

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
VICERRECTORIA GENERAL DE UNIVERSIDAD ABIERTA Y A DISTANCIA
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS

ESPECIALIZACIÓN PATOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓN

2016 - II

**ESTUDIO DE CASO PARA EVALUAR LA PATOLOGIA PRESENTE EN EL
CONCRETO AL ATAQUE QUIMICO DEL CLORURO**

ESTUDIANTES:

RICARDO ALONSO CRUZ ESCOBAR

CÓDIGO: 2216904

DIEGO FERNANDO CISNEROS ROJAS

CÓDIGO: 2217060

DOCENTE:

ARQUITECTO WALTER MAURICIO BARRETO CASTILLO

BOGOTÁ, D.C., 18 DE MARZO DE 2019

CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	9
3. JUSTIFICACIÓN.....	12
4. OBJETIVO GENERAL	13
4.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
5. MARCO TEORICO	14
5.1. IÓN CLORURO EN EL CONCRETO.....	14
5.1.1. Lesiones en el concreto.	15
5.1.2. Lesiones en el acero.	16
5.1.3. Permeabilidad del recubrimiento e Ingreso iones Cloruros en el concreto.....	17
5.1.4. Tipos de Cloruros.	19
5.2. NORMATIVA DURABILIDAD DEL CONCRETO. CLORUROS.....	20
5.2.1. NTC 5551. Durabilidad de Estructuras de Concreto.....	20
5.2.2. Norma Sismo Resistente 2010. NSR 10 Título C4 Requisitos de durabilidad	25
5.2.3. Guía durabilidad del Concreto ACI 201	27
5.2.3.1. Cemento.....	28
5.2.3.2. Agregados.....	29
5.2.3.3. Aditivos	29
5.3. ENSAYOS PERMEABILIDAD IÓN CLORURO	29
5.3.1. RCPT (Rapid Chloride Permeability Test) ASTM C1202 – 12.	29
5.3.2. Ensayo Nordtest NT Build 492	33
5.3.3. Método colorimétrico por aspersion de Nitrato de Plata.....	35
5.4. MECANISMOS MITIGACIÓN IÓN CLORURO.	35
5.4.1. Diseño de mezcla.	35

5.4.2.	Calidad del concreto.....	36
5.4.3.	Barreras protectoras.....	36
5.4.4.	Aditivos inhibidores de corrosión.	37
5.5.	EJEMPLOS DE PACIENTES.....	37
5.6.	CENIZA VOLANTE.....	39
5.6.1.	Ventajas Técnicas.....	40
5.6.2.	Ventajas Económicas y Ambientales	40
6.	METODOLOGIA.....	41
6.1.	Caracterización de materias primas	41
6.1.1.	Reporte de calidad cemento – ART	42
6.1.2.	Reporte de calidad arena gruesa.....	42
6.1.3.	Reporte de calidad grava TMN 12,5 mm.....	43
6.2.	Definición teórica de los diseños de mezcla	44
6.3.	Elaboración de muestra a escala de laboratorio	44
6.3.1.	Alistamiento de agregados	44
6.3.2.	Toma de humedades.....	45
6.3.3.	Pesaje de las materias primas	45
6.3.4.	Mezcla en equipo mecánico	46
6.3.5.	Elaboración de especímenes cilíndricos.....	47
6.3.6.	Mezcla 1, relación agua material cementante 0,65	48
6.3.7.	Mezcla 2, relación agua material cementante 0,45	48
6.3.8.	Mezcla 3, relación agua material cementante 0,3	48
6.3.9.	Mezcla 4, relación agua material cementante 0,65 con adición de ceniza.....	49
6.3.10.	Mezcla 5, relación agua material cementante 0,65 con adición de aditivo inhibidor de corrosión	49

6.3.11.	Mezcla 6, relación agua material cementante 0,65 mayor contenido de cemento	50
6.4.	Resistencia a compresión.	50
6.5.	Permeabilidad Ion cloruro. RCPT.....	52
6.6.	Especímenes en solución de cloruro de sodio.....	55
6.7.	Ensayo Colorimétrico.	56
7.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	61
7.1.	Resistencia a la compresión	61
7.2.	Permeabilidad ion cloruro.....	62
7.2.1.	Mezcla N°1 Testigo.....	62
7.2.2.	Mezcla N°2 (menor relación a/c)	62
7.2.3.	Mezcla N°3 (menor relación a/c)	63
7.2.4.	Mezcla N°4 (materiales cementantes suplementarios. Ceniza Volante).....	63
7.2.5.	Mezcla N°5 (Inhibidor de corrosión)	65
7.2.6.	Mezcla N°6 (mayor contenido de cemento).....	65
7.3.	Evaluación de resultados de acuerdo a NTC 5551	65
8.	CONCLUSIONES.....	68
9.	RECOMENDACIONES	70
	REFERENCIAS.....	71

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Faro Eddystone Rock	14
Figura 2. Corrosión acero	15
Figura 3. Corrosión Acero	16
Figura 4. Lesiones en concreto en puerto marítimo.....	16
Figura 5. Lesiones en acero de refuerzo	17
Figura 6. Factores que afectan el comportamiento de una estructura.....	21
Figura 7. Proceso de corrosión del acero	28
Figura 8. Ensayo RCPT	30
Figura 9. Ensayo Nordtest.....	34
Figura 10. Permeabilidad ion cloruro	34
Figura 11. Puerto Colombia. Cartagena de Indias. Cloruros por agua de mar	37
Figura 12. (a) Plataforma petrolera en Noruega; (b) Puente Storseisundet Noruega. Cloruros por agua de mar	38
Figura 13. (a) Planta PTAR El Salitre Bogotá; (b) Piscinas. Cloruros diferentes aguas de mar ..	38
Figura 14. (a) Sales descongelantes Pavimentos; (b) Pisos Industriales	38
Figura 15. Alistamiento de materiales	45
Figura 16. Determinación de humedades de agregados.....	45
Figura 17. Pesaje de materias primas.....	46
Figura 18. Elaboración concreto. (a) Mezcladora mecánica), (b) ensayo de asentamiento.....	47
Figura 19. (a) Toma de asentamiento y (b) elaboración de especímenes de concreto.....	47
Figura 20. Resistencia a la compresión.....	51
Figura 21. Corte y aserrado de las probetas	52
Figura 22. Impermeabilización de cilindros.	52
Figura 23. Contenido de vacíos.	53
Figura 24. Adición de solución de hidróxido de sodio y cloruro de sodio.	53
Figura 25. Configuración de software y resultados en Coulombs.....	53
Figura 26. Permeabilidad ion cloruro	55
Figura 27. Preparación de probetas en solución	56

Figura 28. Probetas en ensayo	56
Figura 29. Corte de cilindros y alistamiento de probetas.....	57

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Mecanismos de transporte	18
Tabla 2. Clases de exposición	22
Tabla 3. Requerimientos mínimos para diseños de mezcla por durabilidad.....	24
Tabla 4. Control de fisuración	25
Tabla 5. Contenido máximo de ion cloruro	25
Tabla 6. Niveles de exposición NSR 10	26
Tabla 7. Nivel de permeabilidad del espécimen de concreto.....	31
Tabla 8. Propiedades cenizas volante	39
Tabla 9. Normas técnicas colombianas para materias primas de concreto	42
Tabla 10. Reporte de calidad cemento	42
Tabla 11. Reporte de calidad arena.....	43
Tabla 12. Reporte de calidad grava de 12,5 mm.....	43
Tabla 13. Descripción mezclas de prueba.....	44
Tabla 14. Diseño de mezcla A/MC 0,65.....	48
Tabla 15. Diseño de mezcla A/MC 0,45.....	48
Tabla 16. Diseño de mezcla A/MC 0,3.....	49
Tabla 17. Diseño de mezcla A/MC 0,65 más adición de ceniza.....	49
Tabla 18. Diseño de mezcla A/MC 0,65 más adición de aditivo inhibidor de corrosión	50
Tabla 19. Diseño de mezcla A/MC 0,65 mayor contenido de cemento	50
Tabla 20. Resultados de resistencia a la compresión.....	51
Tabla 21. Permeabilidad Ión cloruro ASTM C 1202 (calificación en función de la carga)	54
Tabla 22. Resultados de ensayo de permeabilidad	54
Tabla 23. Descripción de probetas de ensayo	57
Tabla 24. Ensayo colorimétrico especímenes de concreto	58
Tabla 25. Costeo diseños de mezcla	64
Tabla 26. Permeabilidad NTC 5551	66
Tabla 27. Requisitos diseños de mezcla	67

RESUMEN

Se presenta un estudio de caso del efecto del ion cloruro sobre el concreto y el acero de refuerzo a nivel de laboratorio, en el marco de la patología preventiva. Para entender las lesiones y las formas de mitigar el efecto de este agente agresor del concreto, se fabricaron seis mezclas en el laboratorio modificando variables como la relación agua material cementante, el uso de adiciones, aditivos inhibidores de corrosión y cuantías de cemento. Para evaluar la efectividad de la mitigación a la permeabilidad del ion cloruro con las modificaciones al diseño de mezcla, se realizaron ensayos de RCPT (Rapid Chloride Permeability Test), además se documentó el nivel de ingreso de los cloruros por medio de la aspersión de nitrato de plata en probetas que se sumergieron durante 28 días en una solución de cloruros.

Palabras clave: permeabilidad, ion cloruro, durabilidad.

SUMMARY

A case study of the effect of chloride ion on concrete and reinforcing steel at the laboratory level is presented, within the framework of preventive pathology. To understand the injuries and ways to mitigate the effect of this aggressor agent of the concrete, six mixtures were manufactured in the laboratory modifying variables such as the ratio water cemental material, the use of additions, corrosion inhibiting additives and cement amounts. To evaluate the effectiveness of mitigation to the chloride ion permeability with the modifications to the mix design, RCPT (Rapid Chloride Permeability Test) tests were carried out, and the entry level of the chlorides was documented by means of the spray of silver nitrate in test tubes that were immersed for 28 days in a chloride solution.

Keywords: permeability, chloride ion, durability.

1. INTRODUCCION

Colombia es un país que cuenta con una gran variedad de climas determinados por la geografía y las condiciones atmosféricas (precipitación, temperatura, vientos, radiación solar, altitud etc.), generando temperaturas por debajo de los 0° C en los picos de las montañas hasta los 35°C y más en las zonas costeras y llaneras del país. Esta variedad de las condiciones atmosféricas en un territorio relativamente pequeño comparado con otros países, nos permite tener climas tropicales, secos, templados y fríos a lo largo del territorio nacional.

Con este panorama, es claro que las estructuras en concreto reforzado en Colombia están sometidas a diferentes tipos de climas y microclimas, que generarán distintos medios agresores en menor o mayor grado al material. Al ser un País con más de 3000 km de costas marítimas, y contar con grandes concentraciones urbanas en esta zona (Cartagena, Santa Marta, Buenaventura etc.) el principal agente agresor del concreto en estas zonas son los iones cloruros.

La normativa colombiana referente a la durabilidad del concreto se encuentra especificada en la Norma Sismo Resistente 10 Título C y la Norma Técnica Colombiana 5551 (durabilidad de estructuras de concreto), en donde se especifica las características mínimas que debe cumplir la mezcla de concreto (relación a/c máxima, cantidad mínima de cemento, porcentaje mínimo de aire incorporado, resistencia mínima a la compresión entre otros) en función de las condiciones ambientales y de los ataques a los que va estar sometida la estructura, ya sean físicos o químicos.

Desafortunadamente en nuestro país, un gran número de profesionales que se encargan de determinar las especificaciones técnicas del concreto para los diferentes proyectos, solamente consideran los requerimientos estructurales y no las condiciones del entorno en el cual va a ser usada la estructura. En la mayoría de los casos, los requerimientos del concreto por durabilidad (resistencia mínima, a/c máxima) superan a los de las sollicitaciones mecánicas, y son ignorados ya sea por omisión o desconocimiento por los formuladores de estos proyectos.

En el presente documento se expone la importancia de un diseño de mezcla adecuado cuando el concreto se encuentra sometido al ataque del ion cloruro, se enmarca dentro de la patología preventiva teniendo en cuenta la elaboración a nivel de laboratorio mezclas con diferentes características (relación agua/material cementante variable, adiciones, aumento en la cantidad

cemento) y posteriormente evaluar el efecto del ion cloruro sobre estas probetas por medio de un ensayo rápido para determinar la permeabilidad (Rapid Chloride Permeability Test) y el potencial de la corrosión. Para proporcionar una visión más global del efecto de los cloruros en el concreto y un contexto al presente trabajo, se presenta historia del efecto en el concreto, incluyendo normativa, guías, estudios etc.

2. ALCANCE

El presente documento resalta la importancia de realizar un diseño de mezcla por durabilidad cuando éste va a estar sometido a un ambiente con presencia de cloruros. Los ensayos realizados y los concretos fabricados, fueron elaborados a nivel de laboratorio bajo condiciones controladas y materiales estándar (cemento, agregados, aditivos).

El estudio de caso presentado muestra tendencias y desempeño del concreto y por lo tanto su alcance se limita al laboratorio. Si bien muchos de los resultados obtenidos pueden replicarse a nivel industrial, es claro que esto se encuentra fuera del alcance del presente documento, ya que el concreto premezclado es un material no terminado y su calidad depende en gran parte de los procesos de colocación, consolidación, acabado y curado en obra.

3. JUSTIFICACIÓN

En el gremio de la construcción no es común que los profesionales encargados de definir las especificaciones del concreto consideren la variable durabilidad, ya sea por desconocimiento o lo que es peor por omisión. Solamente en proyectos de gran envergadura (plantas tratamiento, puentes de grandes luces, túneles etc.) se consideran variables como la relación agua material cementante máxima, mínima, cuantía de cemento, resistencia a compresión mínima e inclusiones de aire. Para el resto de estructuras el común denominador es el asentamiento de la mezcla, el tamaño máximo nominal del agregado y resistencia a la compresión basada en un análisis estructural de capacidad y demanda.

Con este panorama es claro que es necesario cambiar este modelo y enfocar las especificaciones del concreto en el marco de la durabilidad, basado en un correcto juicio y definición del nivel de exposición del elemento y por lo tanto el cumplimiento de los requisitos mínimos de acuerdo a la NTC 5551 y NSR 2010 título C. Específicamente en el tema de la resistencia del concreto al ataque de los iones cloruro, es claro que Colombia es un País que está sometido a este agente agresor ya que cuenta con más de 3000 km de costas marítimas y grandes centros urbanos como Cartagena, Barranquilla y Buenaventura entre otros. Además, la norma específica que también se presentan casos de Ion cloruro diferentes a los del agua de mar, como puede ocurrir en una PTAR o cuando se presentan suelos muy agresivos.

4. OBJETIVO GENERAL

Confrontar los criterios normativos del diseño de mezcla por durabilidad presentes en la normatividad colombiana en función de los niveles de exposición a cloruros.

4.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Documentar mecanismos de generación y lesiones por el ataque de cloruros en el concreto.
- Evaluar diferentes alternativas de mitigación de las lesiones generadas por los cloruros en el concreto.
- Realizar ensayos de laboratorio para establecer el nivel de afectación de las probetas sometidas al ataque de cloruros, así como evaluar la efectividad de los mecanismos de mitigación.
- Evaluar la efectividad de las recomendaciones de la normativa vigente cuando el concreto está expuesto a los cloruros.
- Estimar el costo por metro cubico de los diseños de mezcla
- Establecer la mejor alternativa de mitigación teniendo en cuenta el costo y su desempeño.

