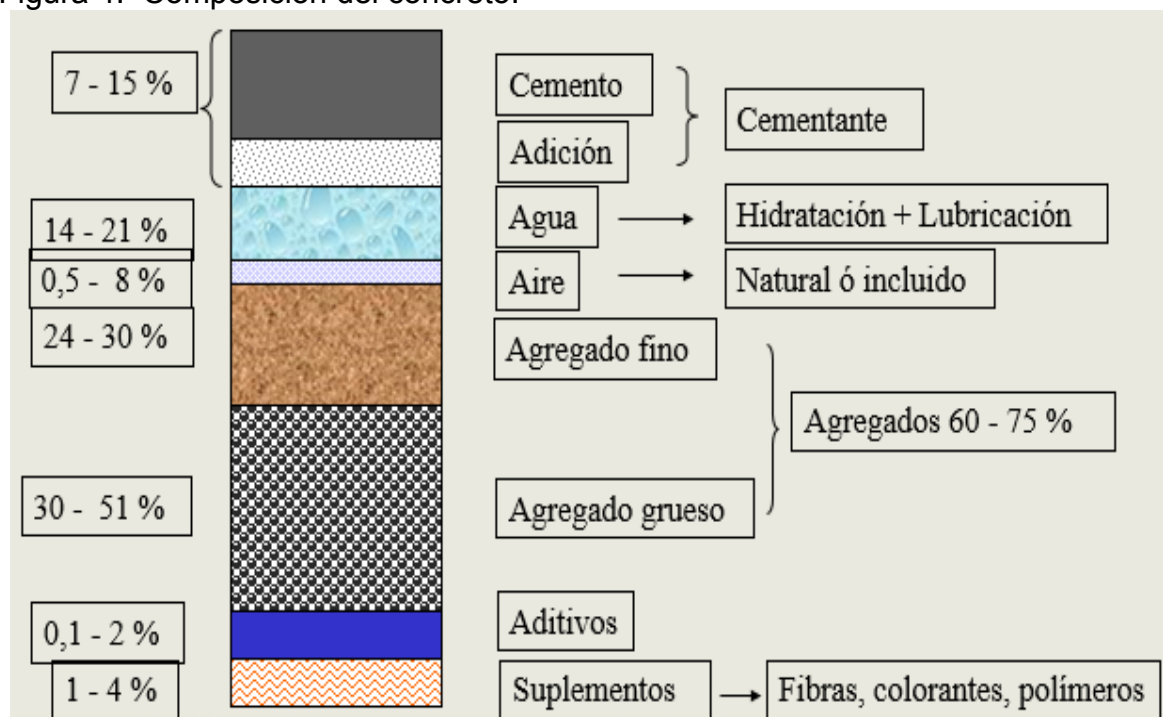
#### **4.3 PROPIEDADES DEL CONCRETO**

El concreto es uno de los materiales más usados en la industria de la construcción por su fácil manejo y los excelentes resultados obtenidos durante su vida útil. Una de las características más importante es la resistencia a la compresión, ya que es uno de los materiales de los cuales su desarrollo y desempeño es excelente ante estas solicitaciones, pero a su vez tiene poca capacidad de soportar esfuerzos a la

flexión. De allí nace el concreto reforzado, una unión entre el concreto y el acero de refuerzo, siendo este último el gran aportante en resistencia a la flexión. Por ello es importante mantener de manera óptima el complemento que generan estos dos materiales, lo que nos lleva a estudiar la permeabilidad del concreto ante la presencia del ión cloruro, buscando proteger el acero de refuerzo ante ataques exógenos.

De acuerdo a la selección de materiales para la mezcla de concreto, podríamos tomar como una idea inicial, la composición de un concreto de la siguiente manera:

Figura 4. Composición del concreto.



Fuente: RIVERA, Gerardo. Concreto simple [en línea]. Popayán [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/doc/189675237/Tecnologia-Del-Concreto>>.

Teniendo en cuenta que esta composición varía según la característica de la mezcla, obtenemos inicialmente un concreto en estado fresco o plástico que se podrá trabajar, manipular, colocar y moldear, del cual vale resaltar diferentes mediciones o controles que se pueden hacer, algunas en laboratorio y otras en obra:

- Asentamiento
- Apariencia
- Temperatura

- Homogeneidad
- Contenido de aire
- Masa unitaria
- Tiempo de fraguado
- Ensayos de madurez

Después de que se genere el fraguado del concreto (cambio de la mezcla del estado plástico al estado endurecido), obtenemos una roca artificial, homogénea, llamada concreto, del cual podemos validar los siguientes parámetros:

- Resistencia a la compresión
- Módulo de elasticidad estático
- Resistencia a la tracción indirecta
- Resistencia a la flexión
- Contracción o expansión del concreto
- Permeabilidad
- Acabado

Dentro de las propiedades del concreto, las más importantes y las que son foco de estudio y análisis son las siguientes:

- **Trabajabilidad.** Es la facilidad con la cual se puede hacer manipulación de la mezcla, buscando que se puedan llevar a cabo actividades de transporte, colocación, moldeo, afinado y terminado sin que tenga una pérdida considerable de manejabilidad.
- **Resistencia.** Es la capacidad que tiene el concreto de soportar cargas, en el mejor caso a la compresión, sin que sufra deformaciones considerables que puedan ejercer deterioro en el elemento.
- **Durabilidad.** Es la capacidad de resistencia que tiene el concreto ante el medio que lo rodea, agentes químicos o industriales a los cuales se va a ver sometido en contacto, desgastes, entre otros, mientras se encuentra dentro de su vida útil de servicio.

Ahora, se realizará una breve descripción de los diferentes parámetros y procedimientos que deben ser tenidos en cuenta para la evaluación de resultados de un concreto en cuanto a la resistencia a la compresión.

4.3.1 Resistencia a la compresión. Cuando se habla de la resistencia del concreto se hace referencia a la resistencia a compresión del concreto en estado endurecido. La etapa de endurecimiento inicia con el fraguado final del concreto y prosigue en el tiempo, dependiendo totalmente su desarrollo y desempeño de las condiciones de curado a las cuales someteremos las muestras de concreto y/o el elemento estructural. Normalmente la resistencia del concreto se evalúa a los 28 días, sin embargo esta evaluación se puede hacer a diferentes edades (antes de los 28 días) según la conveniencia de monitorear el desarrollo de resistencia en estas edades tempranas.<sup>24</sup>

Este parámetro es usado para validar el cumplimiento de la resistencia de la mezcla con respecto al  $f'_c$  estimado en el diseño de los diferentes elementos estructurales del proyecto.

Para el caso específico de este trabajo de investigación, se determinara la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas con sus respectivas adiciones, con el fin de conocer el comportamiento de la mezcla en este parámetro.

Para evaluar la resistencia del concreto, la metodología más usada es someter unos especímenes cilíndricos de un tamaño normalizado, a soportar una fuerza axial ejercida por un dispositivo que tenga la capacidad de mantener una carga constante, hasta que se produzca una falla del espécimen.<sup>25</sup>

4.3.1.1 Elaboración de muestras. La elaboración de especímenes de concreto, se rige bajo las Normas: “NTC 550 – Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra” y/o NTC 1377 “Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio” en las cuales se determinan lo siguiente:

- Equipos y/o Aparatos.

- Moldes. Usualmente se usan moldes cilíndricos que cumplan con las tolerancias estipuladas en la norma ASTM C 470. De acuerdo a la especificación colombiana, se pueden usar cilindros de 150mm de diámetro por 300mm de altura o de 100mm de diámetro por 200mm de altura. El material de estos moldes deben garantizar que sea no absorbente, no reactivo con la mezcla y completamente impermeables.

- Varilla compactadora. Debe ser en acero, cilíndrica, lisa y de punta semiesférica, la cual variará su tamaño de acuerdo los moldes con los cuales vamos a trabajar. Para cilindro de 150mm de diámetro, la varilla tendrá una

---

<sup>24</sup> ICONTEC. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Bogotá D.C: ICONTEC, 2010. p. 4. [NTC 673].

<sup>25</sup> *Ibíd.*, p. 4.

longitud de 600mm y un diámetro de 16mm. Para moldes de 100mm de diámetro, la varilla será de 300mm de longitud y un diámetro de 10mm

➤ Martillo. Debe ser un martillo de caucho o cuero con un peso aproximado de 0.6 kg

➤ Recipiente para la mezcla. Por lo general se hace uso de un recipiente metálico con las características de material como lo especificado para los moldes, con la capacidad de poder contener un volumen de mezcla representativa para los ensayos que se van a ejecutar.

➤ Herramienta menor. Para este caso se usaran una serie de accesorios necesarios para poder hacer manipulación de la mezcla. Dentro de ellos se encuentran palas, cucharas para muestreo, palustre.

La zona donde se realizaran los especímenes para ensayo deberá ser un área plana, rígida, libre de vibraciones y lo más cercano posible al sitio de almacenamiento.

• Procedimiento. Nota: Como el tamaño de especímenes que se van a realizar para ese trabajo de investigación es de 100mm x 200mm, se deberán realizar como mínimo 3 cilindros para que sean ensayados a los 28 días y por metodología de trazabilidad de la mezcla se realizaran 4 cilindros más para que sean ensayados a 3 días y 7 días respectivamente. Por norma se ensayaran como mínimo 2 cilindros a cada una de las edades estipuladas con el fin de poder obtener un promedio de resultado.<sup>26</sup>

➤ Se debe tomar una muestra representativa de la mezcla en el recipiente para la mezcla o carretilla, garantizando un tiempo prudente de mezclado con el fin de obtener una mezcla homogénea. Este procedimiento debe hacerse según lo estipulado en la Norma NTC 454 “Toma de muestras de concreto en estado fresco”

➤ Se deberá hacer ensayo y registro del asentamiento de la mezcla, temperatura y contenido de aire.

➤ Hacer un remezclado de la muestra de concreto que se tomó.

➤ Cada cilindro se realizara por capas, 2 capas por cilindro. Cada capa corresponderá a un vaciado de igual volumen de mezcla, 25 apisonamientos con la varilla especificada, en forma de espiral desde la parta externa del cilindro hacia la parte interna garantizando la penetración total de la capa de concreto y

---

<sup>26</sup> ICONTEC. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio. Bogotá D.C: ICONTEC, 1994. p. 5 [NTC 1377].

ligeramente la capa inmediatamente anterior. Posteriormente se golpeará de 10 a 15 veces con el martillo de caucho o cuero.

➤ Realizar enrase de la parte superior del cilindro, garantizando un acabado, homogéneo, uniforme y liso, mitigando irregularidades en la superficie.

Figura 5. Especímenes cilíndricos para ensayos.



Fuente: Autores.

4.3.1.2 Curado de especímenes. El curado es uno de los procesos más importantes en el concreto, mediante el cual se garantizará un adecuado proceso de desarrollo de resistencia, ya que se mantendrán hidratadas las partículas de cemento, generando un óptimo desempeño de la mezcla. Adicional, busca mitigar las contracciones por fraguado, mientras que el concreto adquiere la suficiente madurez y tenga la capacidad de soportar propiamente estas cargas de tensión. Las condiciones recomendables de humedad relativa y temperatura, son esenciales para evitar la pérdida deliberada de agua y su posterior evaporación. Se debe mitigar que los especímenes estén influenciados directamente por la radiación solar o algún elemento calefactor<sup>27 [11]</sup>

- Curado Inicial. El curado inicial es al que se someten los especímenes inmediatamente realizada la muestra, teniendo en cuenta que se debe dejar un tiempo prudente mientras que son desencofrados o desmoldados. Durante este tiempo se debe garantizar temperaturas que oscilen entre los 16°C y 27°C, adicional de una humedad relativa alta. El tiempo de desencofre de los

<sup>27</sup> ICONTEC. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio. Bogotá D.C: ICONTEC, 1994. p. 2. [NTC 1377].

especímenes de concreto se mide a partir del momento en el que se realiza la muestra, desde este instante se tendrán 24 horas  $\pm$  8 horas para desmoldar los cilindros y llevarlos a condiciones de curado final, mientras que se realiza el ensayo de resistencia a la compresión a las edades determinadas o de cumplimiento.