5. MARCO TEORICO

5.1. IÓN CLORURO EN EL CONCRETO

El concepto de durabilidad en el concreto no es un término moderno de la tecnología de este material, por el contrario, fue tratado desde los inicios de la fabricación del Cemento Portland. Cuando John Smeaton construyó el famoso faro de Eddystone Rock (1759 a 1882), la primera estructura en concreto que usó cemento portland, consideró los ataques a los cuales iba a estar sometida la estructura al desarrollar un cemento para estos ambientes agresivos. Esto quedó demostrado en 1877 cuando la estructura fue demolida por la erosión de la roca de soporte, pero el faro se encontraba en buenas condiciones aun cuando habían pasado 100 años bajo estos niveles de exposición.



Figura 1. Faro Eddystone Rock

Fuente: (photographers-resource, 2010)

Es aceptado en la práctica constructiva que los concretos expuestos a aguas salinas y brisas marinas están sometidos al ataque de los cloruros debido a su alta concentración en estos medios, con valores promedio de 20000 ppm. Una vez los cloruros alcanzan la concentración mínima

para favorecer la corrosión (umbral de cloruros 0,25%), se inicia un proceso de deterioro y degradación de las estructuras de concreto manifestándose en lesiones como desprendimientos, manchas, fisuras entre otras.

Sin embargo, el proceso de corrosión no se inicia con la presencia exclusiva de cloruros, es más el resultado de tres elementos: humedad, oxígeno y cloruros que superaron el umbral en la proximidad de las barras, lesiones que se pueden observar en la figura 2. Esta combinación puede llegar a generar lesiones tan graves como el colapso parcial o total de estructuras.

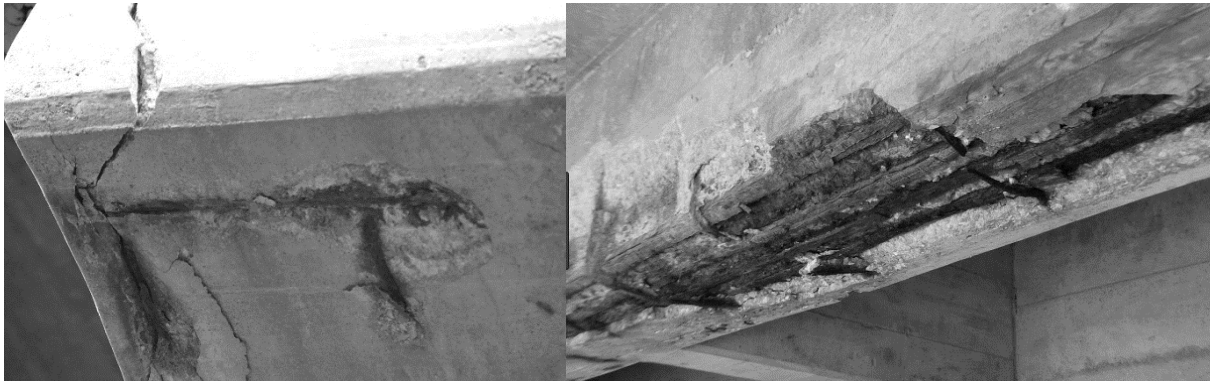


Figura 2. Corrosión acero. (a) presencia en placa. (b) presencia en vigas

Fuente: (photographers-resource, 2010)

Los factores que mayor influencia tienen sobre los procesos de corrosión son:

- Recubrimiento inadecuado a las condiciones de exposición
- Excesiva porosidad en el concreto.
- Fisuras y grietas en la estructura.
- Alta concentración de cloruros en los constituyentes del concreto.

5.1.1. Lesiones en el concreto.

Las lesiones más comunes en el concreto por efecto de los cloruros y por consiguiente de la corrosión incluyen desprendimientos, fisuración, manchas y desintegración del material en casos extremos. Figura 3 y 4.



Figura 3. Corrosión Acero

Fuente: (Laboratory, 2018)

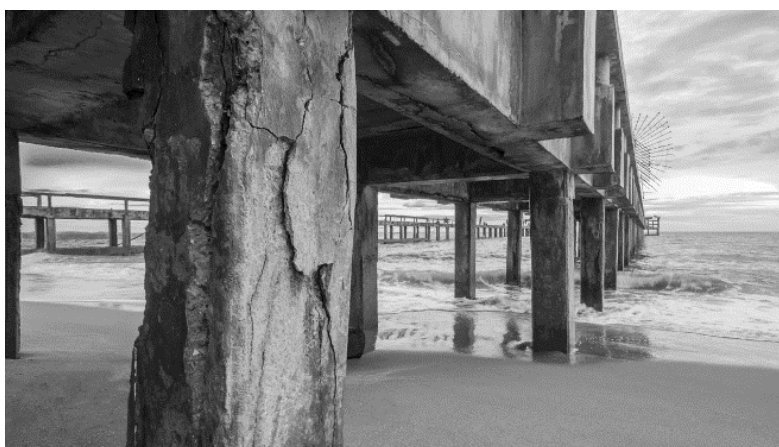


Figura 4. Lesiones en concreto en puerto marítimo

Fuente: (Markham, 2016)

Las sales que se cristalizan dentro de los poros del concreto, una vez ocurre la evaporación del agua, generan presiones internas en el material que pueden fracturarlo.

5.1.2. Lesiones en el acero.

La corrosión en el acero genera lesiones irreversibles en el mismo relacionadas con el aumento y pérdida de sección transversal. Este fenómeno se inicia una vez se alcanza el umbral de cloruros o la pasta se carbonata, generando un proceso electroquímico entre un cátodo y un ánodo cuyo electrolito es el agua que se encuentra en los poros. El otro factor necesario para la corrosión es el oxígeno, que es consumido generando productos de corrosión

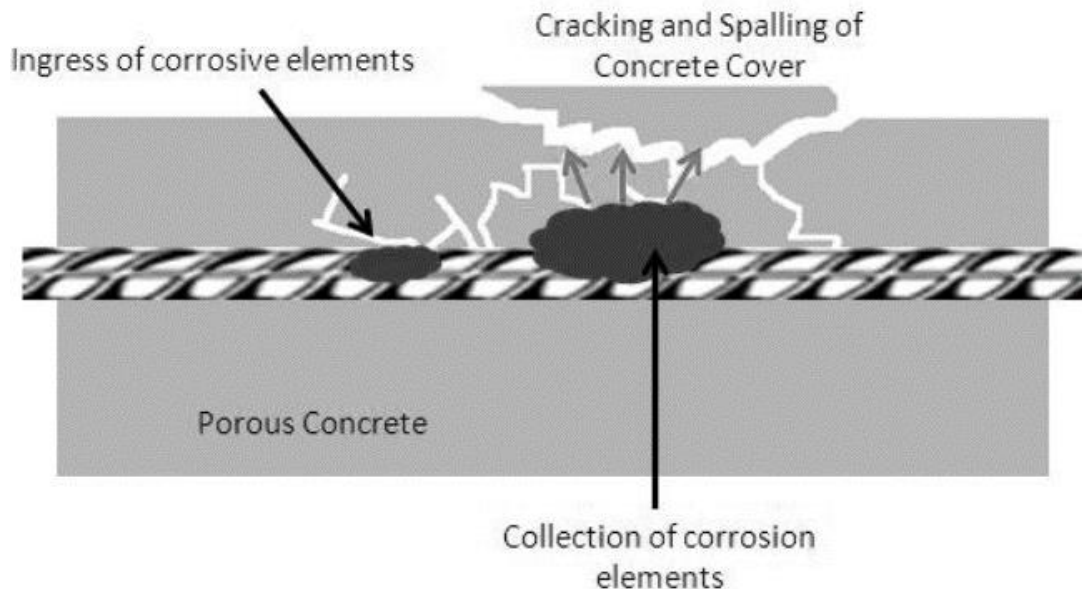


Figura 5. Lesiones en acero de refuerzo

Fuente: (Constructor, 2013)

5.1.3. Permeabilidad del recubrimiento e Ingreso iones Cloruros en el concreto.

Los iones cloruros en el concreto pueden provenir de fuentes internas (constituyentes del concreto) y fuentes externas que están determinadas por el nivel de agresividad del microclima que rodea la estructura. Para el caso de los iones cloruros provenientes del medio, se han establecido cuatro mecanismos de transporte de este agente agresor, en donde es claro que la permeabilidad y la estructura de los poros determinan un mayor o menor impacto.

El ingreso de los Iones cloruros al concreto es un proceso complejo que normalmente asocia varias mecanismo de transporte, pero generalmente predomina uno de ellos. En la siguiente tabla podemos ver ejemplos de estructuras sometidas al ataque de los cloruros, y los mecanismos de transporte que predominan:

Tabla 1. Mecanismos de transporte

Exposición	Ejemplo de estructuras	Mecanismo de transporte principal.
Sumergido	Subestructuras por debajo de la línea de marea baja.	Difusión
Zona marea	Estructuras que contienen líquidos. Base exterior de muros o túneles de transporte	Permeabilidad, difusión y posible acción de
Zona de splash o salpicadura	Estructuras cercanas a la zona de salpicadura de las mareas	Absorción capilar y difusión.
Zona costera	Estructuras cercanas a la costa	Absorción capilar (también carbonatación)

Fuente: (Aggregates, 2009)

- **Succión Capilar:** Se produce cuando el concreto seco entra en contacto con un líquido (agua con ion cloruro), y por efectos de la tensión superficial se genera un ingreso rápido de la sustancia dentro del concreto. Este mecanismo de transporte está influenciado por la viscosidad, densidad y tensión superficial del líquido, así como la estructura porosa del concreto (tortuosidad, continuidad de los capilares y radios). Los concretos saturados tienen una succión capilar nula.
- **Difusión:** Las diferencias de concentraciones entre dos zonas adyacentes, provoca que la de mayor concentración se transporte hacia la de menor concentración hasta generar un equilibrio de las dos sustancias. Un ejemplo de transporte por difusión en el concreto es el ingreso de CO₂ al interior del material, para lograr un equilibrio. La ASTM C1556 establece un método estándar para determinar el coeficiente aparente de difusión de los cloruros en una mezcla de concreto. (ASTM International, 2016)
- **Permeabilidad del concreto:** La permeabilidad es el flujo de un fluido a través del concreto cuando existe un diferencial de presiones hidráulicas, aunque es necesario que ambas caras estén en contacto con el fluido. La permeabilidad de un concreto depende de

la estructura de poros y de la viscosidad de los gases o líquidos (sustancias disueltas perjudiciales como los cloruros), se presenta principalmente cuando se tiene una cabeza o presión hidráulica, como en las estructuras de retención de líquidos. Es un mecanismo de transporte que se genera en concretos de muy baja calidad que no tuvieron control alguno en su fabricación.

- **Succión y permeabilidad:** Este último mecanismo de transporte de agentes agresores, incluido el ion cloruro, se genera cuando una de las caras está en contacto con el agua y la otra con el aire. Por la superficie húmeda ingresa por permeabilidad el agua, mientras que en la cara opuesta se evapora el agua que atravesó toda la sección del elemento, acelerando aún más el ingreso del agua (iones cloruros, sulfatos, etc.) desde la sección húmeda al interior del material.

Los procesos de corrosión en el concreto están influenciados por mecanismos de difusión

- Difusión de CO_2 en los poros del concreto, reduciendo el pH de la pasta y produciendo carbonatación.
- Difusión Cl^- en los poros del concreto llenos o parcialmente llenos, generando concentración de cloruros que una vez superan el umbral producen corrosión localizada.

En las estructuras en contacto con agua de mar, la zona más afectada es aquella sometida a ciclos de humedecimiento y secado. Una vez ocurre el humedecimiento de la superficie del concreto, los cloruros penetran por succión capilar, y a su vez, cuando ocurre el secado el agua se evapora y los cloruros se acumulan en los poros del concreto.

5.1.4. Tipos de Cloruros.

En el concreto se deben distinguir tres tipos de iones cloruro, con excepción de los cloruros aportados por los constituyentes del concreto. De esta forma los cloruros totales debidos a fuentes externas son la suma de los cloruros libres que se encuentran en la matriz porosa y los cloruros enlazados o fijados, ya sea química y/o físicamente.

- **Cloruros fijados:** Los cloruros fijados se deben a mecanismos físicos y químicos. Cuando los iones cloruro se enlazan físicamente con los productos de hidratación, son

adsorbidos a la superficie del C-S-H, C-A-H, C-A-F-H y de esta forma no generan concentraciones para dar inicio a procesos de corrosión en el acero embebido. Por otra parte, los cloruros que se fijan químicamente lo realizan con los componentes hidratados de la alúmina, principalmente con el C₃A conformando cloro aluminato de calcio hidratado o Sal de Friedel.

- **Cloruros libres:** Son aquellos cloruros que no se enlazan química ni físicamente con los productos de hidratación. Estos cloruros son los responsables de realizar los ataques localizados al acero de refuerzo e iniciar los procesos de corrosión.

5.2. NORMATIVA DURABILIDAD DEL CONCRETO. CLORUROS.

A continuación, se resaltan los puntos más importantes de la normativa colombiana referente a la durabilidad de los concretos, enfocado a ambientes que contienen concentraciones perjudiciales de ion cloruro.

5.2.1. NTC 5551. Durabilidad de Estructuras de Concreto.

La norma establece el concepto de Durabilidad en estructuras de concreto reforzado como “la capacidad de comportarse satisfactoriamente frente a las acciones químicas y físicas (o la combinación de ambas) agresivas y así proteger adecuadamente las armaduras y demás elementos metálicos embebidos en el concreto, durante su vida útil”. (ICONTEC, 2007)

De acuerdo al documento los factores que afectan la durabilidad del concreto se encuentran en el siguiente esquema:

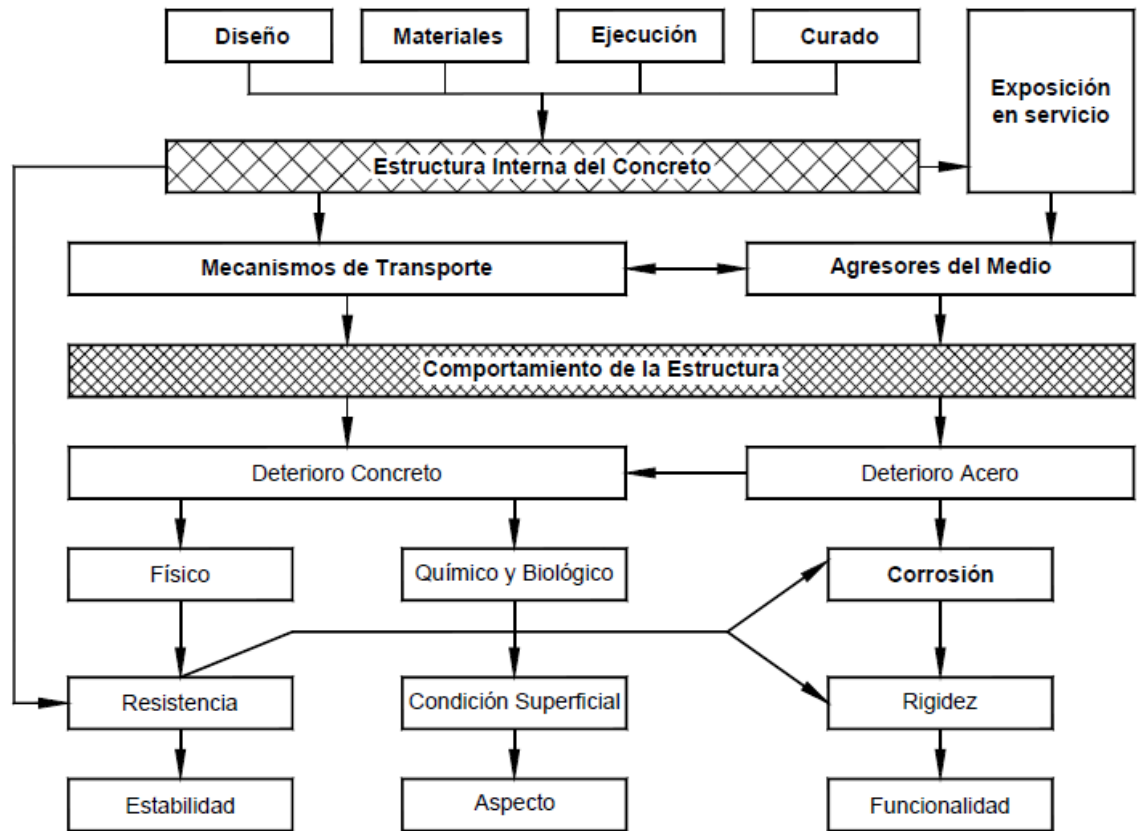


Figura 6. Factores que afectan el comportamiento de una estructura

Fuente: NTC 5551, (ICONTEC, 2007), pág. 5

La norma técnica define siete clases de exposición del concreto separándolas en dos grandes grupos que son aquellas que generan corrosión en las armaduras y otros procesos de degradación en el concreto. Para la corrosión de los aceros de refuerzo diferencia los niveles de exposición por carbonatación y por cloruros de agua de mar o de otras fuentes.

Tabla 2. Clases de exposición

Clase	Subclase	Tipo de proceso	Descripción del ambiente de exposición	Ejemplos
1		Ningún riesgo de corrosión o ataque.	Interiores de edificios, no sometidos a condensaciones. Elementos de concreto en masa.	Interior de edificios, protegidos de la intemperie.
2		Corrosión inducida por carbonatación.		
	2,1	Humedad alta	Interiores sometidos a humedades medias altas > 65 % o condensaciones. Exteriores en ausencia de cloruros y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. Elementos enterrados o sumergidos.	Sótanos no ventilados, cimentaciones, tableros
	2,2	Humedad media	Exteriores en ausencia de cloruros sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual menor o igual a 600 mm.	Construcciones exteriores protegidas de la lluvia. Tableros y pilas de puentes en zonas de precipitación media anual menor o igual a 600 mm.
	2,3	Humedecimiento-secado	Ciclos de humedecimiento y secado.	Superficies en contacto con el agua, estructuras sometidas a ciclos de humedad y secado, tanques, pilas.
3		Corrosión inducida por cloruros del agua de mar		
	3,1	Aérea	Elementos de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar. Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km).	Estructuras en las proximidades de la costa, zonas aéreas de diques y otras obras de defensa.
	3,2	Sumergida	Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente por debajo del nivel mínimo de bajamar.	Zonas sumergidas de diques y otras obras de defensa litoral, cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en pleamar.
	3,3	En zona de mareas	Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de cambio de mareas.	Zonas situadas en el recorrido de marea de diques y otras obras de defensa litoral. Zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea.

Clase	Subclase	Tipo de proceso	Descripción del ambiente de exposición	Ejemplos
4		Corrosión inducida por cloruros diferentes a los que provienen del agua de mar.	Concreto reforzado o con metal embebido en contacto con agua con cloruros diferente al agua de mar.	
	4,1	Humedad moderada.	Concreto con exposición directa a salpicaduras con cloruros.	Piscinas, plantas de tratamiento
	4,2	Humedad	Concretos expuestos a cloruros provenientes de procesos industriales. Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino.	Piscinas, plantas de tratamiento
	4,3	Ciclos de humedecimiento y secado.	Estructuras expuestas a humedecimiento y secado de aguas con contenidos de cloruros.	Estructuras de puentes Pavimentos Placas de parqueaderos.
5	5,1	Ataque por hielo y deshielo.	Elementos situados en contacto frecuente con el agua, o zonas con humedad relativa media superior al 75 % y que tengan una probabilidad anual superior al 50 % de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5 °C.	Construcciones en zonas de alta montaña, estaciones invernales, cuartos fríos temperaturas por debajo de -5 °C.
6		Ataque químico		
	6,1	Débil	Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del concreto con velocidad lenta. Véase la Tabla 2.	Instalaciones industriales con sustancias débilmente agresivas de acuerdo con la Tabla 2, construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad débil según la Tabla 2
	6,2	Medio	Elementos en contacto con el agua de mar. Elementos situados en ambiente con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar alteración del concreto con velocidad media, de acuerdo con la Tabla 2.	Estructuras marinas en general. Instalaciones industriales con sustancias de agresividad media.
	6,3	Fuerte	Elementos expuestos a fuertes alteraciones del concreto. Véase Tabla 2.	Instalaciones industriales con sustancias de alta agresividad, de acuerdo con la Tabla 2. Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales.
7	7,1	Desgaste	Abrasión, cavitación. Elementos sometidos a desgaste superficial. Elementos de estructuras hidráulicas en los que el nivel piezométrico pueda descender por debajo de la presión de vapor de agua.	Pilas de puente en cauces muy torrenciales, elementos de diques, tuberías de alta presión, tránsito ligero de pavimentos, tráfico mediano o pesado.

Fuente: NTC 5551, (ICONTEC, 2007), pág. 7

Para que las estructuras y elementos de concreto tengan una expectativa de durabilidad adecuada, la norma establece requerimientos del diseño de mezcla en cuanto a la resistencia

mínima a compresión, a/mc máxima, cantidades de cementante, incorporación de aire y tipo de cemento. Estos requerimientos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Requerimientos mínimos para diseños de mezcla por durabilidad

		Clase														
		1	2			3			4			5	6			7
Parámetro	Subclases	1	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3	4,1	4,2	4,3		6,1	6,2	6,3	
Máxima relación a/m.c.	Concreto no reforzado	0,65	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0,45	0,5	0,5	0,45	0,5
Máxima relación a/m.c.	Concreto reforzado	0,65	0,6	0,55	0,5	0,5	0,45	0,4	0,55	0,55	0,45	0,45	0,5	0,45	0,45	0,5
Máxima relación a/m.c.	Concreto preesforzado	0,6	0,6	0,55	0,5	0,5	0,45	0,4	0,5	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,5
Resistencia especificada mínima a compresión MPa		---	24	28	28	28	35	35	28	28	35	31	31	35	35	28
Contenido mínimo de material cementante (kg/m³)	Concreto no reforzado	200	---	---	---	---	---	---	---	---	---	275	275	300	325	275
Contenido mínimo de material cementante (kg/m³)	Concreto reforzado	250	300	300	300	300	325	350	300	320	340	300	325	350	350	300
Contenido mínimo de material cementante (kg/m³)	Concreto preesforzado	275	300	300	300	300	325	350	300	320	340	300	325	350	350	300
Contenido de aire incorporado mínimo (%)									**	**	**	**	**	**	**	
Otros requerimientos													*	*	*	

* Cemento resistente a sulfatos (Tipo II, Tipo V) o una adecuada dosis de microsilica o cemento adicionado que cumpla con las normas.

** Según Tabla 4 relación a/m.c. = relación agua / material cementante

Fuente: NTC 5551, (ICONTEC, 2007), pág. 9

También se considera el control de agrietamientos, ya que las fisuras facilitan considerablemente el ingreso de los agentes agresores por medio del agua o el oxígeno. Respecto al ancho máximo de la fisura en función del nivel de exposición la norma establece:

Tabla 4. Control de fisuración

Tipo de Ambiente	1	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3	4,1	4,2	4,3	5,1	6,1	6,2	6,3	7
Separación máxima de fisuras (mm)	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,6

Fuente: NTC 5551, (ICONTEC, 2007), pág. 12

Como los materiales constituyentes del concreto pueden aportar cloruros a la mezcla, la norma técnica considera este aspecto y establece un límite de contenido ion cloruro.

Tabla 5. Contenido máximo de ion 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: NTC 5551 (ICONTEC, 2007), pág. 13

5.2.2. Norma Sismo Resistente 2010. NSR 10 Título C4 Requisitos de durabilidad

La norma NSR 10 establece cuatro categorías o niveles de exposición, y para el caso de los cloruros se agrupan en la categoría C, subdivida a su vez en tres subclases. El nivel C0 corresponde a elementos en concreto reforzado no requieren protección adicional, mientras que el nivel C1 y C2 aplica para concretos reforzados y preesforzados que van a estar en contacto con iones cloruro de diferentes fuentes. (MAVDT. NSR10, 2010)

Tabla 6. Niveles de exposición NSR 10

Categoría	Severidad	Clase	Condición	
F Congelamiento y deshielo	No es aplicable	F0	Concreto no expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo	
	Moderada	F1	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y exposición ocasional a la humedad	
	Severa	F2	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto continuo con la humedad	
	Muy severa	F3	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo que estará en contacto continuo con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	
S Sulfato			Sulfatos solubles en agua (SO_4) en el suelo, % en peso	Sulfato (SO_4) disuelto en agua, ppm
	No aplicable	S0	$SO_4 < 0.10$	$SO_4 < 150$
	Moderada	S1	$0.10 \leq SO_4 < 0.20$	$150 \leq SO_4 < 1500$ agua marina
	Severa	S2	$0.20 \leq SO_4 \leq 2.00$	$1500 \leq SO_4 \leq 10000$
	Muy severa	S3	$SO_4 > 2.00$	$SO_4 > 10000$
P Requiere baja permeabilidad	No aplicable	P0	En contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad	
	Requerida	P1	En contacto con el agua donde se requiera baja permeabilidad	
C Protección del refuerzo para la corrosión	No aplicable	C0	Concreto seco o protegido contra la humedad	
	Moderada	C1	Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros	
	Severa	C2	Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen	

Fuente: (MAVDT. NSR10, 2010), pág. C-61

Los requisitos del diseño de mezcla en función del nivel o niveles de exposición determinados por el proyectista, se pueden observar en la tabla 4.2.2.1 Si se seleccionaron más de dos niveles de exposición, se deben elegir los requisitos de mezcla más exigentes.

Clase de Exposición	Rel. a/mc máx.±	f' _c min. MPa	Requisitos mínimos adicionales			
			Contenido de aire			Límites en los cementantes
F0	N/A	17	N/A			N/A
F1	0.45	31	tabla C.4.4.1			N/A
F2	0.45	31	tabla C.4.4.1			N/A
F3	0.45	31	tabla C.4.4.1			tabla C.4.4.2
			Tipos de material cementante*			Aditivo cloruro de calcio
			ASTM C 150	ASTM C 595	ASTM C 1157	
S0	N/A	17	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción
S1	0.50	28	II ^{1‡}	IP(MS), IS(<70) (MS)	MS	Sin restricción
S2	0.45	31	V [‡]	IP(HS), IS(<70) (HS)	HS	No se permite
S3	0.45	31	V puzolanas o escoria [§]	IP(HS) y puzolanas o escoria [§] o IS(<70) (HS) y puzolanas o escoria [§]	HS y puzolanas o escoria [§]	No se permite
P0	N/A	17	Ninguna			
P1	0.50	28	Ninguna			
			Contenido máximo de iones de cloruro (Cl ⁻) soluble en agua en el concreto, porcentaje por peso de cemento		Requisitos relacionados	
			Concreto reforzado	Concreto Preesforzado		
C0	N/A	17	1.00	0.06		
C1	0.50	17	0.30	0.06		
C2	0.40	35	0.15	0.06		
					7.7.6, 18.16*	

Fuente: (MAVDT. NSR10, 2010), pág. C-62

5.2.3. Guía durabilidad del Concreto ACI 201

En la guía se discuten los principales causas y agentes agresores del concreto, describiendo los mecanismos de deterioro y los medios para mitigar o evitar esto daños. El capítulo 4 desarrolla el tema de la corrosión de los metales embebidos en el concreto, causado por los cloruros que pueden provenir del uso de sales descongelantes o el agua de mar.

Con respecto a la corrosión el ACI establece que es un proceso electroquímico donde se genera un ánodo y un cátodo que a su vez generan oxidación y reducción respectivamente, provocando presiones internas en el material y desprendimientos. En el ánodo se liberan electrones que forman iones ferrosos, y en el cátodo iones de hidroxilo, este proceso se inicia cuando la capa pasivadora del acero se pierde debido a la disminución de la alcalinidad de la pasta ($\text{pH} < 10$ pasta de cemento) o a los ataques por iones cloruros que alcanzan una concentración mínima para iniciar el proceso de corrosión en el acero, conocido como el umbral de cloruros (0.25 % de la cantidad cementante).

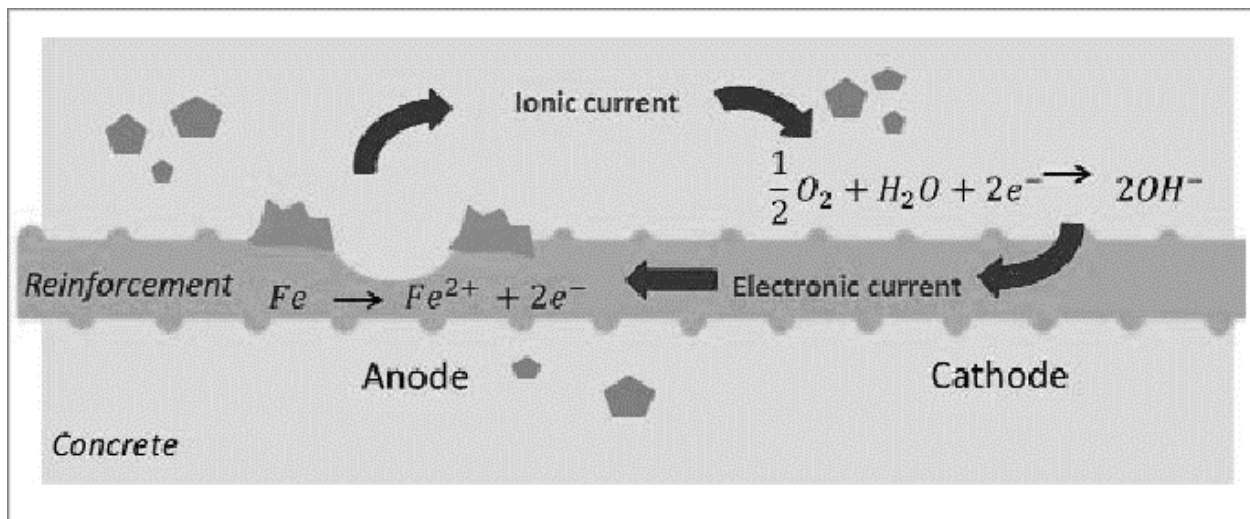


Figura 7. Proceso de corrosión del acero

Fuente (Holmes, Byrne, & and Norton, 2015)

La guía considera el efecto de los cloruros que se encuentran en los constituyentes del concreto, agrupándolos con el nombre de cloruros locales. A continuación, se describe brevemente el efecto de estos cloruros en el concreto:

5.2.3.1.Cemento

La alta alcalinidad de la pasta proporciona un medio protector a las barras de refuerzo. Este alto pH se debe principalmente al hidróxido de calcio que constituye aproximadamente el 15 a 25% de la pasta de cemento. Se ha encontrado que cementos con contenidos altos de C3A (5 a 8%, Verbeck 1998), mitigan la corrosión ya que enlazan químicamente los cloruros formando cloroaluminato de calcio hidratado.

Normalmente el contenido de cloruros en el cemento y otras adiciones es muy bajo, para considerarse una fuente de corrosión del acero.

5.2.3.2. Agregados

Es considerable el efecto que pueden generar los cloruros si se encuentran en los agregados así su concentración sea baja, ya que éstos son los mayores constituyentes del concreto (65 a 75% volumen). Los agregados se pueden contaminar con cloruros si los sitios de extracción están cercanos a las costas y no se toman las medidas de precaución necesarias.