- Curado final. Para este curado, se debe disponer de un área e infraestructura adecuada que pueda mantener las condiciones de temperatura y humedad relativa referida en la norma. Para ello, existen tanques de almacenamiento o cuartos húmedos, entre otros. La temperatura que se debe mantener para el curado de los especímenes es de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa mínimo del 95%. Teniendo en cuenta estos parámetros, lo más aconsejable es tener tanques o piscinas de curado, ya que solo tendríamos que mantener la temperatura en los rangos estipulados por medio de termocuplas o sistema de regulación y recirculación de agua.

Figura 6. Cuarto de curado.



Fuente: Autores.

4.3.1.3 Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros. El ensayo de resistencia, se encuentra normalizado bajo el documento NTC 673 “Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto” el cual busca obtener como resultado, validar uno de los parámetros y propiedades más importante en el concreto.

Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un



espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por la sección transversal de área del espécimen.<sup>28</sup>

Los valores obtenidos, serán el reflejo de las diferentes características de la mezcla a la cual se le está realizando el ensayo, dentro de los cuales se pueden destacar los materiales, los componentes, la dosificación, el tamaño del espécimen, el curado, métodos de muestreo y mezclado. Estos valores serán usados como parámetro de comparación con un diseño de mezcla al cual se proyectó una resistencia específica, control y evaluación de una dosificación, control de calidad, entre otros.

- Equipos.

- Máquina de ensayo: La cual tenga la capacidad de brindar las cargas y velocidades (0.25 a 0.35 MPa/s) necesarias de acuerdo a lo estipulado en la norma. Este equipo debe estar calibrado por un organismo acreditado metrológicamente en fuerza. La máquina debe estar provista de dos bloques de apoyos en acero.

- Lector de carga: Dispositivo análogo o digital mediante el cual se pueda hacer lectura del valor de la carga aplicada al cilindro hasta el momento de la falla. Deberá proporcionar una escala adecuada y de fácil interpretación para el operador con unidades de medida acorde a las aplicaciones de carga de la máquina de ensayo.

- Platos de retención y neoprenos: Estos dispositivos realizaran el ajuste del cilindro de una manera perpendicular y homogénea a la dirección de carga de compresión. Se debe garantizar que el diámetro de los platos de retención y los neoprenos, correspondan al diámetro del espécimen a ensayar. Así mismo, los neoprenos deben tener una dureza entre 50 shore y 70 shore.

- Procedimiento.

- Se debe colocar el cilindro sobre el neopreno, el cual está ajustado al plato de retención, en dirección perpendicular al eje de carga de la máquina de ensayos. Se debe ajustar el procedimiento, de tal manera que el ensayo del espécimen se realice en el menor tiempo posible, después de haber sacado el cilindro de las condiciones de curado.

- Accionar la máquina para iniciar el ensayo, de tal manera que el espécimen este siendo sometido a una carga con velocidad constante, hasta que se produzca la falla del elemento.

---

<sup>28</sup> ICONTEC. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Bogotá D.C: ICONTEC, 2010. p. 5. [NTC 673]

- Registrar los valores obtenidos y las unidades de medidas estipuladas en la máquina de ensayo.
- Reportar estos resultados y de ser necesario validar el cumplimiento de la mezcla de acuerdo al f'c de diseño.

Figura 7. Prensa para ensayos de concreto en estado endurecido.



Fuente: Autores.

4.3.2 Caracterización del concreto de acuerdo a la relación a/mc. La relación a/mc es el resultado del cociente entre la cantidad de agua y la cantidad de cemento existente para la preparación de la mezcla.

$$R = \frac{a}{mc}$$

Donde:

R: Relación a/mc

a: Masa de agua de la mezcla recién preparada.

mc: Masa de cemento utilizada para la preparación de la mezcla.

La relación a/mc es directamente proporcional a la cantidad de agua y a la cantidad de cemento.

El valor de la relación a/mc debe ser un valor menor a uno según la NSR 10 en el título C capítulo C4.1 - Requisitos de durabilidad: La relación a/mc debe oscilar

entre 0.4 y 0.5 donde la relación de 0.4 es para estructuras en condiciones de exposiciones altas a cloruros, sales y aguas marinas.<sup>29</sup>

De esta relación dependen los valores de resistencia, durabilidad, coeficiente de retracción y coeficiente fluencia del concreto. Cuando una mezcla tiene un contenido muy alto de agua suele ser una mezcla muy fluida la cual presenta una plasticidad y una trabajabilidad que presenta grandes beneficios para la mano de obra, pero con el problema que disminuye resistencia debido a mayores volúmenes de espacios creados por el agua, lo que conlleva a que el concreto sea más permeable al tener mayor número de poros los cuales están interconectados entre sí, facilitando que los cloruros, las sales y demás agentes nocivos ataquen la estructura y con ello se disminuya la vida útil de la estructura. Cabe resaltar que el 100% de la resistencia de concretos comunes se obtiene a los 28 de maduración del concreto, claro que el valor de la resistencia no es proporcional al número de días ya que a los siete días de maduración se obtienen valores cercanos al 70% de valor de la resistencia final y a los 14 días de maduración los valores alrededor de 85% de la resistencia última.

En las muestras que se realizarán en laboratorio para determinar el ataque de los cloruros, se fabricarán cilindros con diferentes relaciones agua/cemento, las cuáles serán de: 0.25, 0.35, 0.50, 0.65, 0.75. Como se mencionó anteriormente la normatividad colombiana estipula que la relación a/mc debe estar entre 0.40 a 0.50, con el fin de poder hacer un análisis que permita establecer si estos valores son los más adecuados es que se realizaran pruebas con valores por fuera de los estipulados.

Para obtener concretos impermeables, que es lo que se debe buscar para evitar daños por el ataque de cloruros, debemos usar relaciones a/mc bajas y en el transcurso de maduración (28 días) se debe hidratar el concreto para evitar fisuraciones. Si el caso fuese de problemas de manejabilidad del concreto con relaciones agua / cemento bajas, se debe usar aditivos plastificantes o reductores de agua, los cuales nos ayudan a mejorar la manejabilidad manteniendo la misma relación a/mc.

4.3.3 Adiciones para mitigar el ataque de los cloruros. Como se ha expuesto anteriormente el debilitamiento causado por el ión cloruro en las estructuras de concreto reforzado se presenta cuando los cloruros llegan al acero de refuerzo, por eso en la actualidad los laboratorios y las empresas que trabajan en esta rama han buscado dar solución a este serio problema. Además de que la primera solución es una relación de a/mc baja ó sea altos contenidos de material cementante, se ha descubierto un importante número de productos que disminuyen la porosidad y por ende la permeabilidad de los concretos a si

---

<sup>29</sup> REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE - NSR 10. Op. Cit., p. 235.

disminuyendo total o parcialmente el ingreso de los cloruros. A continuación hacemos una descripción de algunos de estos productos:

4.3.3.1 Filler de piedra caliza. ( $\text{CaCO}_3$ ) es la adición inerte más utilizada en la fabricación de concreto y su función es considerada principalmente de carácter físico; sin embargo, algunos investigadores exponen que este sí interviene en los procesos químicos durante la hidratación, y aunque no reaccione químicamente como el material cementante, las partículas de caliza funcionan como catalizadores del proceso de hidratación. En cuanto al efecto de la adición del Filler en las propiedades de los concretos, diferentes autores exponen que mejora la trabajabilidad y genera una mezcla muy cohesiva, que permite la reducción del sangrado; además, de incrementar la deformabilidad y disminuir en algunos casos los requerimientos de agua y aditivos súper plastificantes de la mezcla en estado fresco. En cuanto a las propiedades mecánicas y de durabilidad se puede llegar a tener buenos resultados si se cuenta con una granulometría adecuada del Filler que logre aumentar la compacidad y de esta forma disminuir la porosidad, lo cual se refleja en la resistencia y durabilidad del concreto.<sup>30</sup>

4.3.3.2 Microsilica. Es un aditivo mineral compuesto a base de Humo de Sílice seca y compactada, formulado para producir concreto con características especial. Esta es una puzolana que reacciona químicamente en el concreto para formar más gel del silicato del calcio para mejorar la resistencia y la impermeabilidad del concreto. La microsilica es un material súper resistente que, cuando se le añade al concreto, físicamente llena los vacíos entre las partículas de cemento obteniéndose un concreto extremadamente denso e impermeable y de esta manera aumentar su capacidad de resistencia a la compresión, mayor resistencia en presencia de ataque químicos y la mayor durabilidad de las estructuras. Los productos a usar en la elaboración de muestras con microsilica serán Microsilice 1 (SikaFume) y Microsilice 2 (Eucon MSA – Toxement) ya que son las presentaciones que se consiguen comúnmente en el mercado.

4.3.3.3 Metacaolín. Es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas aproximadas a  $550^\circ\text{C}$ , produciéndose una transformación de su estructura cristalina. Modifica la estructura químicamente del material cementante logrando así resistencias mayores a edades tempranas y reduciendo la permeabilidad del concreto.

4.3.3.4 Puzolanas. Las puzolanas son materiales naturales o artificiales que contienen sílice y/o alúmina. No son material cementante en sí, pero cuando son molidos finamente y mezcladas con cal, la mezcla fraguará y endurecerá a temperaturas normales en presencia de agua, como el cemento. Las puzolanas

---

<sup>30</sup> ICONTEC. Producción de concreto. Bogotá D.C: ICONTEC, 2008. 13 p. [NTC 3318].

pueden reemplazar de 15 a 40% del cemento portland sin reducir significativamente la resistencia del concreto.

Los dos tipos de puzolana, llamadas puzolanas naturales y artificiales se diferencian en: Las puzolanas naturales esencialmente son cenizas volcánicas de actividades volcánicas geológicamente recientes. Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos.

Al igual que los productos la puzolana modifica las características de los concretos mejorando: su resistencia a la compresión, la estabilidad, la durabilidad, menor liberación de calor, mejora la adherencia entre las partículas, disminuye la permeabilidad y se obtiene mayor rendimiento. Para este trabajo de grado el cerámico blanco, se clasifica como una puzolana.

## 5. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de la investigación, se realizaron mezclas de concreto a diferentes relaciones a/mc (0.25, 0.35, 0.50, 0,65 y 0.75). De ellas, se realizaron 9 especímenes cilíndricos por cada una de las mezclas, con un tamaño de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, con el fin de hacerles curado y evaluar su resistencia a la compresión a los 3 días (2 especímenes), 7 días (2 especímenes) y 28 días (3 especímenes). Los otros 2 especímenes se dejan para realizar el ensayo de permeabilidad.

Inicialmente se realiza una muestra testigo (sin ningún tipo de adición), la cual servirá para poder realizar comparación con los resultados que se van a obtener con las diferentes adiciones dentro de las cuales se encuentran:

- Filler
- Metakaolín
- Microsilice
- Cerámico

### 5.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO - PERMEABILIDAD ION CLORURO\*

5.1.1 Objeto. Este método de ensayo propone determinar la habilidad del concreto para resistir la penetración del ión cloruro, determinada a partir de indicaciones eléctricas, por medio de la prueba de permeabilidad rápida a cloruros como lo establece la norma ASTM C 1202. Con este ensayo, se obtiene el valor de carga, en Coulomb, que penetra en un elemento de concreto, valor que se correlaciona con el grado de penetrabilidad del ión cloruro.

5.1.2 Alcance. Este documento aplica a especímenes cilíndricos de concreto endurecido de  $98.5 \text{ mm} \pm 3.5 \text{ mm}$  de diámetro y  $51 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  de espesor, cortados en el laboratorio, que no contenga materiales conductores como acero, fibras de carbono, etc. o materiales como el nitrito de calcio, a los que se les desee determinar la resistencia al ión cloruro. Va desde el acondicionamiento del elemento de ensayo hasta la realización de la prueba.

5.1.3 Equipos y materiales consumibles. Equipo de permeabilidad de cloruros. Consiste en dos celdas de acrílico con mallas metálicas, un dispositivo encargado de hacer pasar la corriente presentada por el transporte de iones cloruro a través de una resistencia, un multímetro que mide la caída de voltaje, una fuente de voltaje, cables N°14.

---

\* NOTA: El texto del procedimiento estipulado en este ítem, es sacado de los procedimientos de ensayos de la casa de aditivos SIKA, por lo tanto parte de lo contenido es una copia de su autoría.