5.2.3.3. Aditivos

Se debe evaluar la cantidad de ion cloruro en los aditivos acelerantes que están basados en cloruro de calcio. Aunque no necesariamente los aditivos acelerantes basados en otros materiales (formato de calcio, nitrito de calcio, tiocianato de sodio) se consideran como no corrosivos, es necesario evaluar su efecto.

Se ha demostrado por numerosos ensayos realizados en campo (Clear 1976, Pfeifer, Landgreen y Zoob 1987; Marusin y Pfeifer 1985) que uno de los factores que más influye en la permeabilidad del concreto al ion cloruro es la relación a/mc, aunque por sí solo este parámetro no es suficiente. Por lo general con relaciones a/mc iguales o menores a 0.45 se acepta que el concreto tiene una buena protección contra las aguas salinas, pero si el recubrimiento no es el adecuado como por ejemplo 1'', se presentará corrosión con relaciones tan bajas como 0.32. De acuerdo a lo anterior para obtener una protección adecuada contra las aguas salobres y lesiones generadas por la corrosión del acero de refuerzo, las relaciones a/mc deben ser menores a 0.45 y preferiblemente 0.40, además el recubrimiento de las barras de acero debe ser de 3'' (75 mm).

5.3. ENSAYOS PERMEABILIDAD IÓN CLORURO

5.3.1. RCPT (Rapid Chloride Permeability Test) ASTM C1202 – 12.

Fue adoptado en 1983 la prueba RCPT por la AASHTO T277 y la ASTM C1202, previo desarrollo de Whiting en 1981. La prueba permite evaluar en 6 horas la permeabilidad del concreto al paso del ion cloruro, al polarizar dos soluciones en positivo y negativo, obligando al

ion cloruro a atravesar el concreto. El ensayo consiste en someter una probeta (previamente condicionado y saturado 100 mm diámetro y 50 mm de espesor) en una celda que contiene una solución del 3% de NaCl y por el otro lado 0.3 M NaOH. (ASTM International, 2012)

No es recomendable hacer la prueba del RCPT en concretos con fibras y reforzados, además aquellos que contengan nitrato de calcio pueden presentar problemas.

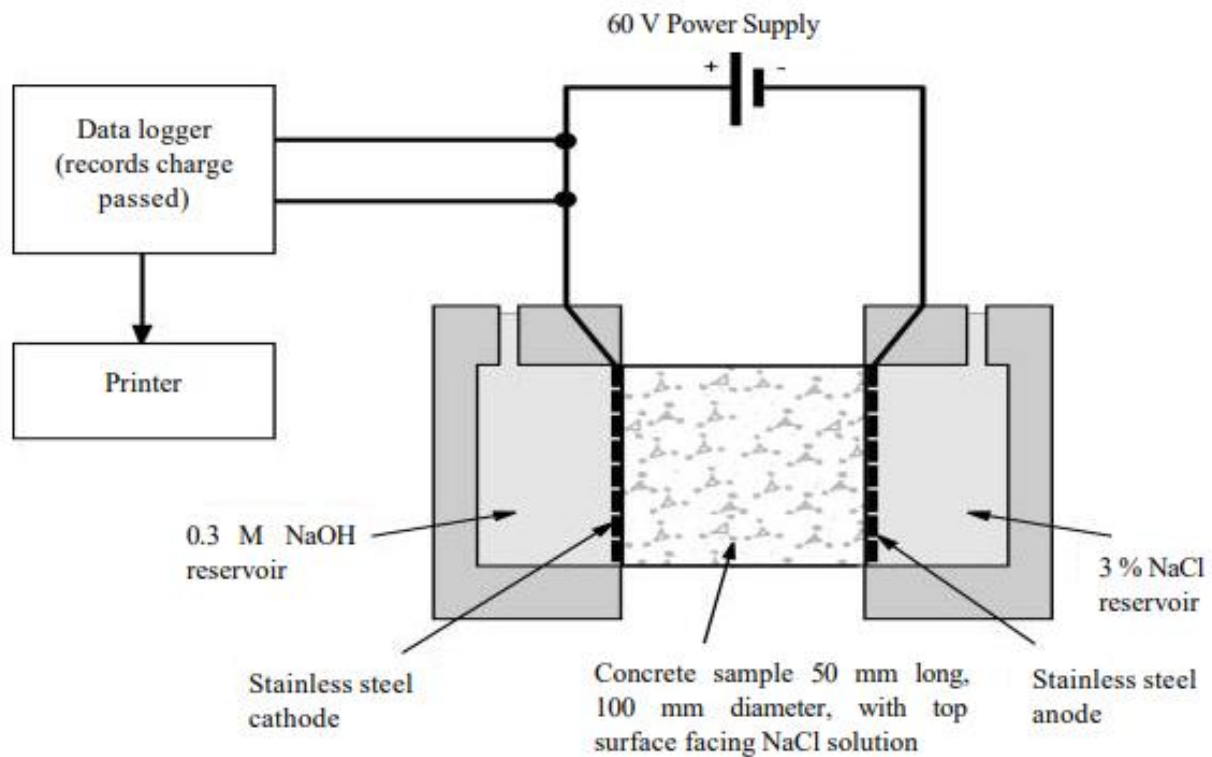


Figura 8. Ensayo RCPT

Fuente: (ASTM International, 2012)

Tabla 7. Nivel de permeabilidad del espécimen de concreto

Culombios <i>Coulombs</i>	Tipo de Permeabilidad <i>Permeability Type</i>	Típico de <i>Typical of</i>
> 4000	Alta <i>High</i>	Relaciones a/c altas <i>High w/c ratios</i>
4000 - 2000	Moderada <i>Moderate</i>	Relaciones a/c de 0.40 a 0.50 <i>w/c ratios from 0.40 to 0.50</i>
2000 - 1000	Baja <i>Low</i>	Relaciones a/c < a 0.40 <i>w/c ratios < 0.40</i>
1000 - 100	Muy Baja <i>Very Low</i>	Hormigones con Látex <i>Latex Concretes</i>
< 100	Despreciable <i>Negligible</i>	Hormigones con Polimeros <i>Polimeric Concretes</i>

Fuentes: (ASTM International, 2012)

A continuación, se presenta una descripción del ensayo:

- **Objeto:** El ensayo tiene por objeto determinar la resistencia del concreto a la permeabilidad del ion cloruro, a partir de mediciones eléctricas en coulomb que se correlacionan para determinar el nivel de permeabilidad, de acuerdo a la ASTM C 1202.
- **Alcance:** El documento se aplica a probetas cilíndricas de concreto endurecido de 98,5 mm +/- 3.5 mm de diámetro y 51 mm +/- 2 mm de espesor cortados en laboratorio, sin el uso de materiales conductores o aditivos basados en nitrato de calcio (materia prima de los inhibidores de corrosión o algunos acelerantes) a los que se les desee determinar la resistencia a la penetración del ion cloruro.
- **Equipos y materiales consumibles:**

El equipo de permeabilidad consiste en un multímetro que mide la caída de voltaje, una fuente de voltaje y dos celdas en acrílico con mallas metálicas. Los otros equipos necesarios son:

- Solución cloruro de sodio al 3% en agua destilada (NaCl)
- Solución de hidróxido de sodio al 0,3 N en agua destilada (Na (OH))
- Agua destilada y hervida.
- Olla de vacío y bomba de vacío.
- Maquina cortador con disco diamantado.
- Sellante epóxico y brocha de aplicación.

- Recipientes metálicos.
- Lija n°200
- Balde
- Embudo de vidrio
- 1 empaque de neopreno de diámetro 102 +/- 2 mm por celda.

- **Procedimiento de ensayo**

- Se debe revisar que las mallas acrílicas estén limpias y libres de óxido, de lo contrario limpiar con una lija de papel n°200. También se debe eliminar el óxido de los tornillos y cualquier pieza metálica de los equipos.
- Colocar la malla en la celda asegurándose que el tornillo entre en contacto eléctrico con ésta. Para verificar esto encienda el multímetro y coloque los cables en el tornillo y la malla, el equipo de emitir un sonido y deberá aparecer una línea en la pantalla del dispositivo.
- Colocar los neoprenos sobre las mallas que van en la celda (una con tornillo rojo y la otra con tornillo negro) y el elemento de concreto (húmedo), verificando que no queden espacios visibles entre el caucho y la probeta.
- Colocar en la otra celda el neopreno sobre el elemento de concreto con las mismas precauciones del punto anterior.
- Colocar los tornillos en cada uno de los orificios de las celdas que ya se encuentra armada, apretando fuertemente las tuercas ya que esto garantiza que no haya espacios entre el acrílico y el concreto (máximo 1 mm de espacio).
- Introducir la solución de hidróxido de sodio (NaOH) en la celda que tiene el tornillo rojo (positivo), con ayuda del embudo de vidrio y en la celda del tornillo negro (terminal negativa) la solución de cloruro de sodio (NaCL), sin llenar completamente la celda.
- Verificar que no existen fugas en el sistema.
- Realizar conexiones del sistema. Los cables rojo y negro conectar en la parte posterior de la tarjeta. Los otros extremos conectar en la parte delantera de la fuente.

- El cable negro debe estar conectado a la tarjeta, y el cable rojo una vez se inició el ensayo.
- Encender el estabilizador, el multímetro girándolo hasta el símbolo “V”.
- Encender la fuente y con ayuda del botón de voltaje buscar 60 voltios.
- Encender la tarjeta. Cuando el bombillo verde se encienda, dar inició al ensayo oprimiendo el botón store en el multímetro, y conecte el cable rojo correspondiente. Realizar esta tarea sucesivamente para cada celda cuando se encienda el respectivo bombillo, sin oprimir nuevamente el botón store.
- Una vez se registré el voltaje en el multímetro, tomar la hora correspondiente y dejar el equipo sin tocar ningún botón durante seis horas. Durante este tiempo el equipo almacena la información, registrando las caídas de voltaje.
- Al finalizar el ensayo, se debe esperar que el multímetro registre el último dato. Apagar la fuente y proceder a desmontar el ensayo.

5.3.2. Ensayo Nordtest NT Build 492

Por medio de este ensayo se obtiene un coeficiente de migración de cloruros, y es aplicable a concretos extraídos de estructuras existentes, así como a probetas confeccionadas en laboratorio. El ensayo consiste en someter a un potencial eléctrico a la probeta cilíndrica, obligando a los iones de la solución externa a penetrar el concreto. Una vez se termina el ensayo, la probeta se corta axialmente y se rocía con nitrato de plata el cual reacciona con los cloruros que lograron penetrar, evidenciándose por un precipitado blanco. (M.Barrios, 2016)

5.3.3. Método colorimétrico por aspersión de Nitrato de Plata.

Existen métodos para determinar el nivel de carbonatación en el concreto por medio de la aplicación de fenolftaleína, el cual es rápido y se puede aplicar en campo. Sin embargo para establecer el nivel de afectación del concreto por los iones cloruros, no se habían desarrollado ensayos rápidos y de bajo costo, hasta el uso de nitrato de plata (AgNO_3) por aspersión.

La aspersión por nitrato de plata ya se usa como parte de otro ensayo (ASTM C 1202/05), pero también puede ser usada en campo para determinar rápidamente el perfil de ion cloruro en el concreto. Se debe extraer una muestra y cortarla en rebanadas para aplicar la aspersión del nitrato de plata (AgNO_3 solución recomendada es de 0,1 M), generando dos regiones en el concreto por precipitado blanco que indica la presencia de iones cloruros y otra región de color marrón, que corresponde a la región libre de cloruros.

Las limitaciones del método están relacionadas principalmente con la presencia de carbonatos en el concreto y por consiguientes la disminución del pH de la pasta, que afecta la reacción química que genera el cambio de color por aspersión de nitrato de plata. El ensayo también es afectado por la concentración del nitrato de plata y el nivel de contaminación de la muestra.

Algunos autores (JUCA 2002) recomiendan la realcalinización del material cementicio antes de iniciar el ensayo por aspersión de nitrato de plata, ya que podría resultar en un falso positivo aun cuando no haya presencia de iones cloruros en el concreto. (Juca, 2015).

5.4. MECANISMOS MITIGACIÓN IÓN CLORURO.

5.4.1. Diseño de mezcla.

Un adecuado proporcionamiento de los materiales y el cumplimiento de los requisitos normativos relacionados con la durabilidad, proporcionan una herramienta poderosa para mitigar el ataque de los diferentes agresores del medio, incluidos los iones cloruro. Los requisitos normativos se enfocan en reducir la permeabilidad del concreto para disminuir el ingreso de los agentes agresores, y la forma más efectiva de realizarlo es usando bajas relaciones a/mc. Además de limitaciones en la relación a/mc, los requisitos normativos especifican cantidades mínimas de

cemento, resistencias a la compresión mínimas, incorporación de aire y uso de cementos especiales.

Los constituyentes del concreto también aportan cloruros, por lo cual se debe prestar especial atención a que no se supere la concentración máxima de 0,15% en relación al peso del cemento.

El uso de cementos con elevados contenidos de aluminatos C3A y C4AF disminuye las lesiones generadas en el acero y el concreto por los iones cloruros, ya que estos componentes hidratados tienen la capacidad de enlazar químicamente los cloruros formando cloroaluminatos (Sal de Friedel).

5.4.2. Calidad del concreto.

La presencia de fisuras en el concreto aumenta la velocidad de ingreso de los iones cloruro y otros agentes agresores, limitando el espesor a 0,2 mm. Otro aspecto que determina la vulnerabilidad del acero a la corrosión en el concreto es el recubrimiento, estudios han demostrado que aun usando relaciones a/c tan bajas como 0.30 se encuentran manifestaciones de corrosión al usar recubrimientos de 25 mm (Marusin y Pfeifer 1985). El recubrimiento que se usa bajo condiciones agresivas de ion cloruro es de 75 mm y mucho más si las condiciones del proyecto lo requieren.

Las buenas prácticas constructivas también determinan la vulnerabilidad del elemento a los ataques de los agentes agresores, usando concretos con un asentamiento adecuado, procesos de colocación y consolidación correctos y fundamentalmente un curado del elemento intenso durante siete días como mínimo.

En cuanto al diseño estructural y arquitectónico del elemento se debe prestar principal atención a las zonas sometidas a ciclos de humedecimiento y secado, así como drenar rápidamente el agua y evitar lo estancamientos, ya que uno de los requisitos para el inicio de los procesos de corrosión en la presencia de humedad.

5.4.3. Barreras protectoras

Se han desarrollado diferentes métodos para mitigar y eliminar las lesiones asociadas a la corrosión de las armaduras. Los más usados son:

- Concreto modificado con capas de látex.

- Aceros de refuerzo recubiertos con epoxi
- Uso de membranas impermeables.
- Protección catódica.
- Uso de barreras para disminuir la permeabilidad en la superficie (siloxanos, epoxis, poliuretano, metacrilatos y silanos)

5.4.4. Aditivos inhibidores de corrosión.

Son adicionados al concreto durante el mezclado con dosis de 10 a 30 l/m³, incrementando el estado de la capa pasivadora del acero embebido. Se ha demostrado que son efectivos tanto para los ataques por ion cloruro (picadura) y por carbonatación.

Los materiales más usados para fabricar estos aditivos están basados en nitrito de calcio, amino alcoholes y fosfatos. Para el caso de los aditivos basados en nitrito de calcio se ha demostrado su éxito durante más de 50 años de historia.

El mecanismo de acción de los aditivos inhibidores de corrosión basados en nitrito de calcio convierte el óxido ferroso de la capa pasivadora en óxido férrico, el cual es más estable y menos reactivo. Cuando los iones cloruro hacen contacto con el óxido férrico de la capa pasivadora la reacción no ocurre, protegiendo principalmente los sitios de la corrosión anódica.

5.5. EJEMPLOS DE PACIENTES.

La NTC 5551 diferencia los niveles de exposición a cloruros inducidos por el agua de mar y diferentes al agua de mar. Algunos ejemplos de estructuras sometidas a este agente agresor del concreto son:

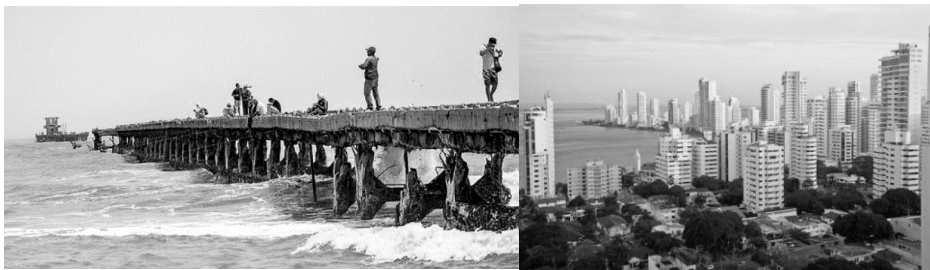


Figura 11. Puerto Colombia. Cartagena de Indias. Cloruros por agua de mar

Fuente: El Herald. El espectador

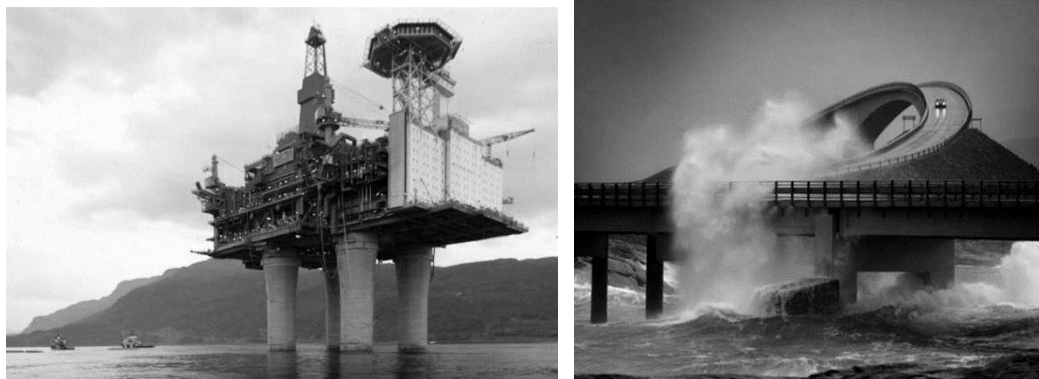


Figura 12. (a) Plataforma petrolera en Noruega; (b) Puente Storseisundet Noruega. Cloruros por agua de mar

Fuente: (a) Breakbulk. (b) Storseisundet Bridge

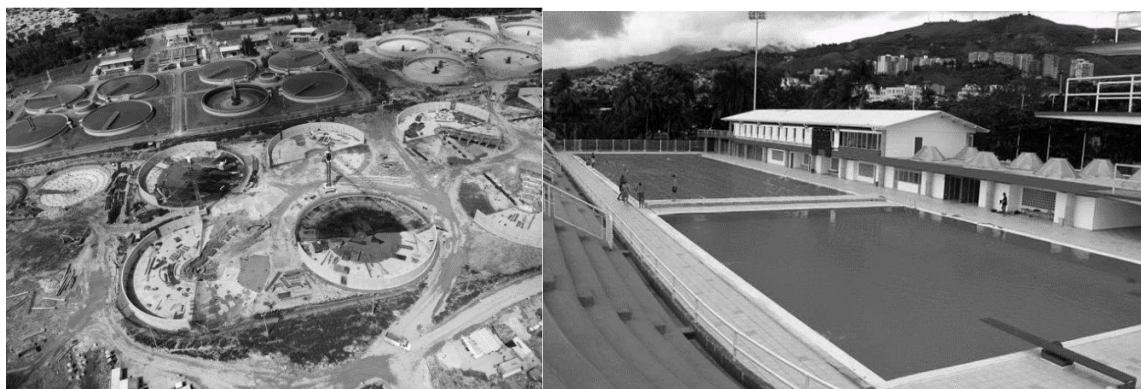


Figura 13. (a) Planta PTAR El Salitre Bogotá; (b) Piscinas. Cloruros diferentes aguas de mar

Fuente: Izquierda: Cemex. Derecha: Alberto Galindo Cali.



Figura 14. (a) Sales descongelantes Pavimentos; (b) Pisos Industriales

Fuente: Izquierda: Bozeman road dust control Derecha: Shutterstock

Es claro que el concreto no debe estar necesariamente cerca a las costas marítimas para estar sometido a la agresión del ion cloruro. Es necesario una correcta consideración de todos los factores, el microclima y por lo tanto los agentes agresores del concreto para diseñar con criterios de durabilidad.

5.6. CENIZA VOLANTE.

El uso de cenizas volantes en el concreto no es un material novedoso en la industria de la construcción y particularmente en el sector de concreto premezclado. Por el contrario, ya se cuentan con varias décadas de experiencia alrededor del mundo con este material, que ha demostrado los múltiples beneficios que tiene a nivel técnico, económico y ambiental comparado con un concreto cuya aglutinante es 100% cemento hidráulico.

Las cenizas volantes son un subproducto de la combustión del carbón en plantas generadoras de electricidad. Se componen en gran parte de impurezas del carbón como la arcilla, feldespato, cuarzo y esquisto que se enfrían y solidifican para conformar un material vitreo llamado ceniza volante. Las especificaciones de la ceniza volante usada como material cementante suplementario, se encuentran en la ASTM C 618 como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 8. Propiedades cenizas volante

Propiedad	ASTM C618	
	Clase F	Clase C
Finura (% min pasa tamiz 45µm)	66	66
Humedad (% max)	3.0	3.0
Pérdida ignición (%max)	6.0	6.0
Sulfatos (% max)	5.0	5.0
Resistencia (% min)	75	75

Fuente: ASTM C 618

Las cenizas clase C se caracterizan por contener altos contenidos de calcio (10 a 30% de CaO) por lo cual tiene propiedades hidráulicas y puzolánicas, por el contrario las cenizas clase F son materiales puzolánicos principalmente por sus bajos contenidos de calcio (menos del 10% de CaO).

5.6.1. Ventajas Técnicas

Es importante la clasificación, y por lo tanto propiedades físicas y químicas de la ceniza volante que se está usando en el concreto. Pero en la mayoría de los casos la ceniza volante proporciona al concreto un mejor desempeño en estado fresco y endurecido. En estado fresco se pueden mencionar mejoras en la estabilidad de la mezcla disminuyendo considerablemente la exudación y segregación del material, disminución de los contenidos de aire de la mezcla, menor calor de hidratación y por lo tanto un mejor sostenimiento en el tiempo de la fluidez entre otras propiedades.

Una vez el concreto endurece afecta las resistencias iniciales en mayor medida para las cenizas clase F, pero las resistencias a 28 días y edades posteriores son mayores comparadas con un concreto dosificado al 100% de cemento hidráulico. Esto se debe a que la ceniza volante reacciona con el hidróxido de calcio (producto de hidratación del cemento hidráulico) para formar gel CSH, el cual es el responsable de la resistencia mecánica del material. Pero no solo la resistencia es afectada positivamente, la durabilidad del material se mejora por los múltiples beneficios que proporciona la ceniza volante, como la disminución de la permeabilidad y por lo tanto el menor ingreso de sustancias agresoras del concreto (ion cloruro, sulfatos, CO₂, agua entre otros). Además, en el caso de los cloruros la ceniza volante tiene la capacidad de enlazar químicamente estas sustancias por sus altos contenido de alúmina dejando una menor proporción de cloruros libres en el concreto. Históricamente y de acuerdo a la experimentación el reemplazo de cemento por ceniza volante está en un 15% para concretos convencionales, aunque puede llegar a ser del 30% o más en concretos especiales.

5.6.2. Ventajas Económicas y Ambientales

La fabricación de cemento hidráulico implica la explotación de material en grandes volúmenes y el consumo de enormes cantidades de energía, por lo tanto, la huella de carbono de este material es considerable. Es evidente que, al usar un subproducto o residuo de otra industria como la ceniza volante, se está contribuyendo con el medio ambiente. Además, de obtener beneficio económico y precios más competitivos de los concretos en el mercado, al reemplazar un porcentaje del cemento con un material de menor valor.

6. METODOLOGIA

Dentro del estudio del concreto como paciente de evaluación, enmarcado en la patología preventiva, se contemplan realizar ensayos a escala de laboratorio bajo condiciones controladas con el objetivo de contrastar las especificaciones de la norma y corroborar su cumplimiento bajo la acción de agentes agresores.

- Caracterización de materias primas
- Definición teórica de diseños de mezcla
- Elaboración de muestras a escala de laboratorio
- Falla de cilindros a compresión (28 días)
- Ensayo rápido para determinar permeabilidad ion cloruro
- Ensayo colorimétrico y análisis
- Análisis de resultados

Para lo cual, en primera instancia se realizó el planteamiento teórico de los diseños de mezcla teniendo en cuenta los materiales y la caracterización de cada uno de estos, se plantearon pruebas con diferentes relaciones agua material cementante, adicionalmente se realizó una mezcla con adición de ceniza y otra con un aditivo inhibidor de corrosión. Una vez se estaba vaciando el concreto para la elaboración de cilindros se introdujo una varilla corrugada a un centímetro de distancia del borde del cilindro, esto con el fin de evaluar el potencial de corrosión que generaría la varilla en la matriz de concreto bajo una solución de cloruro de sodio.

Seguidamente se midió la permeabilidad de ion cloruro de cada uno de los especímenes y por último se tomó un cilindro de cada muestra y se cortó transversalmente para aplicar nitrato de plata el transporte de los cloruros a lo largo de la matriz de concreto.

6.1. Caracterización de materias primas

Para la ejecución de los diseños de mezclas se trabajaron con las siguientes materias primas, en donde se tuvo especial atención en los agregados y sus propiedades físicas, en el material cementate y los aditivos. A continuación, se presentan los diferentes materiales usados en los ensayos, así como los reportes de calidad de cada uno de estos.

Tabla 9. Normas técnicas colombianas para materias primas de concreto

Materias Primas		
Cemento	Tipo ART (Alta resistencia temprana)	NTC 121
Agregados	Arena (Fuente Guamo)	NTC 174
	Grava 1" (Villavicencio)	NTC 174
Aditivos	Plastificante, Superplastificante e Inhibidor de corrosión	NTC 1299

Fuente: Elaboración propia

6.1.1. Reporte de calidad cemento – ART

El cemento usado para las pruebas es el que según la NTC 121 se define como ART (alta resistencia temprana), este material se caracteriza por su desarrollo rápido de resistencias a edades iniciales (1 y 3 días), en seguida los análisis físicos.

Tabla 10. Reporte de calidad cemento

Parámetro	Método de Ensayo	Especificación NTC 121	Resultado
Superficie Especifica Blaine (m ² /kg)	NTC 33	No Especifica	362
Finura Retenido Tamiz 325 (%)	NTC 294	No Especifica	4.5
Cambio de Longitud por Autoclave (%)	NTC 107	Menor a 0.80	Análisis en Proceso
Tiempo de Fraguado Inicial Mínimo (minutos)	NTC 118	Mayor a 45	120
Tiempo de Fraguado Inicial Máximo (minutos)		Menor a 420	172
Contenido de Aire en Mortero (%)	NTC 224	Menor a 12	6.6
Resistencia a la Compresión a 1 día (MPa)	NTC 220	Mayor a 11	17.0
Resistencia a la Compresión a 3 días (MPa)		Mayor a 22	29.8
Resistencia a la Compresión a 7 días (MPa)		No Especifica	34.4
Resistencia a la Compresión a 28 días (MPa) *		No Especifica	40.5
Expansión de Barra de Mortero a 14 días (%) *	NTC 4927	Menor a 0.02	0.0198

Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Reporte de calidad arena gruesa

La arena utilizada es de río, cumple propiedades de la NTC 174 y es apta para la producción de concreto, su granulometría es continua, presenta baja absorción y su módulo de finura esta en 3,14. (ICONTEC, 2000)

Tabla 11. Reporte de calidad arena

ARENA GRUESA	GRADACION (% PASA)	
	TAMIZ ESTANDAR	RESULTADOS
	1/2"	100,0%
	3/8"	100,0%
	No. 4	96.3%
	No. 8	73.9%
	No. 16	53.8%
	No. 30	38.5%
	No. 50	18.3%
	No. 100	5.7%
	No. 200	2.9%
	Densidad Aparente	2.63
	Absorción	1.17%
	Materia Orgánica	1
	Modulo de Finura	3,14
	Masas unitarias Sueltas (Kg/m ³)	1706
	Masas unitarias Compactas (Kg/m ³)	1815
	Equivalente de Arena	87.0%
	Terrones de Arcilla y Partículas Deleznables	0.55%
	Valor de Azul de Metileno (mg/g)	1.9

Fuente: Elaboración propia

6.1.3. Reporte de calidad grava TMN 12,5 mm

La grava igualmente es de rio, presenta granulometría continua, su tamaño máximo nominal es de ½" y cumple con los parámetros de la NTC 174 para la producción de concreto.

Tabla 12. Reporte de calidad grava de 12,5 mm

GRAVA TMN 1/2"	GRADACION (% PASA)	
	TAMIZ ESTANDAR	RESULTADOS
	3/4"	100,0%
	1/2"	96.0%
	3/8"	63.1%
	No. 4	3.2%
	No. 8	0.6%
	Lavado Tamiz 200	0.1%
	Densidad Aparente	2.63
	Absorción	1.06%
	Desgaste en Máquina de los Ángeles	17.6%
	Desgaste en MicroDeval	13.9%
	Caras Fracturadas	81.1%
	Perdida de ensayo Solidez	3.9%
	Terrones de Arcillas y Partículas deleznables	0.2%
	Índice de Aplanamiento	20.9%
	Índice de Alargamiento	22.1%

Fuente: Elaboración propia

6.2. Definición teórica de los diseños de mezcla

El diseño de mezcla base usado para las pruebas es un concreto de resistencia nominal a compresión de 21 Mpa a 28 días, con grava de tamaño máximo nominal de 12.5mm, para la mayoría de las mezclas el asentamiento de diseño fue 15 cm, para la mezcla 3 cuya relación agua cemento fue 0,3 se especificó la fluidez por extensión (65 cm).

Tabla 13. Descripción mezclas de prueba

Mezcla	Relación A/C
N°1 (Testigo)	0,65
N°2	0,45
N°3	0,30
N°4 (Ceniza Volante)	0,65
N°5 (Inhibidor corrosión)	0,65
N°6 (mayor contenido cemento)	0,65

Fuente: Elaboración propia

6.3. Elaboración de muestra a escala de laboratorio

Los 6 diseños de mezcla se realizan en el mismo día, esto se lleva a cabo en un laboratorio especializado que cuenta con todos los equipos (trompo, balanzas, presa hidráulica y demás herramienta menor), los equipos se encuentran calibrados.

6.3.1. Alistamiento de agregados

Como primera medida se alistan los agregados en el laboratorio desde el día anterior, se saturan con agua previamente y se dejan cubiertos con lonas para evitar la evaporación del agua. En día de ejecución de los ensayos se realiza la homogenización del material, en este procedimiento se mezcla el agregado nuevamente.



Figura 15. Alistamiento de materiales

Fuente: Elaboración propia

6.3.2. Toma de humedades

Una vez homogéneo el material se toman muestras representativas para calcular la cantidad de agua que tiene el agregado, se calcula la humedad del material en porcentaje y este valor se usa para hacer la respectiva corrección por humedad en el diseño de mezcla.