- Olla de vacío y bomba de vacío.
- 1 empaque de neopreno de diámetro  $102 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  por cada celda.
- Solución de cloruro de sodio al 3.0% por masa en agua destilada. (NaCl).
- Solución de Hidróxido de sodio 0.3 N en agua destilada. (Na (OH)).
- Agua hervida y agua destilada.
- Máquina cortadora y disco diamantado Diamant Boart. (Solo utilizada por personal capacitado).
- Sellante epóxico tipo Sikadur 32 Primer, mezclador y brocha para aplicación.
- Recipientes metálicos para hervir agua.
- Juego de llaves.
- Lija N°200.
- Embudo delgado de vidrio.
- Balde.

Figura 8. Olla de vacío y bomba.



Fuente: Autores.

Figura 9. Equipo para ensayo de Permeabilidad Ión Cloruro.



Fuente: Autores.

Figura 10. Celdas de acrílico.



Fuente: Autores.

#### 5.1.4 Elementos de ensayo.

- En el cuarto de curado hasta tres días antes de la realización del ensayo. También pueden estar sumergidos, dependiendo de la solicitud de curado del cliente. Los cilindros de concreto fabricados en el laboratorio se almacenan.
- Al retirar los cilindros del cuarto de curado o del tanque de inmersión tres días antes de la prueba, córtelos con la cortadora, o solicite el favor a alguien capacitado para el uso de este equipo, en rodajas de  $51 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ . En caso que el concreto haya tenido algún tipo de recubrimiento como agentes curadores,



sellantes o cualquier otro tratamiento superficial, no utilice el concreto que se encuentre en la capa cercana en  $51 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$  al tratamiento.

- Durante al menos una hora, deje secar los elementos al ambiente del LEM y cuando estén secos superficialmente aplique un sellante (tipo Sikadur 32 Primer) en la pared lateral del elemento, de acuerdo con las especificaciones del fabricante del sellante. De ser necesario aplique dos capas de este sellante.
- Disponga los elementos sobre un mesón del laboratorio durante al menos 24 horas de manera que el sellante fragüe.
- Tres horas antes de cumplir 24 horas luego de la aplicación del sellante, ponga hervir agua y déjela enfriar a temperatura ambiente, hasta cuando el agua esté a temperatura ambiente ( $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
- Coloque los elementos de ensayo en la olla de vacío. Encienda la bomba y ajústela a una presión de 50 mmHg (2 pulgadas Hg). La válvula de la bomba de vacío debe estar abierta y la otra válvula cerrada.
- Luego de tres horas de tener los elementos en la olla de vacío adicione la cantidad de agua (hervida y reposada) calculada para llenar la olla con los elementos dentro (2.9 kg de agua si se encuentran dentro seis elementos). Para esta operación, sin apagar la bomba de vacío, abra la válvula donde se conecta la manguera de agua e introduzca el extremo libre en el balde donde colocó el agua que calculó para llenar la olla.
- Al terminar con este proceso, cierre la válvula del agua y durante una hora más deje la bomba de vacío funcionando.
- Al finalizar este tiempo apague la bomba y deje las probetas en esta olla con el agua durante  $18 \pm 2$  horas.
- Transcurrido este tiempo, retire los elementos del agua, séquelos superficialmente y colóquelos en el cuarto de curado donde se garantiza una humedad relativa superior al 95%.
- Mida el diámetro del espécimen 3 veces y registre los datos en el protocolo con precisión de 1 mm.

5.1.5 Condiciones ambientales. Curado: Temperatura  $22.5 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$  y Humedad relativa  $> 95\%$ .

Temperatura ambiente durante la prueba: ( $22.5 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

### 5.1.6 Descripción del ensayo.

- Antes de comenzar con el ensayo, revise que las celdas acrílicas y las mallas de acero estén limpias. De no estarlo lávelas únicamente con agua y séquelas con una toalla limpia. Si encuentra óxido utilice la lija N°200 para eliminar este tipo de impurezas.
- Elimine igualmente el óxido de los tornillos y tuercas del sistema.
- Coloque la malla en la celda y asegúrese que el tornillo de contacto eléctrico que tiene cada una de las celdas esté en contacto con esta. Para esto encienda el multímetro, gire la perilla hasta la marca con el símbolo  $\Omega$ , oprima el botón "FUNC" del multímetro y posteriormente el botón F2. Con los cables del multímetro haga contacto con uno de ellos en el tornillo y con el otro en la malla. Si estos elementos están en contacto, el equipo emite un sonido de aviso y en la pantalla del dispositivo una de las líneas que aparece se une los círculos. Al final de esta prueba apague el multímetro.
- Coloque dentro del anillo de acrílico los empaques de neopreno sobre las mallas que van en cada celda (una con tornillo negro y la otra con tornillo rojo) y sobre una de ellas coloque el elemento de concreto (húmedo), cuidando que no queden espacios visibles entre el caucho y la probeta.
- Coloque la otra celda con el neopreno sobre el elemento de concreto teniendo las mismas precauciones anteriores.
- Introduzca los tornillos con sus arandelas en cada uno de los orificios de la celda ya armada y apriete las tuercas del sistema con fuerza tal que garantice que no hayan espacios entre el concreto y el acrílico (máximo 1 mm de espacio) cuidando de no maltratar el acrílico.
- Con la ayuda del embudo de vidrio introduzca en la celda con el tornillo rojo la solución de hidróxido de sodio (NaOH) (terminal positivo) y en la celda del tornillo negro la solución de cloruro de sodio (NaCl) (terminal negativo), sin llenar completamente la celda.
- Verifique que no existan fugas de las soluciones, de existir apriete un poco más los tornillos y coloque más solución si es el caso.
- Haga las conexiones del sistema. Los cables rojo y negro conéctelos en la parte posterior de la tarjeta. Los otros extremos de estos mismos cables se colocan en la parte delantera de la fuente. Los cables del multímetro se conectan a la parte delantera de la tarjeta.

- Conecte cada cable negro de cada celda a la tarjeta. Los cables rojos se conectan cuando se da inicio al ensayo.
- Encienda el estabilizador, luego encienda el multímetro y gire la perilla hasta el símbolo “V”. Luego oprima el botón “DATA LOG”. Si tiene datos almacenados en el multímetro oprima el botón “F4” dos veces consecutivas.
- Encienda la fuente (botón POWER) y con el botón de voltaje busque que la fuente indique 60 Voltios.
- Encienda la tarjeta. Si la tarjeta enciende simultáneamente más de un bombillo verde apáguela y enciéndala nuevamente a los 20 segundos.
- Cuando el bombillo verde correspondiente a la primera conexión esté encendido, de inicio al ensayo oprimiendo el botón que indica en la pantalla del multímetro “STORE” y conecte el cable rojo correspondiente que va de la celda a la tarjeta. Realice esta operación sucesivamente para cada celda cuando se encienda su respectivo bombillo aunque sin oprimir nuevamente el botón “STORE”. En este momento, el multímetro comienza a detectar una caída de voltaje, la cual se puede Leer en la pantalla del multímetro. Si el valor es cero el montaje no se ha realizado de la manera correcta.
- Habiendo realizado ya la conexión de todas las celdas, registre la primera hora que marca el multímetro y deje el equipo sin tocar ningún botón durante seis horas. Durante todo este tiempo el equipo almacena automáticamente todos los registros de caídas de voltaje de cada celda.
- Al finalizar las seis horas del ensayo, espere a que el multímetro guarde el último registro. Apague la tarjeta y la fuente y proceda a desmontar el ensayo y a bajar los datos del multímetro al computador.
- Desmante el ensayo desconectando los cables y retirando los líquidos de las celdas en un balde. Limpie muy bien las celdas y las mallas metálicas con agua. Deseche los elementos de ensayo.

5.1.7 Cálculos. Para el cálculo de carga que pasa a través del concreto, se grafican los valores de corriente en amperios contra tiempo en segundos, para cada elemento, se determina la ecuación de la curva y se calcula el área bajo esta por medio del cálculo de la integral de esta ecuación. Todo este procedimiento lo lleva a cabo el software “CHLORIDETEST”.

Si el diámetro del elemento de ensayo es diferente a 95 mm, el valor de carga se corrige por medio de la siguiente expresión:

$$Q = Q_x \times \left[ \frac{95}{d} \right]^2$$

Donde Q es la carga que pasa a través de la probeta en Coulomb, Qx es la carga en Coulomb calculada u obtenida por el programa y d es el diámetro en mm del elemento.

Con el resultado de carga en Coulomb se puede determinar el grado de penetrabilidad del ión cloruro al concreto.

5.1.8 Tiempos de ejecución. El ensayo tiene una duración de seis horas y el acondicionamiento de la muestra tiene una duración de tres días, sin embargo la duración del ensayo depende de la edad a la que se desea medir esta propiedad si se elabora la probeta en el laboratorio.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las diferentes mezclas y relaciones a/mc:

### 6.1 MEZCLA TESTIGO

Mezcla realizada sin la adición de algunos de los materiales que se tiene planteados para la mitigación de la permeabilidad al Ión Cloruro y a diferentes relaciones a/mc.

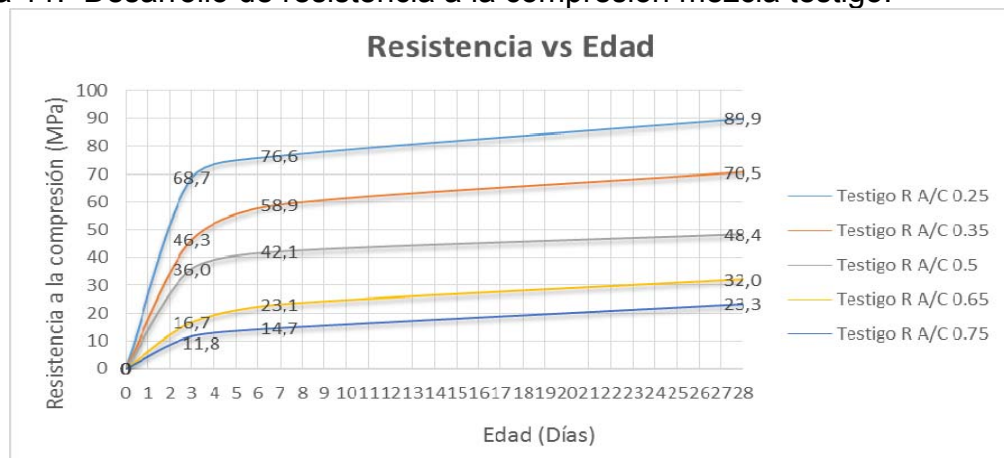
De acuerdo a las mezclas y a los ensayos realizados, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 3. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla testigo.

N° Muestra	Proyecto	Asentamiento (mm)	R a/mc	Resistencia MPa		
				3 días	7 días	28 días
134	TESTIGO	210	0,25	68,7	76,6	89,9
135	TESTIGO	165	0,35	46,3	58,9	70,5
136	TESTIGO	180	0,50	36,0	42,1	48,4
137	TESTIGO	190	0,65	16,7	23,1	32,0
138	TESTIGO	195	0,75	11,8	14,7	23,3

Fuente: Autores.

Figura 11. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla testigo.



Fuente: Autores.

Si realizamos una comparación con el comportamiento y la edad de falla de un concreto convencional, es decir a los 28 días, obtenemos resistencias entre a 21 MPa y 90 MPa, lo cual clasificaría estas mezclas como concretos estructurales y de Alto desempeño, obteniendo resistencias de optimo uso para cualquier

proyecto de ingeniería. De acuerdo a la especificación NSR-10 en cuando a las relaciones a/mc (entre 0.4 y 0.5) se obtiene una resistencia de 48.4 MPa, por lo cual es un concreto del cual se tendrá un buen comportamiento en resistencias a la compresión.