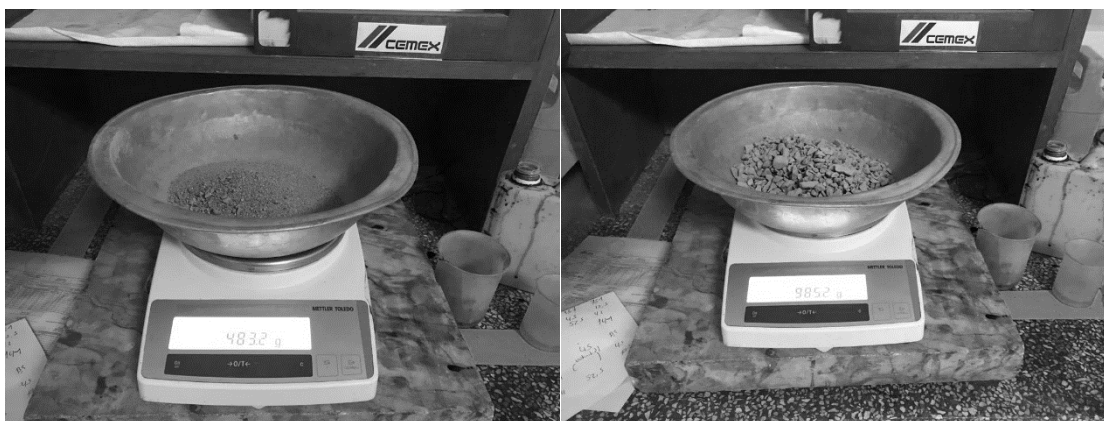


Figura 16. Determinación de humedades de agregados

Fuente: Elaboración propia

6.3.3. Pesaje de las materias primas

Se calcula el diseño de mezcla para 30 litros teniendo en cuenta la corrección por humedad se procede a pesar y alistar cada uno de los materiales a utilizar.

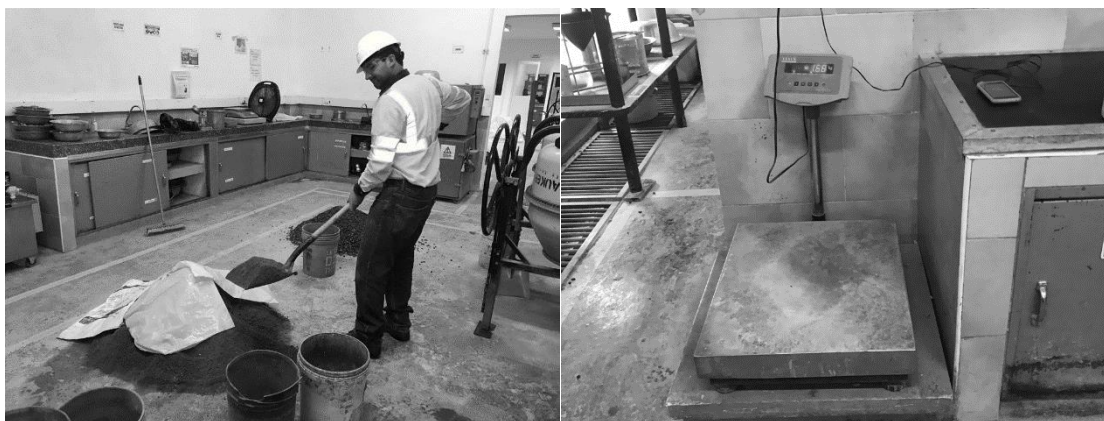


Figura 17. Pesaje de materias primas

Fuente: Elaboración propia

6.3.4. Mezcla en equipo mecánico

Teniendo los materiales pesados se procede a dosificarlos en el trompo mezclador teniendo en cuenta la siguiente secuencia:

- 70% del agua de diseño
- 100% de arena y grava
- Se deja mezclar por 1 minuto
- 100% del material cementante y se deja mezclar por 1 minutos
- 30% del agua de diseño
- Adición de aditivo plastificante y se deja mezclar por 3 minutos
- Adición de aditivo superplastificante y se deja mezclar por 5 minutos
- Adición de aditivo inhibido de corrosión (Mezcla 4)

Una vez se llega al asentamiento se procede a tomar el asentamiento según NTC 396.



Figura 18. Elaboración concreto. (a) Mezcladora mecánica, (b) ensayo de asentamiento

Fuente: Elaboración propia

6.3.5. Elaboración de especímenes cilíndricos

Teniendo en cuenta NTC 454 se elaboran los cilindros en una superficie plana y libre de vibraciones, allí se dejan para ser desencofradas a las 24 +/- 8 horas, estos especímenes se elaboran en moldes metálicos. Adicionalmente a cada muestra se le coloca una varilla corrugada a 1 cm de borde. Una vez desencofrados se dejan en curado en una pileta con temperatura controlada y son retirados solo para su correspondiente falla compresión. (ICONTEC, 1998).



Figura 19. (a) Toma de asentamiento y (b) elaboración de especímenes de concreto

Fuente: Elaboración propia

6.3.6. Mezcla 1, relación agua material cementante 0,65

El primer diseño de mezcla a evaluar es el correspondiente a una relación agua material cementante de 0,65 este diseño se caracteriza por tener una proporción de agregados de 55% de arena y 45% grava, con esto se consigue compacidad en la mezcla, con los aditivos que se adicionaron a la mezcla se consigue el asentamiento de diseño 6". El concreto presenta buen aspecto.

Tabla 14. Diseño de mezcla A/MC 0,65

Mezcla	Descripción	Cemento (kg/m³)	Ceniza (kg/m³)	Agua diseño (lt/m³)	A/C	Grava 1/2" (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Plastificante Litros / (%)		Super Plastificante Litros / (%)	
1	Relacion A/C 0,65	300	-	195	0,65	794	1010	1,33	0,50%	0,68	0,25%

Fuente: Elaboración propia

6.3.7. Mezcla 2, relación agua material cementante 0,45

El segundo diseño de mezcla a evaluar es el correspondiente a una relación agua material cementante de 0,45 este diseño se caracteriza por tener una proporción de agregados de 55% de arena y 45% grava, con esto se consigue compacidad en la mezcla, con los aditivos que se adicionaron a la mezcla se consigue el asentamiento de diseño 6". El concreto presenta buen aspecto.

Tabla 15. Diseño de mezcla A/MC 0,45

Mezcla	Descripción	Cemento (kg/m³)	Ceniza (kg/m³)	Agua diseño (lt/m³)	A/C	Grava 1/2" (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Plastificante Litros / (%)		Super Plastificante Litros / (%)	
2	Relacion A/C 0,45	350	-	158	0,45	817	1040	1,55	0,50%	1,27	0,40%

Fuente: Elaboración propia

6.3.8. Mezcla 3, relación agua material cementante 0,3

El tercer diseño de mezcla a evaluar es el correspondiente a una relación agua material cementante de 0,3 este diseño se caracteriza por tener una proporción de agregados de 60% de

arena y 40% grava, con esta proporción de agregados se consigue un diseño especificado por extensión (65 cm de asentamiento), este tipo de diseño de mezcla requieren alta dosis de aditivo superplastificante para lograr el asentamiento y por otro lado su aspecto es muy cohesivo.

Tabla 16. Diseño de mezcla A/MC 0,3

Mezcla	Descripción	Cemento (kg/m³)	Ceniza (kg/m³)	Agua diseño (lt/m³)	A/C	Grava 1/2" (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Plastificante Litros / (%)		Super Plastificante Litros / (%)	
3	Relacion A/C 0,3	470	-	140	0,30	714	1071	-	-	8,55	2,00%

Fuente: Elaboración propia

6.3.9. Mezcla 4, relación agua material cementante 0,65 con adición de ceniza

El cuarto diseño de mezcla a evaluar es el correspondiente a una relación agua material cementante de 0,65 en esta ocasión se adiciona 15% de ceniza con respecto al material cementante total (cantidad en la cual experimentalmente se ha demostrado su buen desempeño en mezclas de concreto) este diseño se caracteriza por tener una proporción de agregados de 55% de arena y 45% grava, con esto se consigue compacidad en la mezcla, con los aditivos que se adicionaron a la mezcla se consigue el asentamiento de diseño 15 cm. El concreto presenta buen aspecto.

Tabla 17. Diseño de mezcla A/MC 0,65 más adición de ceniza

Mezcla	Descripción	Cemento (kg/m³)	Ceniza (kg/m³)	Agua diseño (lt/m³)	A/C	Grava 1/2" (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Plastificante Litros / (%)		Super Plastificante Litros / (%)	
4	Relacion A/C 0,65 + Adicion Ceniza	255	45	195	0,76	785	999	1,33	0,50%	0,69	0,25%

Fuente: Elaboración propia

6.3.10. Mezcla 5, relación agua material cementante 0,65 con adición de aditivo inhibidor de corrosión

El quinto diseño de mezcla a evaluar es el correspondiente a una relación agua material cementante de 0,65 en esta ocasión se aditivo inhibidor de corrosión a una dosis de 1% (con

respecto al material cementante) este diseño se caracteriza por tener una proporción de agregados de 55% de arena y 45% grava, con esto se consigue compacidad en la mezcla, con los aditivos que se adicionaron a la mezcla se consigue el asentamiento de diseño 15 cm. El concreto presenta buen aspecto.

Tabla 18. Diseño de mezcla A/MC 0,65 más adición de aditivo inhibidor de corrosión

Mezcla	Descripción	Cemento (kg/m³)	Ceniza (kg/m³)	Agua diseño (lt/m³)	A/C	Grava 1/2" (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Plastificante Litros / (%)		Super Plastificante Litros / (%)		Inhibidor de Corrosion Litros / (%)	
5	Relacion A/C 0,65 + Aditivo Inhibidor de Corrosion	300	-	195	0,65	791	1007	1,33	0,50%	0,68	0,25%	2,22	1,00%

Fuente: Elaboración propia

6.3.11. Mezcla 6, relación agua material cementante 0,65 mayor contenido de cemento

El ultimo diseño de mezcla a evaluar es el correspondiente a una relación agua material cementante de 0,65 en esta ocasión se adiciona mayor cantidad de pasta (cemento + agua) este diseño se caracteriza por tener una proporción de agregados de 55% de arena y 45% grava, con esto se consigue compacidad en la mezcla, con los aditivos que se adicionaron a la mezcla se consigue el asentamiento de diseño 15 cm. El concreto presenta buen aspecto.

Tabla 19. Diseño de mezcla A/MC 0,65 mayor contenido de cemento

Mezcla	Descripción	Cemento (kg/m³)	Ceniza (kg/m³)	Agua diseño (lt/m³)	A/C	Grava 1/2" (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Plastificante Litros / (%)		Super Plastificante Litros / (%)	
6	Relacion A/C 0,65 + Mayor cuantia de cemento	350	-	226	0,65	740	942	1,55	0,50%	0,32	0,10%

Fuente: Elaboración propia

6.4. Resistencia a compresión.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de la resistencia a compresión de las mezclas fabricadas en laboratorio:

Tabla 20. Resultados de resistencia a la compresión

Resistencia compresión MPa				
Mezcla	a/mc	3 d	14 d	28 d
N°1	0,65	19,6	31,3	32,8
N°2	0,45	37,6	47,6	54,6
N°3	0,30	48,8	59,2	68,4
N°4	0,65	14,6	25,6	29,8
N°5	0,65	23,3	34,8	37,4
N°6	0,65	17,6	29,7	33,3

Fuente: Elaboración propia

En la figura 20 se aprecia la curva de evolución de resistencia de cada una de las muestras evaluadas.

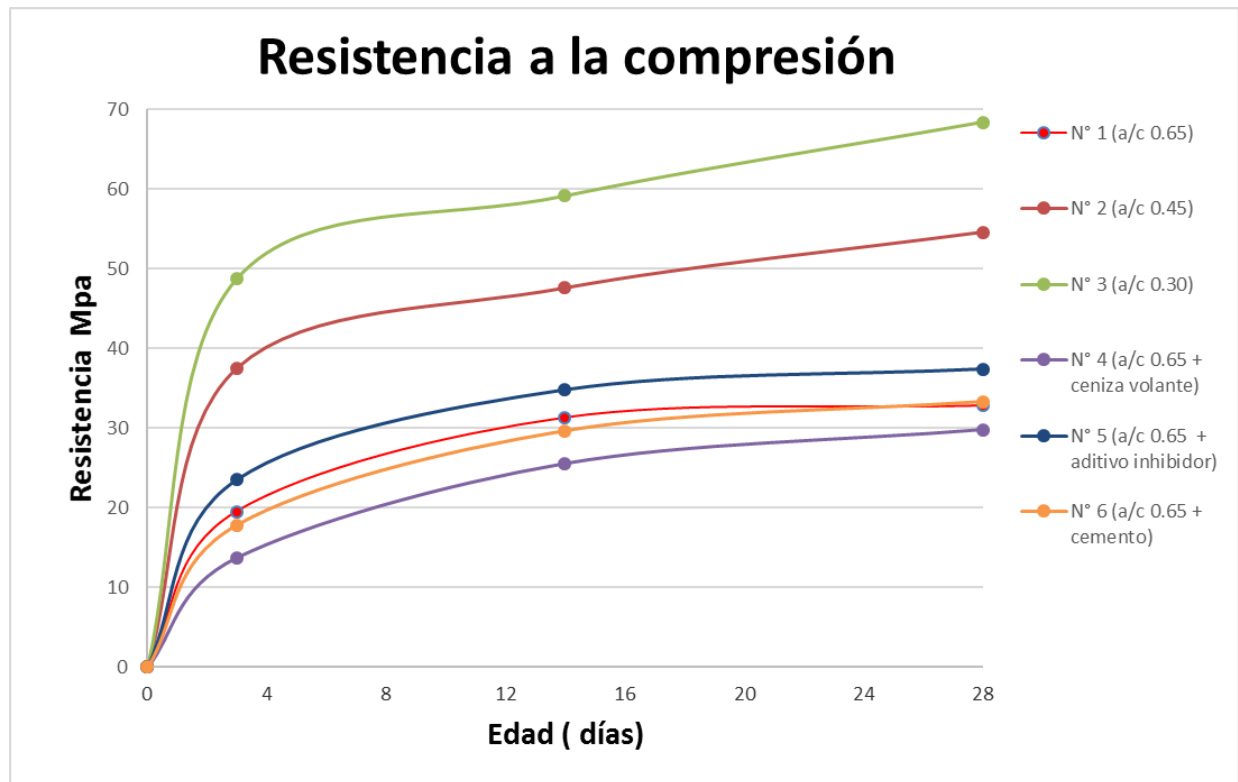


Figura 20. Resistencia a la compresión

Fuente: Elaboración propia

6.5. Permeabilidad Ion cloruro. RCPT

Se enviaron las probetas a un laboratorio certificado para que realizará el ensayo de permeabilidad Ion cloruro de acuerdo a lo establecido por la ASTM C1202. A continuación, se presentan algunas fotografías del proceso de adecuación de las muestras y del ensayo:



Figura 21. Corte y aserrado de las probetas

Fuente: Elaboración propia



Figura 22. Impermeabilización de cilindros.

Fuente: Elaboración propia

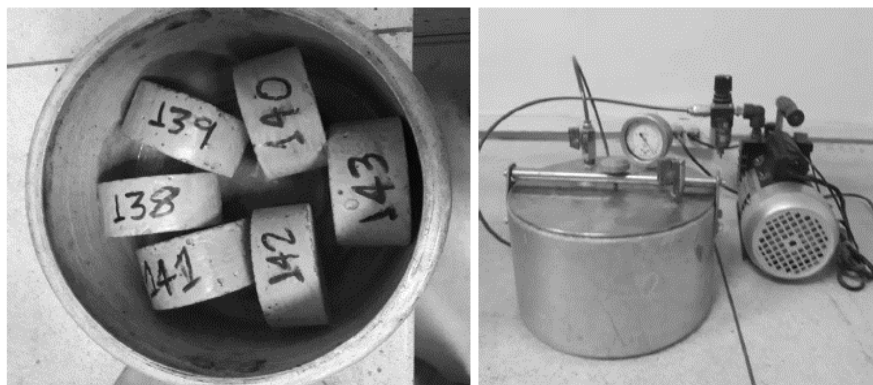


Figura 23. Contenido de vacíos.

Fuente: Elaboración propia



Figura 24. Adición de solución de hidróxido de sodio y cloruro de sodio.

Fuente: Elaboración propia

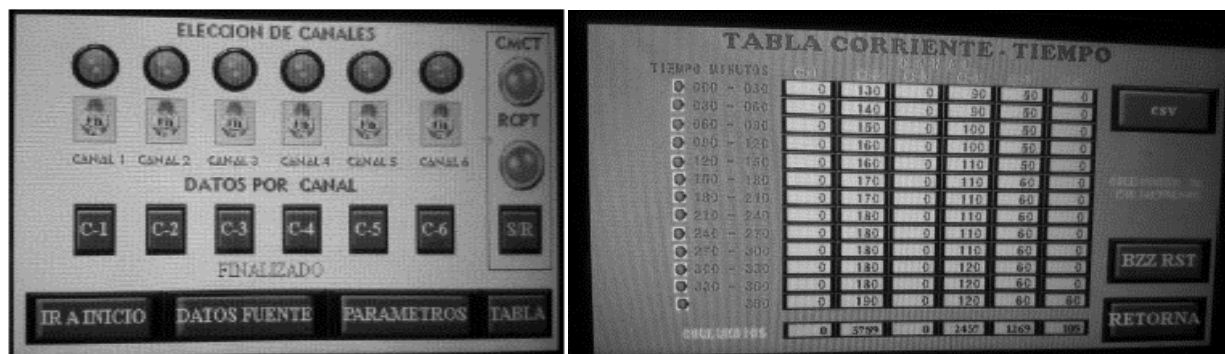


Figura 25. Configuración de software y resultados en Coulombs.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Permeabilidad ion cloruro ASTM C 1202 (calificación en función de la carga)

Carga promedio que pasa (Coulomb)	Permeabilidad ión cloruro
>4000	Alta
2000 - 4000	Moderado
1000 - 2000	Baja
100 - 1000	Muy baja
<100	Despreciable

Fuente: ASTM C1202

Tabla 22. Resultados de ensayo de permeabilidad

Permeabilidad a Ion cloruro ASTM C 1202			
Mezcla	a/mc	Carga promedio (coulomb)	Permeabilidad ion cloruro
N°1 (Testigo)	0,65	3789	moderado
N°2	0,45	2457	Moderado
N°3	0,30	1269	Bajo
N°4 (+ ceniza volante)	0,65	2250	Moderado
N°5(+ inhibidor corrosión)	0,65	5150	Alto
N°6 (+ cemento)	0,65	2801	moderado

***resultados 35 días**

Fuente: Elaboración propia

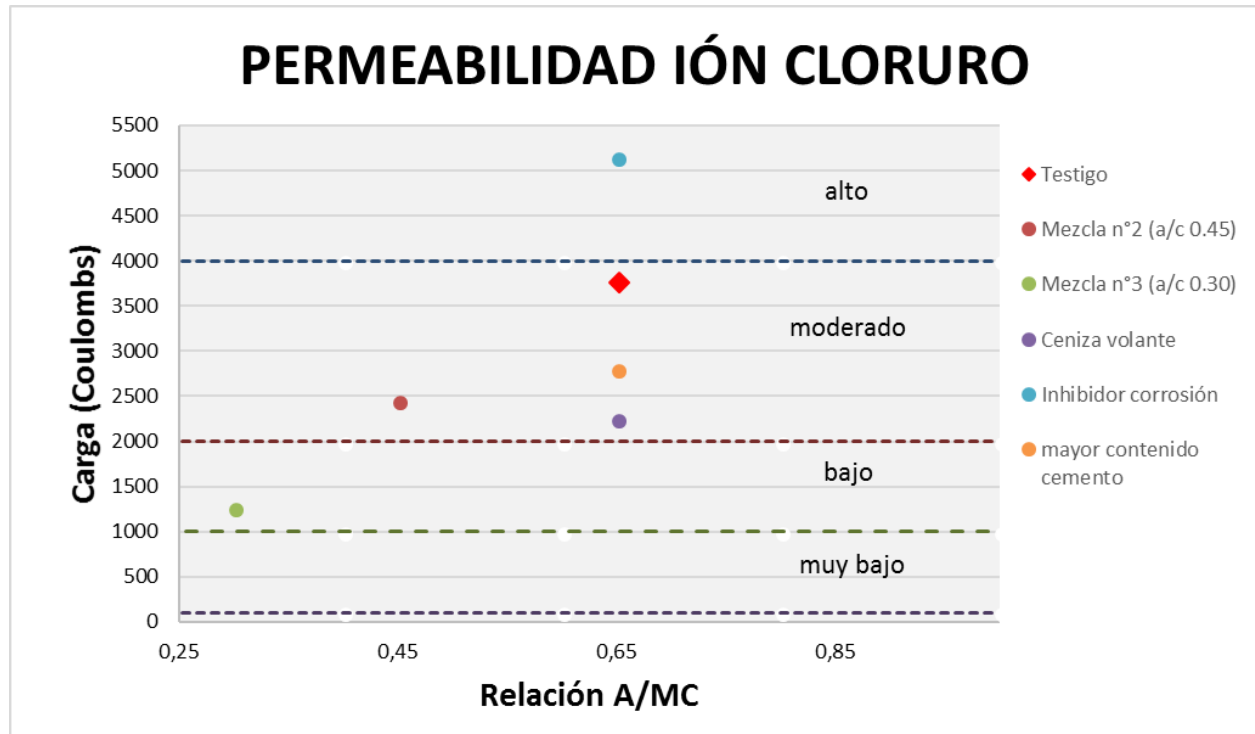


Figura 26. Permeabilidad ion cloruro

Fuente: Elaboración propia

6.6. Especímenes en solución de cloruro de sodio

Una vez se cumplen 28 días de curado, se realizó el ensayo de permeabilidad ion cloruro bajo las especificaciones de la ASTM C1202-12 con el objetivo de evaluar los efectos que tienen las variaciones de los constituyentes del concreto en esta propiedad. Para evaluar la corrosión los cilindros con la varilla son sometidos a una solución de 80 g/litro de cloruro de sodio por 28 días, el nivel del agua se deja a aproximadamente 1 cm para que no entre en contacto directo con la varilla corrugada. Además, para someter la probeta a condiciones más agresivas el recubrimiento de la varilla corrugada fue de 1 cm.



Figura 27. Preparación de probetas en solución

Fuente: Elaboración propia



Figura 28. Probetas en ensayo

Fuente: Elaboración propia

6.7. Ensayo Colorimétrico.

Después de someter las probetas con la varilla de acero corrugado a condiciones agresivas de ion cloruro durante 28 días, se cortan transversalmente los cilindros para realizar una inspección visual y ejecutar el ensayo colorimétrico para determinar el avance del ion cloruro en el concreto.

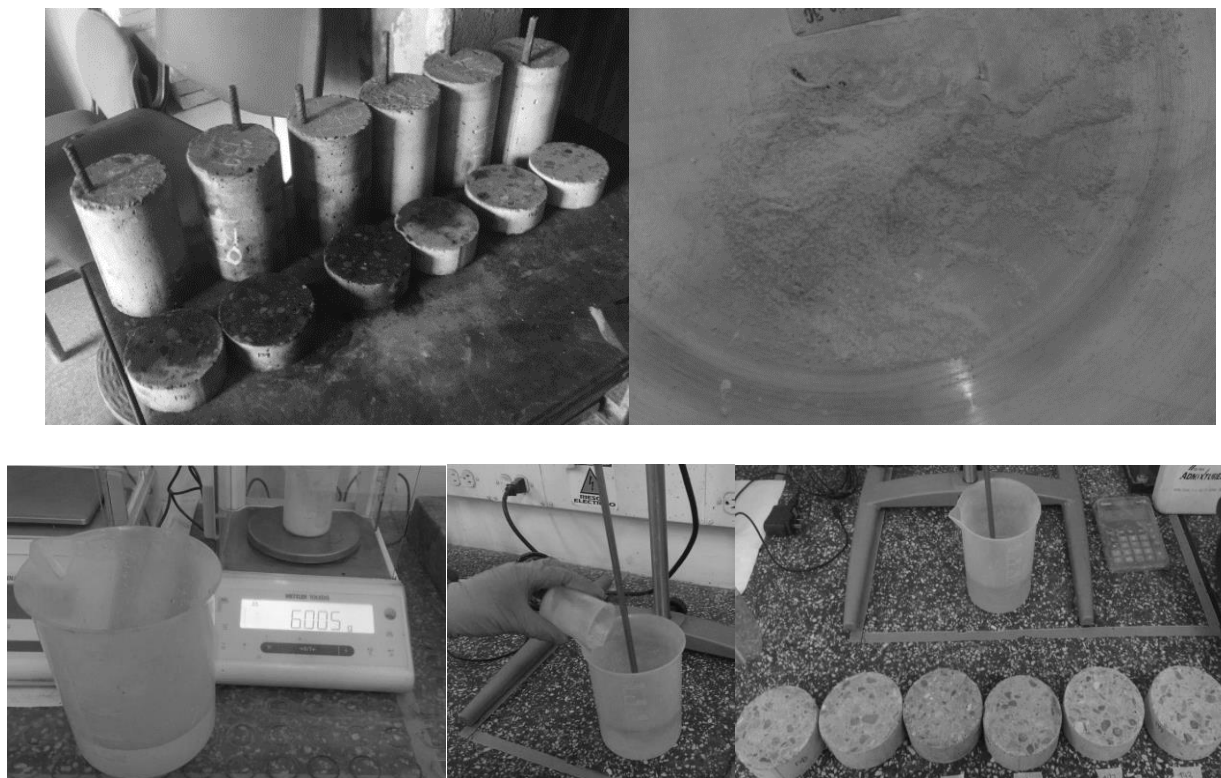


Figura 29. Corte de cilindros y alistamiento de probetas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Descripción de probetas de ensayo

Mezcla
138 (Testigo a/c 0,65)
139 (a/c 0,45)
140 (a/c 0,30)
141 (adición de ceniza volante y a/mc 0,65)
142 (adición de aditivo inhibidor corrosión a/c 0,65)
143 (mayor cuantía cemento a/c 0,65)

Fuente: Elaboración propia

Se realiza inspección visual de la sección transversal de los cilindros para identificar lesiones o manifestaciones de corrosión por ion cloruro, y se aplica el nitrato de plata por aspersión a una

concentración de 0.1 M aplicando el método colorimétrico para evidenciar el perfil de ion cloruro.

Tabla 24. Ensayo colorimétrico especímenes de concreto

Muestra 138.  No se evidencia productos de corrosión.	 Se generó una región más oscura y de acuerdo al ensayo el perfil de cloruros logró ingresar 14.5 mm en promedio.
Muestra 139  No se evidencian productos de corrosión.	 La región oscura es menor que la de muestra 138, lo que significa que el ingreso de ion cloruro bajo las mismas condiciones fue menor. De acuerdo al promedio de las cuatro medidas tomadas con calibrador, el ingreso del ion cloruro fue de 6.5 mm.

Muestra 140.



No se evidencian productos de corrosión.



Para una relación a/c de 0.30, el ingreso de ion cloruro fue insignificante lo cual confirma los resultados del ensayo RCPT. La única medida registrable fue de tan solo 0.5 mm

Muestra 141.



No se evidencian productos de corrosión.



Con respecto al concreto testigo, la muestra 141 logró una disminución de la penetración del ion cloruro. En promedio el resultado fue de 5,2 mm vs 14.5 mm que obtuvo el control. Se confirman los resultados del ensayo RCPT y la ceniza volante como mecanismo para mitigar la penetración del ion cloruro.

Muestra 142.



Se evidencian productos de corrosión lo que significa el umbral de cloruros en las cercanías de la varilla ya fue superado, eliminando la capa pasivadora del acero e iniciando el ataque por picadura del ion cloruro.



Contrario a lo esperado, la muestra 142 dosificada con aditivo inhibidor de corrosión fue la que mostró mayor nivel de deterioro y manifestaciones de productos de corrosión. En promedio el ingreso del ion cloruro fue de 12,3 mm

Muestra 143.



Se evidencia pequeños productos de corrosión alrededor de la varilla.



El promedio de las cuatro medidas realizadas con calibrador fue de 11.4 mm. Se logró una disminución con respecto al testigo sin embargo se evidencian pequeñas manifestaciones de productos de corrosión

Fuente: Elaboración propia

7. ANALISIS DE RESULTADOS

7.1. Resistencia a la compresión

La evolución de resistencias para la mezcla testigo en la edad de especificación, de acuerdo al comportamiento histórico del cemento, es mayor a lo esperado con un resultado de 32,1 MPa. El efecto de la disminución de la relación a/mc con respecto al testigo es considerable, con una evolución de 53,5 MPa y 67,1 MPa para las mezclas n°2 y n°3 respectivamente, que corresponden a un 166% y 209% más en resistencias con respecto al control.

La mezcla n°4 en donde se usó la misma cantidad de cementante que el control, pero con una adición del 15% de ceniza volante, la evolución de resistencias fue inferior a edades iniciales como se esperaba (35% menos o 6,8 MPa respecto al control), pero también se obtuvo una afectación en la edad de especificación.

La mezcla n°5 se dosifico con un aditivo inhibidor de corrosión, y se puede observar en la gráfica que se obtuvo una mejoría en la evolución de la resistencia en todas las edades evaluadas, en promedio 15% más respecto al control. Los resultados concuerdan con lo establecido por la literatura sobre los aditivos inhibidores de corrosión y sus efectos sobre las propiedades del concreto, específicamente sobre las resistencias establecen que a edades iniciales se aumentan y tardías puede presentarse algún efecto. Esto se debe a que la materia prima de este aditivo también es usada como materia prima en aditivos acelerantes.

La mezcla n°6 (50 kg más en cemento respecto al control) confirma que la resistencia a compresión de un concreto depende principalmente de la relación a/mc y no de la cantidad de cemento que pueda tener el diseño de mezcla, ya que como se puede apreciar en la gráfica la evolución fue similar a la del control.

Por ultimo cabe resaltar que todos los concretos evaluados cumplen el requisito de la resistencia a compresión mínima para el nivel de exposición a cloruros diferentes al agua de mar (nivel exposición 4,2), ya que todos los resultados fueron superiores a 27,4 MPa.

7.2. Permeabilidad ion cloruro

7.2.1. Mezcla N°1 Testigo

Para una relación a/mc de 0.65 y una cantidad de cemento de 300 kg/m^3 se encontró que la permeabilidad al ion cloruro a la edad de ensayo es moderada de acuerdo a la calificación realizada por la ASTM C1202 y la carga promedio obtenida. Si consideramos que el resultado obtenido fue de 3789 coulomb, cercano al límite superior de la calificación, y que la probeta fue elaborada bajo condiciones controladas de laboratorio, es razonable considerar que la producción a nivel industrial de este diseño de mezcla generará resultados superiores y calificaciones de permeabilidad ion cloruro altas.

La norma NTC 5551 establece una cantidad de cemento mínima de 300 kg/m^3 , a/c máxima de 0,55 y $f'c$ de 28 MPa para el caso más favorable de corrosión inducida por cloruros diferentes al agua de mar, calificación o nivel de exposición 4,2. Es claro que el presente diseño de mezcla evaluado no resistiría la penetración de los iones cloruro en las más condiciones favorables, generando lesiones en el acero y el concreto por efecto de la corrosión.