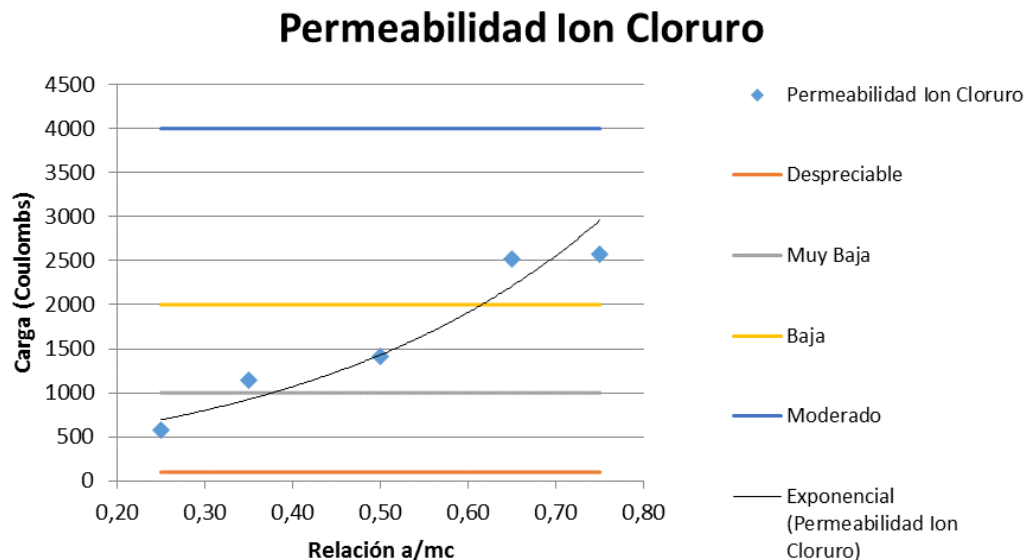
En cuanto a la permeabilidad al Ión Cloruro, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla testigo.

N° Muestra	Proyecto	R a/mc	Permeabilidad al Ion Cloruro ASTM C 1202	
			Carga Promedio (Coulomb)	Permeabilidad Ión Cloruro
134	TESTIGO	0,25	571	Muy baja
135	TESTIGO	0,35	1149	Baja
136	TESTIGO	0,50	1407	Baja
137	TESTIGO	0,65	2515	Moderado
138	TESTIGO	0,75	2579	Moderado

Fuente: Autores.

Figura 12. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla testigo.



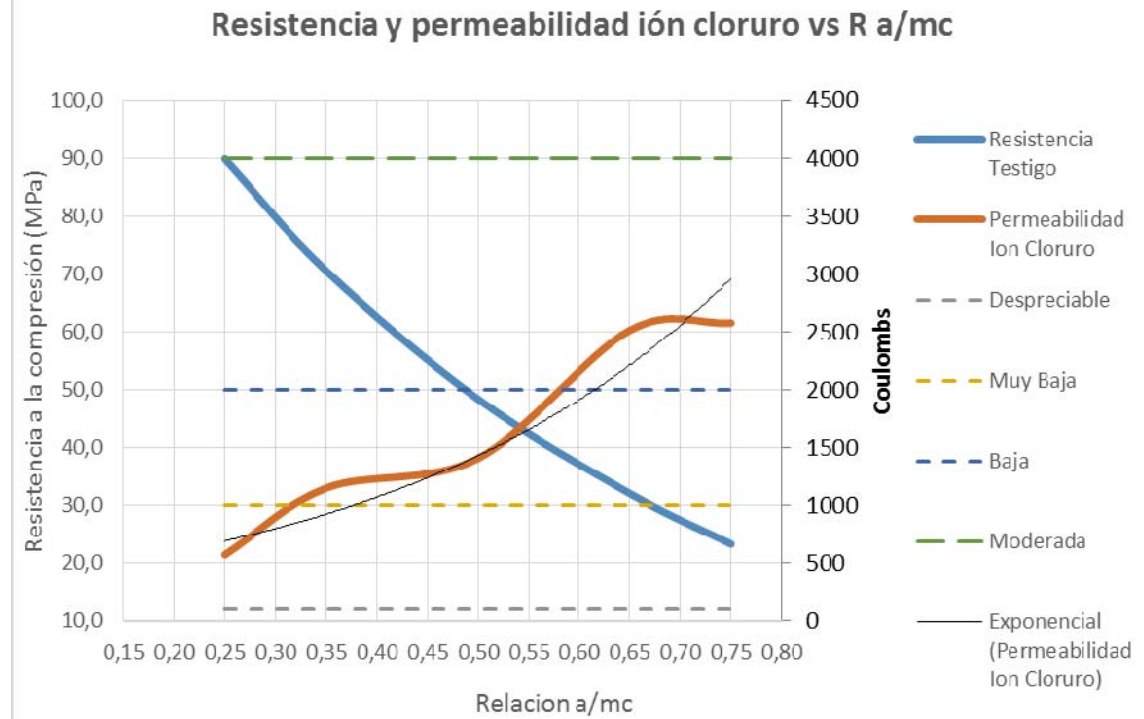
Fuente: Autores.

Las relaciones a/mc altas, no serían convenientes usarlas, ya que su comportamiento al ataque del ión cloruro es moderado, lo que nos lleva a un nivel de exposición que podría comprometer la durabilidad del concreto y de la estructura.

En la siguiente Figura se muestra el comparativo entre la resistencia a la compresión a los 28 días y la permeabilidad al ión cloruro, con el fin de que se pueda establecer en algún momento una mezcla óptima de acuerdo a los

requerimientos que se puedan llegar a tener en el desarrollo de un proyecto de ingeniería.

Figura 13. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla testigo.



Fuente: Autores.

Luego de la obtención de datos de la mezcla testigo, realizaremos una comparación con los resultados obtenidos con cada una de las adiciones.

## 6.2 MEZCLA CON ADICIÓN DE FILLER

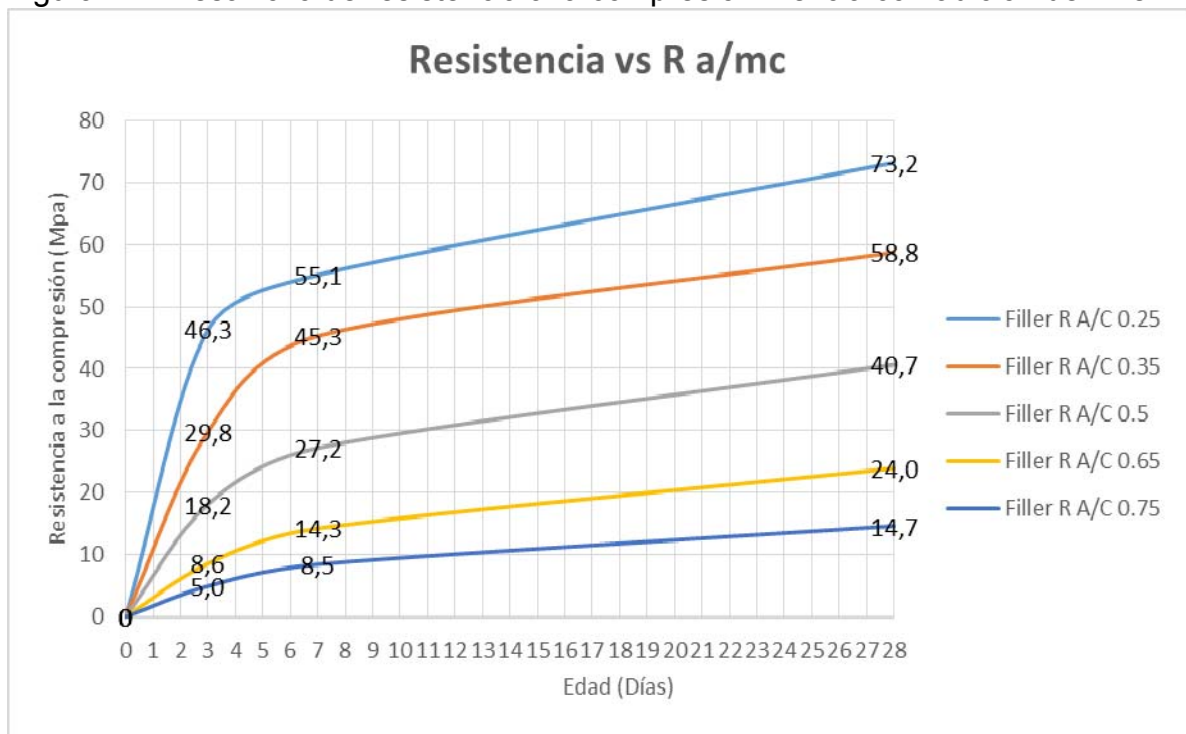
El material Filler es usado en la mezcla en una proporción del 30% del material cementante de acuerdo a las recomendaciones de dosificación del proveedor del material, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Filler.

N° Muestra	Proyecto	Asentamiento (mm)	R a/mc	Resistencia MPa		
				3 días	7 días	28 días
139	FILLER 30%	265	0,25	46,3	55,1	73,2
140	FILLER 30%	195	0,35	29,8	45,3	58,8
141	FILLER 30%	185	0,50	18,2	27,2	40,7
142	FILLER 30%	175	0,65	8,6	14,3	24,0
143	FILLER 30%	175	0,75	5,0	8,5	14,7

Fuente: Autores.

Figura 14. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Filler.



Fuente: Autores.

Con respecto a la mezcla testigo se presenta una disminución de resistencias a las diferentes relaciones a/mc

Tabla 6. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Filler.

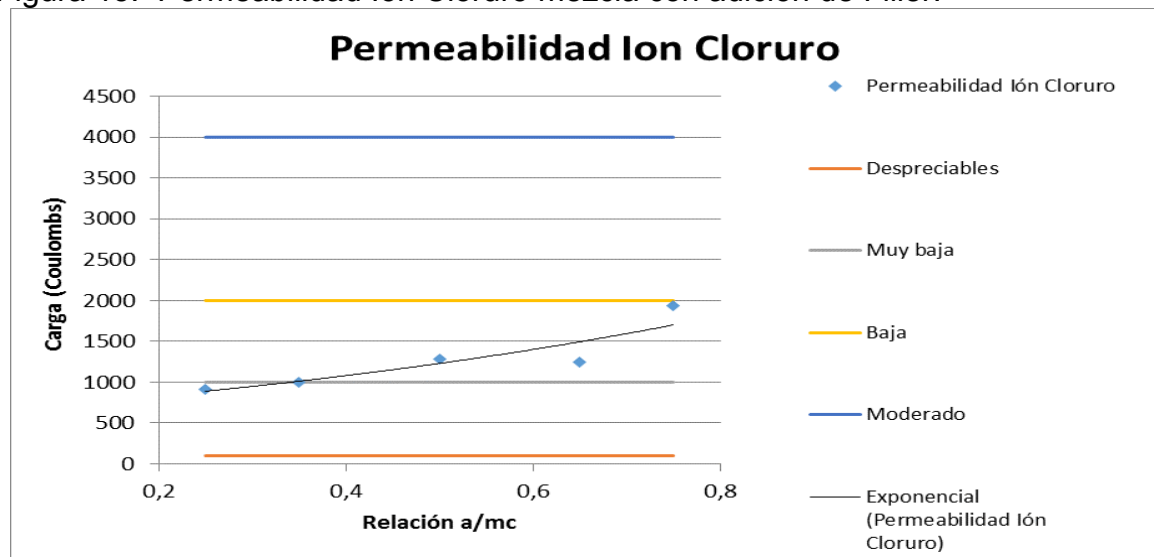
N° Muestra	Proyecto	R a/mc	Permeabilidad al Ion Cloruro ASTM C 1202	
			Carga Promedio (Coulomb)	Permeabilidad Ión Cloruro
139	FILLER 30%	0,25	914,5	Muy baja
140	FILLER	0,35	993	Muy baja



N° Muestra	Proyecto	R a/mc	Permeabilidad al Ion Cloruro ASTM C 1202	
			Carga Promedio (Coulomb)	Permeabilidad Ión Cloruro
	30%			
141	FILLER 30%	0,50	1287	Baja
142	FILLER 30%	0,65	1240,5	Baja
143	FILLER 30%	0,75	1935	Baja

Fuente: Autores.

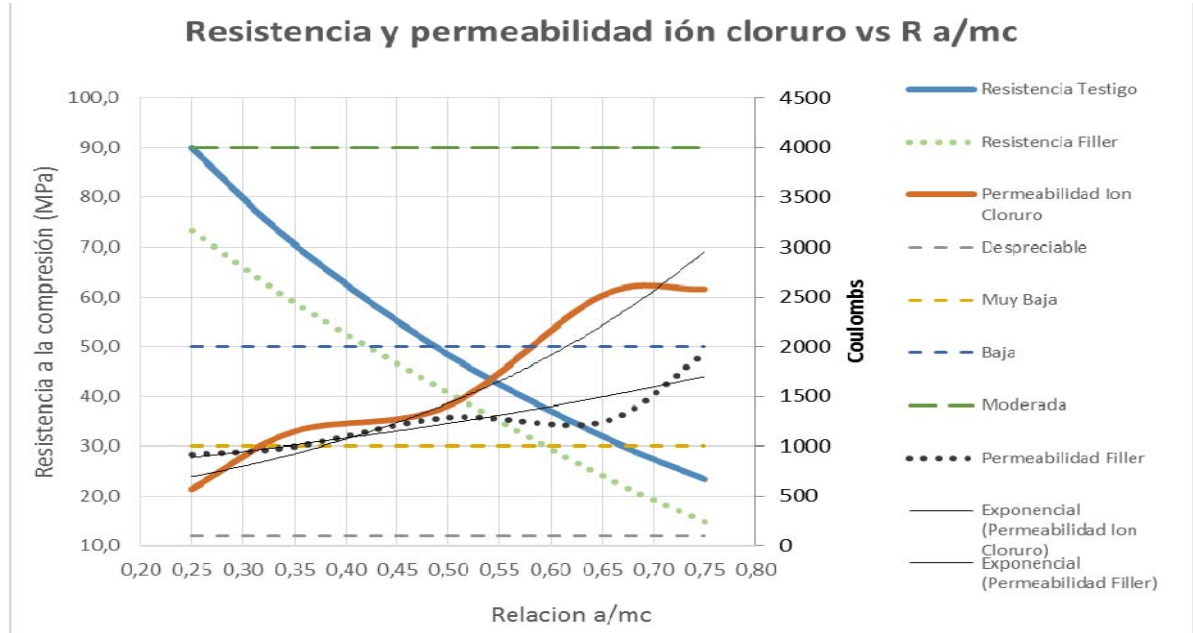
Figura 15. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Filler.



Fuente: Autores.

Con las diferentes relaciones a/mc se obtienen resultados positivos en cuanto a la disminución de la permeabilidad al ión cloruro, categorizándolas entre bajas y muy bajas, lo cual genera que se pueda tener en cuenta como un material mitigador de la permeabilidad al ión cloruro.

Figura 16. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla con adición de Filler



Fuente: Autores.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el Filler funciona como material llenante mas no como material cementante, ya que de acuerdo a la mezcla testigo, genera una disminución de la resistencia aproximadamente de 10 MPa. En cuanto a la permeabilidad al Ión Cloruro hay una disminución en relaciones a/mc superiores al 0.40, generando una optimización del concreto en relaciones a/mc altas obteniendo permeabilidades Moderadas a Bajas. En relaciones a/mc menores al 0.40, se comporta de una manera similar a la muestra testigo, sin generar un aporte considerable dentro del comportamiento de la mezcla de concreto.

### 6.3 MEZCLA CON ADICIÓN DE METACAOLIN

El siguiente material que se usó para la mitigación del fenómeno de permeabilidad al ion cloruro, es el Metacaolín, el cual es usado en una proporción del 10% del material cementante y con el cual se obtienen los siguientes resultados:

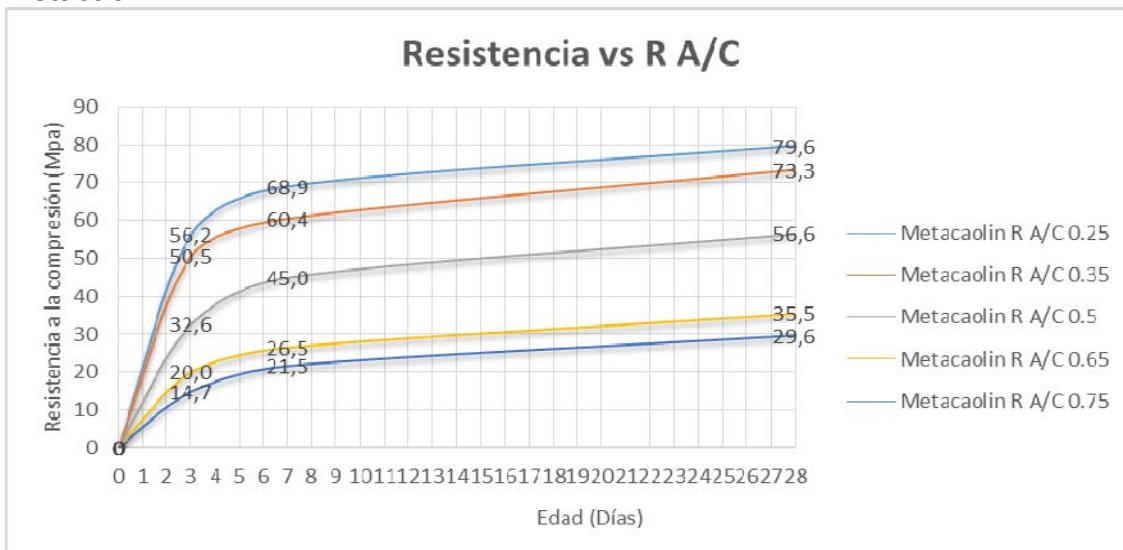
Tabla 7. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Metacaolín.

N° Muestra	Proyecto	Asentamiento (mm)	R a/mc	Resistencia MPa		
				3 días	7 días	28 días
144	METACAOLIN 10%	280	0,25	56,2	68,9	79,6
145	METACAOLIN 10%	180	0,35	50,5	60,4	73,3
146	METACAOLIN 10%	170	0,50	32,6	45,0	56,6

N° Muestra	Proyecto	Asentamiento (mm)	R a/mc	Resistencia MPa		
				3 días	7 días	28 días
147	METACAOLIN 10%	190	0,65	20,0	26,5	35,5
148	METACAOLIN 10%	185	0,75	14,7	21,5	29,6

Fuente: Autores.

Figura 17. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Metacaolín.



Fuente: Autores.

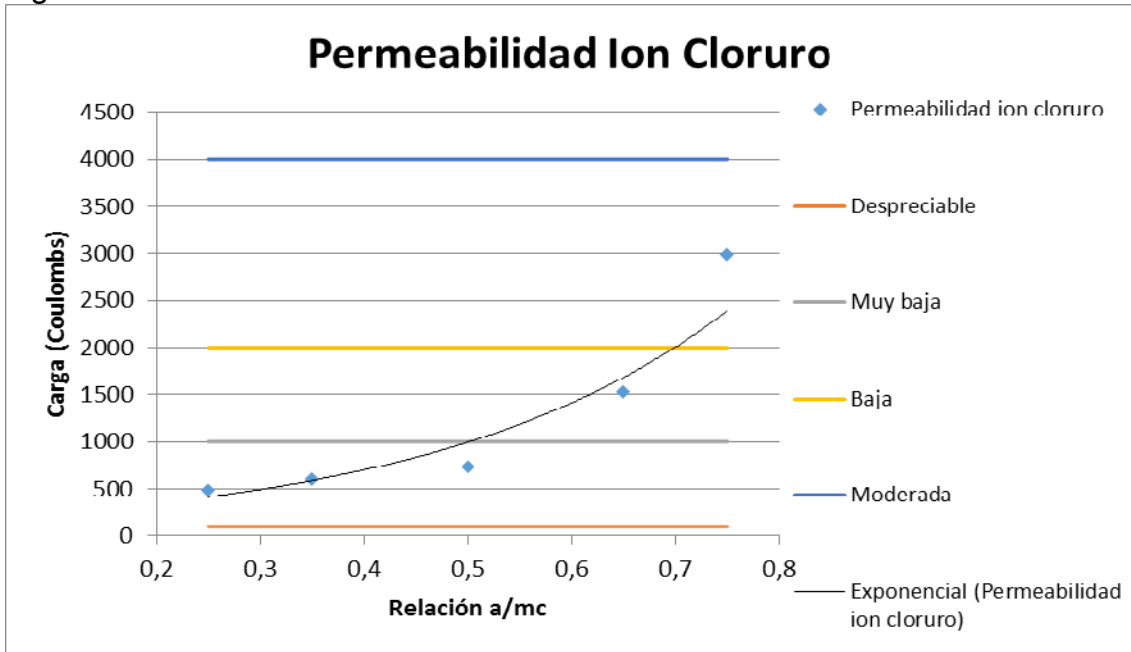
En relación al comportamiento de las resistencias a la compresión, presenta un buen desarrollo en relaciones a/mc bajas, comportándose como material cementante, pero en relaciones a/mc altas no genera aumentos de resistencia, por el contrario, las disminuye un poco.

Tabla 8. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Metacaolín.

N° Muestra	Proyecto	R a/mc	Permeabilidad al Ion Cloruro ASTM C 1202	
			Carga Promedio (Coulomb)	Permeabilidad Ión Cloruro
144	METACAOLIN 10%	0,23	483	Muy baja
145	METACAOLIN 10%	0,32	597,5	Muy baja
146	METACAOLIN 10%	0,45	735,5	Muy baja
147	METACAOLIN 10%	0,59	1533	Baja
148	METACAOLIN 10%	0,68	2984	Moderado

Fuente: Autores.

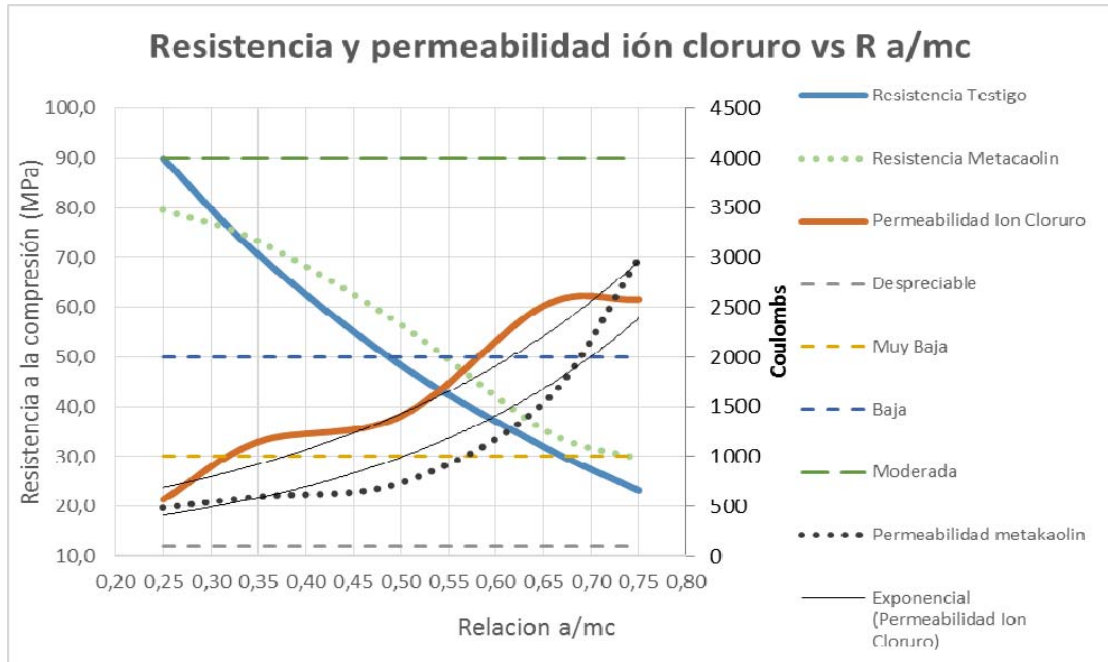
Figura 18. Permeabilidad Ion Cloruro mezcla con adición de Metacaolín.



Fuente: Autores.

En las diferentes relaciones a/mc presenta un comportamiento bueno, disminuyendo la permeabilidad del concreto.

Figura 19. Resistencia y permeabilidad ion cloruro vs R a/mc – Mezcla con adición de Metacaolín.



Fuente: Autores.

El comportamiento de la resistencia con este material es muy similar al de la muestra testigo, por lo tanto no es gran aportante como material cementante, pero actúa como material llenante, ya que se genera una disminución en la permeabilidad al ión cloruro aunque no de una manera representativa pues su comportamiento es similar a la mezcla testigo.

A continuación se relacionan resultados de los ensayos a mezclas en las cuales se incluyeron material microsílíce (2 materiales de diferente fuente o proveedor) y en los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

#### 6.4 MEZCLA CON ADICIÓN DE MICROSILICE 1

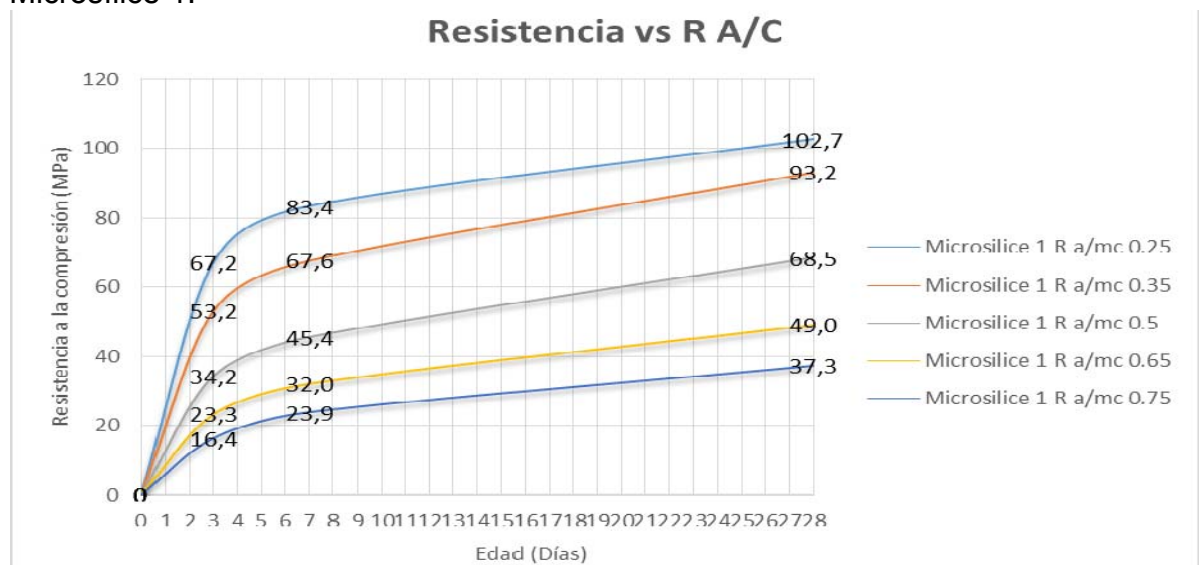
El material Microsílíce 1 es usado en una proporción del 5% de acuerdo a las recomendaciones técnicas del proveedor, aunque cabe aclarar que se puede usar en otras proporciones, pero se decidió trabajarla en su dosificación promedio.

Tabla 9. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Microsílíce 1.

N° Muestra	Proyecto	Asentamiento (mm)	R A/C	Resistencia MPa		
				3 días	7 días	28 días
165	MICROSILICE 5%	175	0,25	67,2	83,4	102,7
166	MICROSILICE 5%	175	0,35	53,2	67,6	93,2
167	MICROSILICE 5%	170	0,50	34,2	45,4	68,5
168	MICROSILICE 5%	165	0,65	23,3	32,0	49,0
169	MICROSILICE 5%	170	0,75	16,4	23,9	37,3

Fuente: Autores.

Figura 20. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Microsílíce 1.



Fuente: Autores.

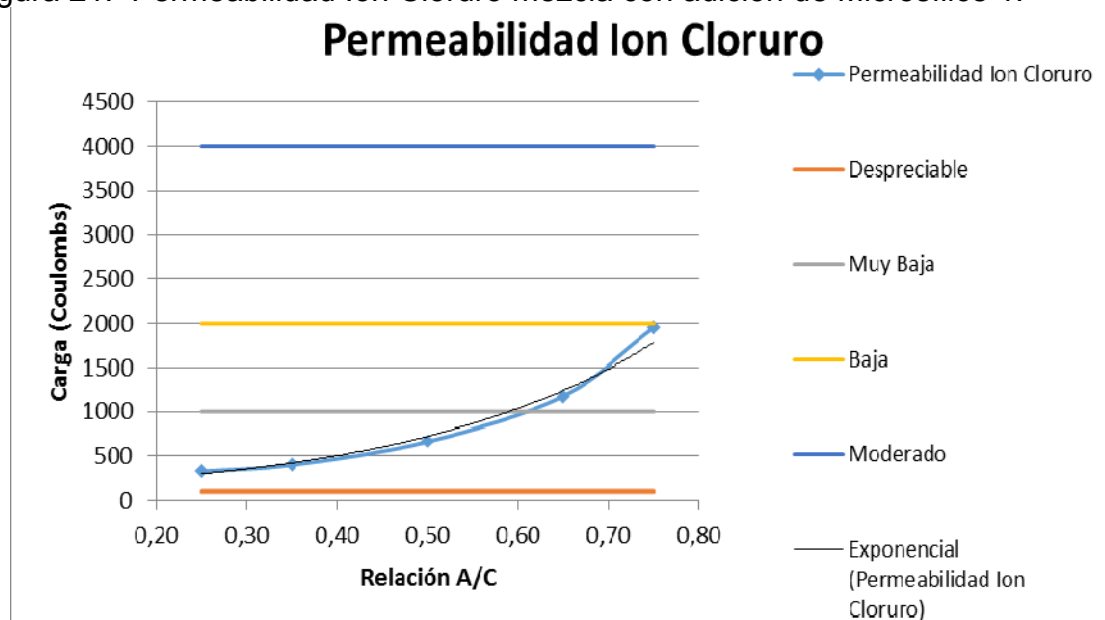
Con este tipo de material se obtiene un aumento representativo de las resistencia con respecto a la mezcla testigo, obteniendo una resistencia promedio de 68.5 MPa a una relación a/mc de 0.5. En la permeabilidad al ión cloruro, los resultados también fueron óptimos en comparación de la mezcla testigo.

Tabla 10. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Microsílice 1.

N° Muestra	Proyecto	R A/C	Permeabilidad al Ion Cloruro ASTM C 1202	
			Carga Promedio (Coulomb)	Permeabilidad Ión Cloruro
165	MICROSILICE 5%	0,25	324,5	Muy baja
166	MICROSILICE 5%	0,35	399	Muy baja
167	MICROSILICE 5%	0,50	664,5	Muy baja
168	MICROSILICE 5%	0,65	1177	Baja
169	MICROSILICE 5%	0,75	1960,5	Baja

Fuente: Autores.

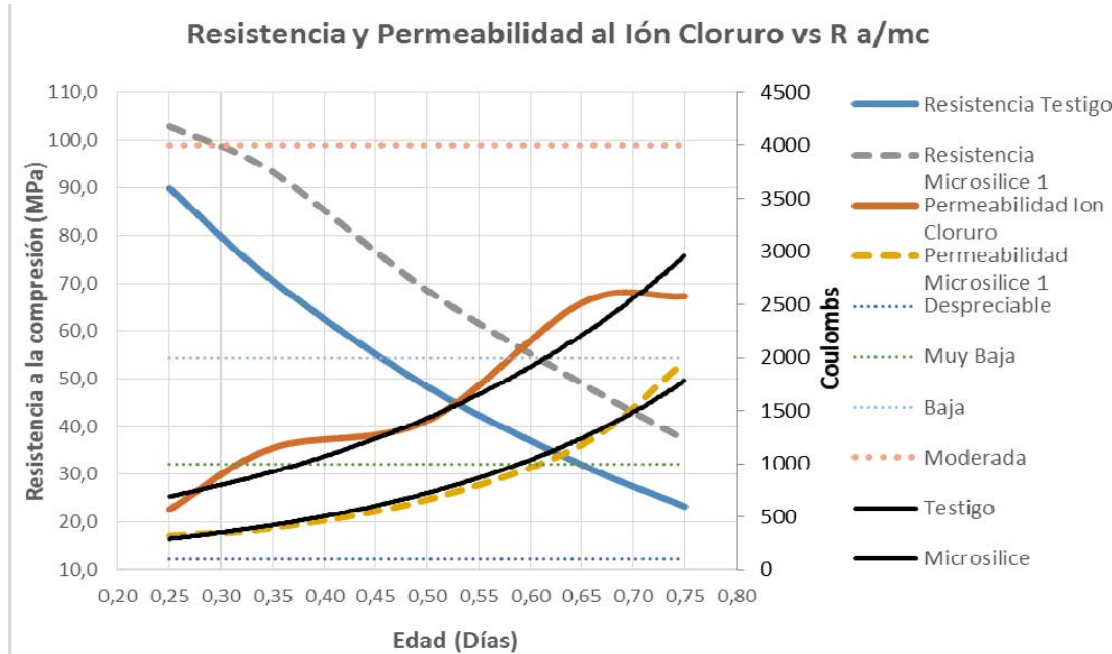
Figura 21. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Microsílice 1.



Fuente: Autores.

La permeabilidad al ión cloruro se mantiene en caracterización muy baja y baja a las diferentes relaciones a/mc según la norma ASTM 1202.

Figura 22. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla con adición de Microsílice 1.



Fuente: Autores.

La resistencia a la compresión presenta un aumento entre 10 y 20 MPa, comportándose esta Microsílice como un material cementante. Adicional, la permeabilidad al ión cloruro disminuye notoriamente a las diferentes relaciones a/mc, contemplándose a su vez este material como llenante, ya que por sus características disminuye la capilaridad y comunicación entre los poros que puedan presentarse en el concreto.

## 6.5 MEZCLA CON ADICIÓN DE MICROSILICE 2

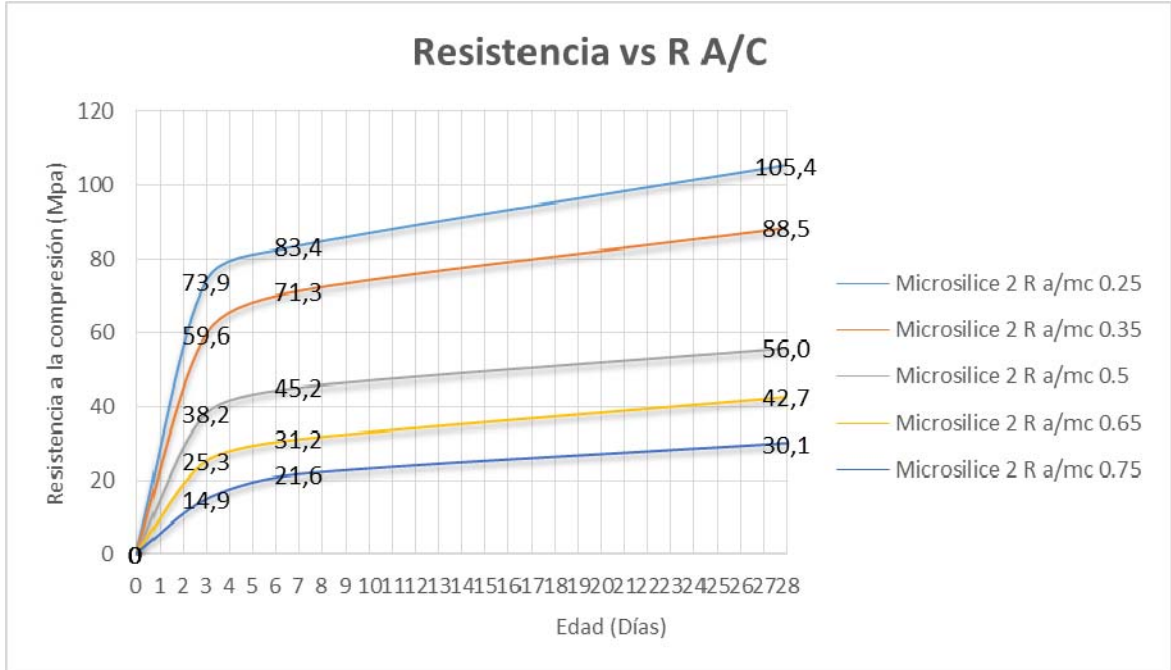
Al igual que el material anterior, esta Microsílice (diferente fuente y/o proveedor al material anterior), se dosifica en una proporción del 5%, arrojando el siguiente comportamiento:

Tabla 11. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Microsílice 2.

N° Muestra	Proyecto	Asentamiento (mm)	R A/C	Resistencia MPa		
				3 días	7 días	28 días
190	MICROSILICE 5%	220	0,25	73,9	83,4	105,4
191	MICROSILICE 5%	200	0,35	59,6	71,3	88,5
192	MICROSILICE 5%	160	0,50	38,2	45,2	56,0
193	MICROSILICE 5%	160	0,65	25,3	31,2	42,7
194	MICROSILICE 5%	165	0,75	14,9	21,6	30,1

Fuente: Autores.

Figura 23. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Microsílice 2.



Fuente: Autores.

Este material realiza un aporte promedio de resistencia entre 5 y 15 MPa, de acuerdo a lo obtenido con la mezcla testigo, comportándose como material cementante.

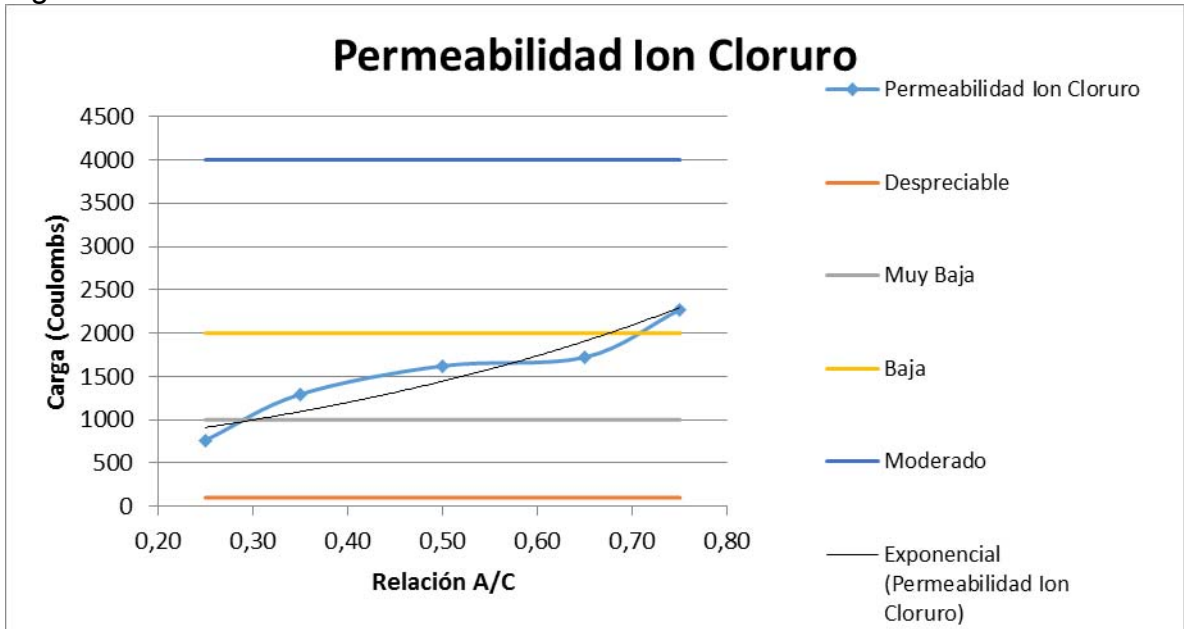
Tabla 12. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Microsílice 2.

N° Muestra	Proyecto	R A/C	Permeabilidad al Ion Cloruro ASTM C 1202	
			Carga Promedio (Coulomb)	Permeabilidad Ión Cloruro
190	MICROSILICE 5%	0,25	764	Muy baja
191	MICROSILICE 5%	0,35	1294	Baja
192	MICROSILICE 5%	0,50	1622	Baja
193	MICROSILICE 5%	0,65	1722	Baja
194	MICROSILICE 5%	0,75	2272,5	Moderado

Fuente: Autores.



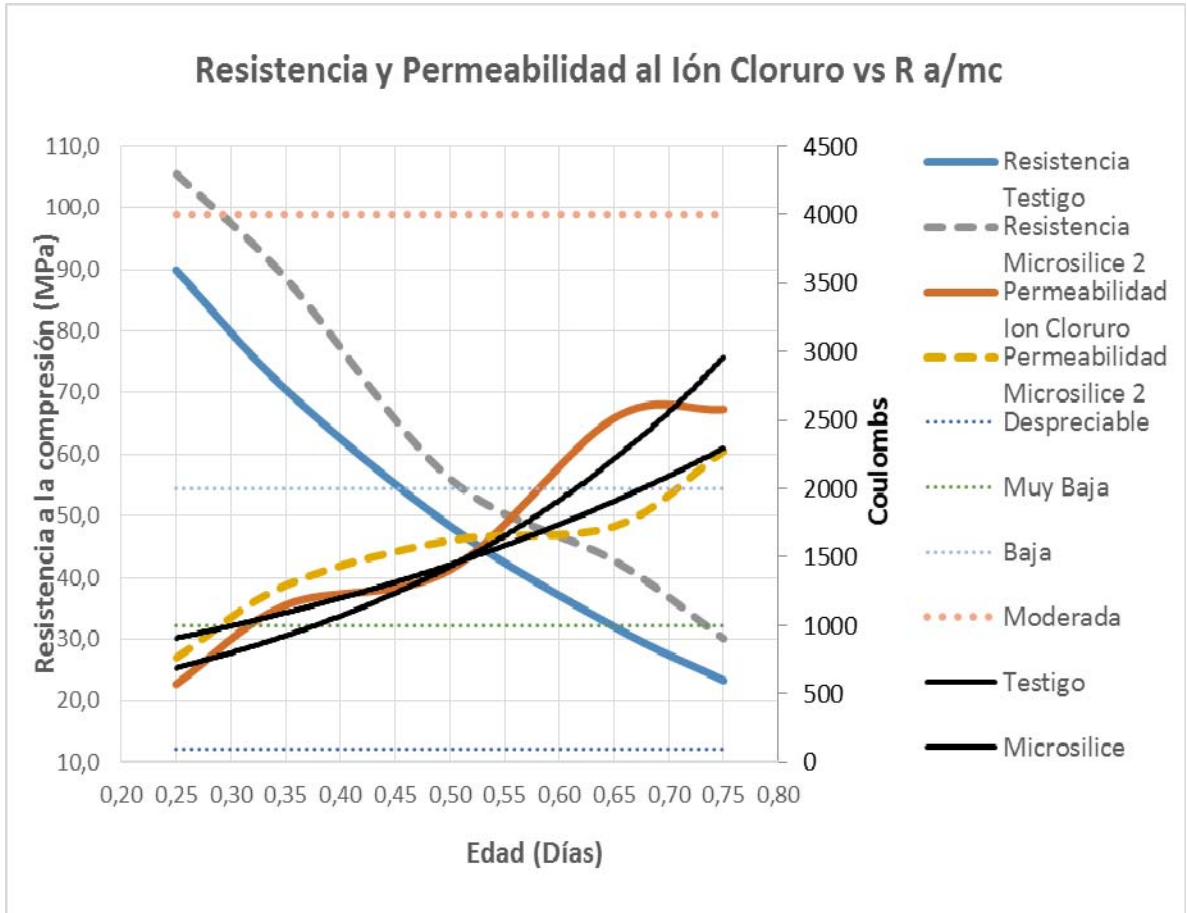
Figura 24. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Microsílice 2.



Fuente: Autores.

En las diferentes relaciones a/mc, la permeabilidad de la mezcla es Baja, sin embargo no genera una disminución representativa de este parámetro.

Figura 25. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla con adición de Microsílice 2.



Fuente: Autores.

El material Microsílice 2 presenta un comportamiento de material cementante, ya que genera un aumento en la resistencia a la compresión, pero su aporte en la mitigación de la permeabilidad al ion cloruro, con respecto a la mezcla testigo, no es representativa, ya que en relaciones a/mc menores a 0.50 no genera mejora en su comportamiento, como si lo hace en relaciones a/mc mayores a 0.5, pero no de una manera relevante. Por lo tanto se puede considerar que para efectos de permeabilidad no presenta una optimización de la mezcla.

## 6.6 MEZCLA CON ADICIÓN DE CERÁMICO BLANCO

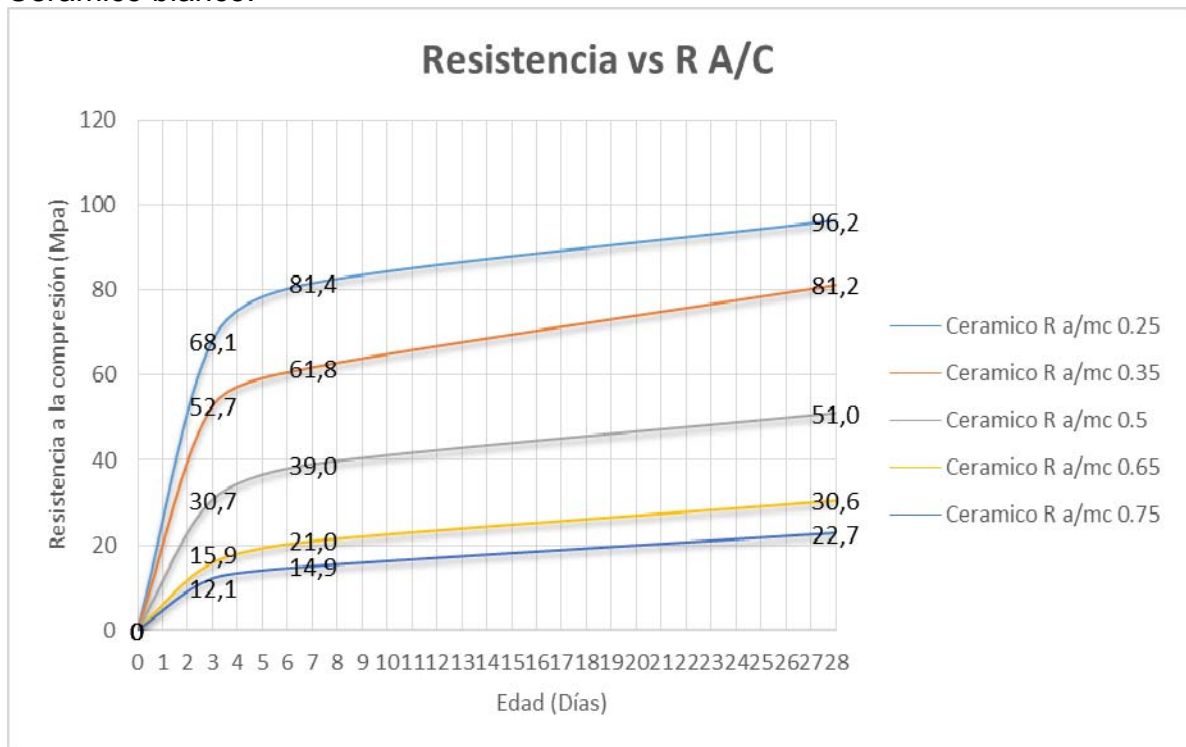
El material cerámico blanco es usado en una proporción del 5% con respecto al material cementante y con la cual se obtuvo la siguiente caracterización de la mezcla:

Tabla 13. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Cerámico blanco.

N° Muestra	Proyecto	Asentamiento (mm)	R A/C	Resistencia (MPa)		
				3 días	7 días	28 días
195	C. BLANCO 5%	240	0,25	68,1	81,4	96,2
196	C. BLANCO 5%	200	0,35	52,7	61,8	81,2
197	C. BLANCO 5%	165	0,50	30,7	39,0	51,0
198	C. BLANCO 5%	170	0,65	15,9	21,0	30,6
199	C. BLANCO 5%	180	0,75	12,1	14,9	22,7

Fuente: Autores.

Figura 26. Desarrollo de resistencia a la compresión mezcla con adición de Cerámico blanco.



Fuente: Autores.

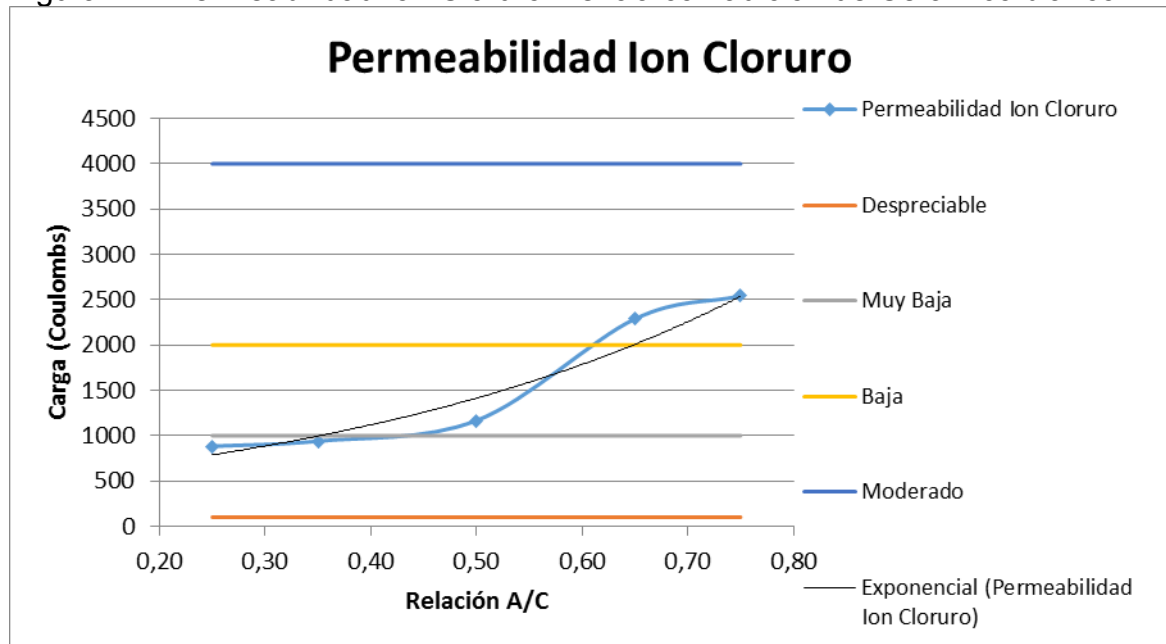
Las resistencias obtenidas con este material son similares a las obtenidas con la mezcla testigo, siendo poco relevante en los aportes de resistencia a la compresión.

Tabla 14. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Cerámico blanco.

N° Muestra	Proyecto	R A/C	Permeabilidad al Ion Cloruro ASTM C 1202	
			Carga Promedio (Coulomb)	Permeabilidad Ión Cloruro
195	C. BLANCO 5%	0,25	883	Muy baja
196	C. BLANCO 5%	0,35	940	Muy baja
197	C. BLANCO 5%	0,50	1167	Baja
198	C. BLANCO 5%	0,65	2289	Moderado
199	C. BLANCO 5%	0,75	2542	Moderado

Fuente: Autores.

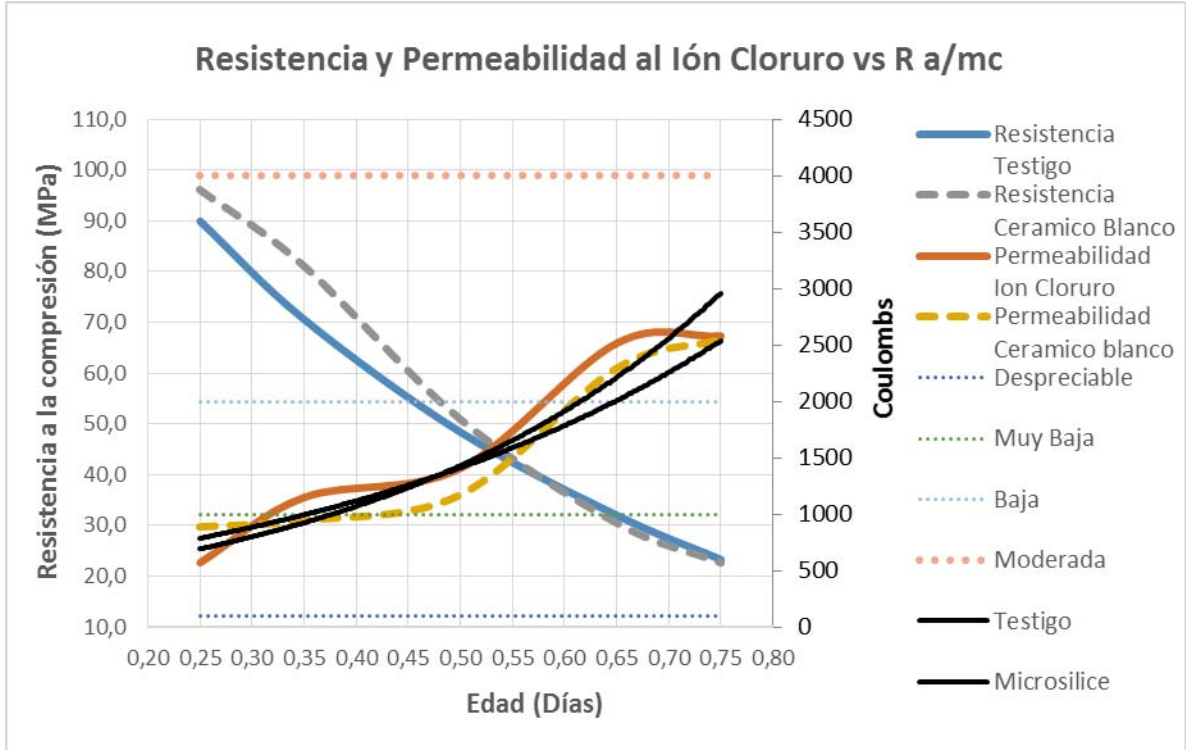
Figura 27. Permeabilidad Ión Cloruro mezcla con adición de Cerámico blanco.



Fuente: Autores.

Al igual que en la resistencia a la compresión, el comportamiento de este material en cuanto a la permeabilidad ión cloruro no genera un aporte representativo en la mitigación de este fenómeno.

Figura 28. Resistencia y permeabilidad ión cloruro vs R a/mc – Mezcla con adición de Cerámico blanco.



Fuente: Autores.

La inclusión del material cerámico blanco no genera un aporte representativo de la mezcla en cuanto a la resistencia a la compresión ni en la permeabilidad al ión cloruro, por lo tanto su comportamiento como material cementante o material llenante no sería relevante.

## 7. CONCLUSIONES

Es primordial validar los comportamientos y la influencia de los materiales con los cuales se diseñan las mezclas de concreto, específicamente con los materiales y/o adiciones que se quiere mitigar el fenómeno de la permeabilidad al ión cloruro, ya que se pueden generar diferentes reacciones lo que conlleva a clasificarlos y caracterizarlos de acuerdo a los resultados obtenidos en su proceso de investigación y aplicación.

De los materiales aplicados a este trabajo de investigación, se pudieron observar dos tipos de reacciones: Unos como materiales cementantes y otros como materiales llenantes, lo cual puede determinar la inclusión o no de estos materiales dentro de una mezcla de concreto.

Los materiales cementantes aportan como tal en el aumento de la resistencia a la compresión, siendo este parámetro el de mayor seguimiento en control de calidad de mezclas de concreto para las obras de infraestructura.

Los materiales llenantes disminuyen la capilaridad del concreto y la comunicación entre poros o aire incluido de la mezcla, lo cual favorece al concreto en la disminución de la permeabilidad del ión cloruro ante los agentes exógenos a los cuales se pueden ver sometidos los elementos estructurales realizados con concreto.

La adición que presentó un mejor aporte en las mezclas de concreto fue la Microsílice 1, con la cual se obtuvo un aumento de resistencia entre 10 MPa y 20 MPa con respecto a la mezcla testigo. A su vez, disminuye de manera considerable la permeabilidad del concreto al ión cloruro, clasificándola a las diferentes relaciones a/mc entre muy baja y baja, siendo este muy buen resultado para proyectos en los cuales se necesite ejercer este tipo de control y mitigación de este fenómeno.

Usar el material Filler no es conveniente tenerlo en cuenta en las proporciones dadas en este trabajo de investigación, ya que presenta una disminución en la resistencia a la compresión, aunque presente una leve disminución en la permeabilidad de la mezcla.

Hay materiales que presentaron comportamientos como llenantes sin afectar la resistencia a la compresión, generando un desempeño favorable en la permeabilidad al ion cloruro.

Aunque no es uno de los objetivos planteados en este trabajo de investigación, pero puede ser uno de los planteamientos posteriores de estudio en mezclas de concreto, se podría poner a discusión el impacto económico de los materiales llenantes como sustituyentes del cemento, ya que presentando un comportamiento

similar en el desarrollo de resistencia a la compresión y una disminución en la permeabilidad al ión cloruro, podría ser una variable importante en la aplicación del proceso de producción de concreto, buscando una disminución de costos de materia prima.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

ANTALLA, Luis. Metacaolín: definición y ensayos [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://teoriadeconstruccion.net/blog/metacaolin-definicion-y-ensayos/>>.

CABRERA, Rouseel. Geología aplicada a la ingeniería civil [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://rouseelcabrera.blogspot.com/p/semana-16.html>>.

CONSTRUESTRUCONCRETO. Servicios [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://construestruconcreto.webpin.com/>>.

ECHEVERRIA, Nelson, GALVIS, Hugo y NARANJO, Julián. Ataque por cloruros del hormigón y del hormigón armado [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://es.slideshare.net/nelsonecheverria2/ataque-por-cloruros-del-hormign-y-del-hormign-armado>>.

GONZÁLES DE LA COTERA, Manuel. IV Coloquio de química del cemento comportamiento del cemento en la corrosión del acero por cloruros en el concreto armado [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: [http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f\\_doc/concreto/ataque\\_quimico/MGC42\\_concreto\\_armado.pdf](http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/concreto/ataque_quimico/MGC42_concreto_armado.pdf)>.

ICONTEC. Aditivos químicos para concretos. Bogotá D.C: ICONTEC, 2008. 10 p. [NTC 1299].

----- . Cemento portland. Especificaciones físicas y mecánicas. Bogotá D.C: ICONTEC, 2014. 9 p. [NTC 121].

----- . Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra. Bogotá D.C: ICONTEC, 2000. 7 p. [NTC 550].

----- . Durabilidad de estructuras de concreto. Bogotá D.C: ICONTEC, 2007. 11 p. [NTC 5551].

----- . Elaboración y curado de especímenes de concreto pasa ensayos en el laboratorio. Bogotá D.C: ICONTEC, 1994. 9 p. [NTC 1377].

----- . Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. Bogotá D.C: ICONTEC, 2010. 7 p. [NTC 673].

----- . Especificaciones de los agregados para concretos. Bogotá D.C: ICONTEC, 2000. 8 p. [NTC 174].



------. Producción de concreto. Bogotá D.C: ICONTEC, 2008. 13 p. [NTC 3318].

INDIAN INSTITUTE OF SCIENCE. Puzolanas [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms09.htm>>.

INSTITUTO MEXICANO DEL CONCRETO Y EL CEMENTO. Pruebas de resistencia a la compresión del concreto [en línea]. México [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.imcyc.com/ct2006/junio06/PROBLEMAS.pdf>>.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA. Revista Tecnología en marcha. En: Revista Tecnología en marcha, 2008, 263 p.

LÓPEZ YÉPEZ, Lucio Guillermo. Influencia del porcentaje de adición de la microsilice y del tipo de curado, en la penetración del ion cloruro en el concreto de alto desempeño. Tesis de grado, Magíster en Ingeniería Civil. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería > Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, 2011. 140 p.

Norma ASTM C 1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE - NSR 10. Bogotá D.C: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010, 578 p.

REVISTA CEMENTO. Durabilidad de las estructuras: corrosión inducida por el ión cloruro [en línea]. Bogotá [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.icpa.org.ar/publico/files/rev27ion.pdf>>.

RIVERA, Gerardo. Concreto simple [en línea]. Popayán [citado: 20, feb., 2015]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/doc/189675237/Tecnologia-Del-Concreto>>.