7.2.2. Mezcla N°2 (menor relación a/c)

De acuerdo a la información disponible sobre la permeabilidad del ion cloruro a los concretos, una de las formas de reducir esta propiedad se logra por medio de la densificación de la pasta. Para densificar la pasta se puede reducir la relación a/mc, ya que la hidratación será más uniforme y los espacios dejados por los granos de cemento menores, como resultado se obtiene una pasta menos porosa y más densa incluso con el uso de agregados porosos.

Para el presente caso la relación a/c fue de 0,45, con una carga promedio obtenida de 2457 vs 3789 coulomb que obtuvo la mezcla testigo. Con base en estos resultados, se logró una reducción del 35% en la permeabilidad al ion cloruro al reducir la relación a/c de 0,65 a 0,45.

La calificación que se obtuvo de acuerdo a la tabla 5.2.2 es de permeabilidad moderada al ion cloruro. Si bien la mezcla n°2 cumple con los requisitos de diseño del nivel de exposición 4.2 (caso más favorable), con excepción de la inclusión de aire, la calificación que se obtiene no garantiza que no se presentarán lesiones por corrosión.

7.2.3. Mezcla N°3 (menor relación a/c)

La reducción de la permeabilidad ion cloruro es notable con respecto a la mezcla control. Se logró una reducción de la carga promedio del 67% (1269 vs 3789 coulomb) al cambiar la relación a/c de 0,65 a 0,30. Los resultados obtenidos se deben a la densificación de la pasta, no solo por efecto de la disminución de la relación a/c, también se debe considerar que la mezcla tiene un volumen de pasta mucho mayor que el testigo, ya que los concretos de alta resistencia se deben especificar como autonivelantes por su alta viscosidad.

7.2.4. Mezcla N°4 (materiales cementantes suplementarios. Ceniza Volante)

La adición de materiales cementantes suplementarios como la ceniza volante ha demostrado su efecto positivo en las propiedades del concreto en estado fresco, y principalmente en estado endurecido en la durabilidad del material mitigando el efecto de varios agentes agresores del medio, incluidos los cloruros.

Esto se debe a la disminución de la permeabilidad del concreto como resultado de la densificación de la pasta, ya que la adición de materiales puzolánicos como la ceniza volante se hidratan con productos de hidratación del cemento (hidróxido de calcio Ca(OH)_2), generando CSH a edades tardías y llenando los espacios dejados por la hidratación del cemento. Además, una mezcla con adición de ceniza volante es más resistente a la agresión del ion cloruro con respecto a una mezcla sin adiciones porque contiene un contenido más alto de alúmina que el cemento hidráulico estándar, ofreciendo la capacidad de enlazar químicamente iones y disminuyendo la cantidad de iones cloruro libres, los cuales son los que inician el proceso de corrosión.

La mezcla evaluada reemplazó el 15% del cemento del testigo con ceniza volante, logrando una reducción de la carga promedio del 40% (2250 vs 3789 coulomb), que corresponde a un nivel moderado de permeabilidad ion cloruro, pero muy cercano al límite de calificación bajo. Es importante resaltar que la evaluación se hizo a los 35 días, y de acuerdo a la información disponible (Prueba permeabilidad ion cloruro como índice de la durabilidad de estructuras de Hormigón Cemex) se pueden obtener un resultado óptimo a los 90 días, con una diferencia superior del 20% respecto un ensayo realizado a los 28 días. Estos resultados coinciden con investigaciones realizadas con cenizas volantes del departamento de Boyacá, en el cual se

muestra el efecto positivo que tiene la adición sobre la permeabilidad al ion cloruro (Valderrama, Torres y Mejía 2011, pag 6)

Con base a los resultados obtenidos, es posible obtener calificaciones de permeabilidad ion cloruro bajas con la adición de materiales como la ceniza volante incluso con relaciones a/c mayores a lo especificado por la norma NTC 5551 y NSR 2010, lo cual implica un efecto económico positivo sobre los proveedores de concreto. Además, se logró una mayor reducción de la permeabilidad ion cloruro con la adición del 15% de ceniza volante que con la disminución de la A/C (mezcla n°2 0.45). En la siguiente tabla se presentan los costos del diseño fabricado con precios promedios del mercado:

Tabla 25. Costeo diseños de mezcla

Material	COP/kg	Mezcla 1 (kg)		Mezcla 2 (kg)		Mezcla 4 (kg)	
		cantidad	costo	cantidad	costo	cantidad	costo
Cemento	380	300	114000	350	133000	255	96900
Ceniza	70	-	-	-	-	45	3150
Agua	7	195	1365	158	1106	195	1365
Arena	50	1010	50521	1040	51987	1010	4,947
Grava	50	794	3,695	817	40847	794	39294
Plastificante	3000	1,5	4500	1,75	5250	1,5	5276
Superplastificante	7000	0,75	5250	1,4	9800	0,75	4253
		Total	215330	Total	241989	Total	200405

Fuente: Elaboración propia

Como se evidencia, se puede lograr un mejor desempeño en la permeabilidad ion cloruro con la adición del 15% de ceniza volante que con la disminución de la relación a/c (Mezcla n°4 vs Mezcla n°2), y económicamente representa un ahorro de 41,584 COP/m³ de concreto fabricado. Es necesario que se realicen futuras pruebas que confirmen este desempeño y permitan una reducción de los requisitos de diseño de mezcla cuando se usen adiciones para los niveles de exposición a cloruros.

7.2.5. Mezcla N°5 (Inhibidor de corrosión)

La mezcla corresponde al testigo adicionando un aditivo inhibidor de la corrosión a una dosis del 1.0%. De acuerdo a la información suministrada del aditivo, su principal componente corresponde al nitrito de calcio, materia prima que también es usada en los aditivos acelerantes.

El resultado obtenido fue de 5150 coulomb lo que corresponde a una permeabilidad alta al ion cloruro, lo cual es contraproducente ya que el testigo obtuvo 3789 coulomb (permeabilidad moderada) y la única diferencia entre las mezclas evaluadas es la adición de un aditivo Inhibidor de Corrosión. Es importante aclarar que cuando se hace el ensayo RCPT midiendo la corriente que pasa a través de la muestra se registra el movimiento de todos los iones en la solución del poro (incluido los iones cloruro), además se consulta la información disponible sobre el tema y se encuentra que algunas adiciones y los aditivos inhibidores de corrosión cambian la composición química del agua que se encuentra en los poros proporcionando resultados engañosos en ensayos como el RCPT (Rapid Chloride Permeability Test Canada).

7.2.6. Mezcla N°6 (mayor contenido de cemento)

Por efecto de la densificación de la pasta a partir del aumento del contenido de cemento y agua (garantizar la misma relación a/c), se logró una reducción de la permeabilidad al ion cloruro al pasar de 3789 a 2801 coulomb, lo que representa una reducción del 26%. La mezcla testigo tiene un volumen de pasta de 309 litros y la mezcla n°6 aumentó a 356 litros de pasta (cemento + agua + aire).

7.3. Evaluación de resultados de acuerdo a NTC 5551

A Continuación, se analizan los resultados obtenidos de los ensayos de RCPT a la luz de la norma NTC 5551, para verificar su efectividad y cumplimiento. Se presenta un resumen de los resultados obtenidos y algunas variables del diseño de mezcla:

Tabla 26. Permeabilidad NTC 5551

Mezcla	A/MC	R28 días (Mpa)	Contenido Cementante (kg)	Permeabilidad RCPT (coulomb)
N°1 Testigo	0,65	32,8	300	3789/ moderado
N°2 menor A/C	0,45	54,6	350	2457 / moderado
N°3 menor A/C	0,30	68,4	470	1269 / bajo
N°4 + Ceniza	0,65	30	300	2250 /moderado
N°5 + inhibidor corrosión	0,65	37	300	5150/ alto
N°6 + cemento	0,65	33	350	2801 / moderado

Fuente: Elaboración propia

La normativa actual no especifica validación alguna de la resistencia del concreto a los iones cloruro, de acuerdo al nivel de exposición seleccionado. Sin embargo, es factible considerar que los resultados obtenidos por medio de ensayos como el RCPT u otros califiquen el nivel de permeabilidad como bajo cuando el concreto va a estar sometido a la agresión de los cloruros, ya sean provenientes del mar u otra fuente.

A modo de ejemplo se selecciona un nivel de exposición 4,3 sometido a ciclos de humedecimiento y secado de cloruros diferentes al agua de mar para concreto reforzado. Las especificaciones mínimas de acuerdo a la NTC 5551 del concreto son:

Tabla 27. Requisitos diseños de mezcla

		Clase														
		1	2			3			4			5	6			7
Parámetro	Subclases	1	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3	4,1	4,2	4,3		6,1	6,2	6,3	
Máxima relación a/m.c.	Concreto no reforzado	0,65	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0,45	0,5	0,5	0,45	0,5
Máxima relación a/m.c.	Concreto reforzado	0,65	0,6	0,55	0,5	0,5	0,45	0,4	0,55	0,55	0,45	0,45	0,5	0,45	0,45	0,5
Máxima relación a/m.c.	Concreto preesforzado	0,6	0,6	0,55	0,5	0,5	0,45	0,4	0,5	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,5
Resistencia especificada mínima a compresión MPa		---	24	28	28	28	35	35	28	28	35	31	31	35	35	28
Contenido mínimo de material cementante (kg/m³)	Concreto no reforzado	200	---	---	---	---	---	---	---	---	---	275	275	300	325	275
Contenido mínimo de material cementante (kg/m³)	Concreto reforzado	250	300	300	300	300	325	350	300	320	340	300	325	350	350	300
Contenido mínimo de material cementante (kg/m³)	Concreto preesforzado	275	300	300	300	300	325	350	300	320	340	300	325	350	350	300
Contenido de aire incorporado mínimo (%)									**	**	**	**	**	**	**	
Otros requerimientos													*	*	*	

Fuente: NTC 5551, (ICONTEC, 2007), pág. 9

Las únicas mezclas que cumplen todos los requisitos de la norma NTC 5551 para el nivel de exposición 4,3 (ejemplos pilas puentes placas parqueaderos) son el número 2 y 3. Sin embargo los resultados obtenidos con el ensayo RCPT no fueron satisfactorios para la mezcla n°2 (relación a/c 0,45) ya que el nivel de permeabilidad determinado corresponde a moderado. Incluso la mezcla n°4 obtuvo un mejor resultado en la permeabilidad al ion cloruro que le mezcla n°2 gracias al uso de adiciones, aún con una relación a/c inferior y menor contenido de cementante.

8. CONCLUSIONES

- Se realiza documentación de lesiones generadas en el concreto por efecto de la corrosión del acero, así como la forma en que se genera la reacción química y los medios en que se transporta los iones de cloruro al interior de la matriz de concreto.
- Se comprueba que los concretos con relaciones a/c de 0,65 (100% cemento) no ofrecen la capacidad de resistir la agresión de los iones cloruro, ya que el resultado que se obtuvo del ensayo RCPT fue de 3789 coulomb, lo que corresponde a una permeabilidad moderada.
- Si bien la norma NTC 5551 y la NSR 2010 no especifican un nivel de permeabilidad a los iones cloruro, se presume que el resultado que se debe obtener por medio del ensayo RCPT debe calificar el concreto como permeabilidad baja. De acuerdo a lo anterior un concreto con una relación a/c de 0,45 debería obtener una permeabilidad baja al ion cloruro, si consideramos los casos más favorables de exposición a cloruros de agua de mar (nivel 3,1 máxima a/mc 0,5) y diferentes al agua salobre (nivel 4,1 máxima a/mc 0,55) definidos por la NTC 5551. Sin embargo, los resultados no reflejan este razonamiento ya que la permeabilidad se clasificó como moderada con una carga promedio de 2457 coulomb.
- Se comprobó que una de las formas más efectivas de disminuir la permeabilidad al ion cloruro consiste en densificar la pasta, lo cual se logra disminuyendo el espacio entre los granos de cemento por efecto de la disminución de la relación a/mc. Con base en los resultados obtenidos de RCPT, se lograron reducciones del 35% de la permeabilidad ion cloruro para una a/c de 0,45 y del 67% para una a/c de 0,30 con respecto al control (mezcla n°1 a/c 0,65).
- El uso de materiales cementantes puzolánicos como la ceniza volante para disminuir el ataque de los Iones cloruros, demostró para el presente caso ser más efectivo que la disminución de la relación a/c. Esto se evidenció al comparar el resultado del ensayo RCPT para la mezcla n°2 (relación a/c 0,45), el cual fue de 2457 coulomb vs 2250 de la mezcla n°4 (15 % de ceniza y relación a/mc 0,65). Es necesario comprobar estos resultados con

futuras investigaciones, ya que en teoría es posible disminuir los requisitos del diseño de mezcla (cantidad mínima cemento, a/c máxima, resistencia compresión mínima) por durabilidad siempre y cuando se usen adiciones como la ceniza volante.

- La muestra evaluada con aditivo inhibidor de corrosión presenta un valor en el ensayo de 5150 Coulomb, indicando un valor alto de permeabilidad de ion cloruro, típicamente se esperaría que este valor fue menor, sin embargo, en la literatura se encuentra que algunos materiales cementantes suplementarios y los aditivos inhibidores de corrosión cambian la composición química del agua que se encuentra en los poros proporcionando no representativos en el ensayo.
- Por el método colorimétrico mediante el cual se tomaron probetas de concreto y se les roció con nitrato de plata se logró corroborar que a medida que la relación agua material cementante más baja se aprecia menor perfil de ingreso de ion cloruro, para el caso de una A/MC de 0,65 el perfil de ingreso a la matriz de concreto fue de 14 mm aproximadamente, mientras que para la relación A/MC de 0,3 fue de tan solo 0,5 mm. Igualmente ocurre con la muestra que tiene adición de ceniza, este material cementante suplementario logra ocupar los espacios vacíos dentro de la matriz del concreto debido a su finura lo cual hace menos permeable el concreto. Por otro lado, la muestra con mayor cantidad de cemento, pero con igual relación A/MC presenta similar comportamiento a la primera muestra con la igual A/MC
- El diseño del concreto por durabilidad debe ser prioridad para garantizar obras más resistentes y seguras al paso del tiempo y de los agentes externos que día a día están interactuando de forma dinámica en las estructuras de concreto reforzado.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda validar en posteriores ensayos los resultados obtenidos del RCPT de la mezcla n°4 (A/MC 0,65 + 15% ceniza) comparada con mezcla n°2 (A/C 0,45), ya que fue más efectivo la adición de ceniza volante que la disminución de relación agua/ cemento. Podrían disminuirse los requisitos normativos al demostrarse que es más efectivo el uso de adiciones que la disminución de la relación a/c para ciertos casos.
- Validar la efectividad de diferentes aditivos inhibidores de corrosión con diferentes componentes (Nitratos, Nitritos, etc.) en futuros ensayos, ya que los resultados obtenidos en los ensayos de RCPT y método colorimétrico no fueron concluyentes.
- Cuando se realice el diseño de cualquier estructura de concreto reforzado se deben tener en cuenta los agentes externos a los cuales va a estar sometida, con el fin de definir claramente criterios de durabilidad necesarios en el diseño de mezcla de concreto.

REFERENCIAS

- Aggregates, C. C. (2009). Chloride resistance of concrete.
- ASTM International. (2012). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*.
- ASTM International. (2016). *Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*.
- Constructor, C. (Mayo de 2013). *Central Constructor PTE LTD*. Obtenido de <http://www.ccpl.com.sg/house-information-04-spalling-concrete>
- Holmes, N., Byrne, A., & Norton, B. (2015). First Steps in Developing Cement-Based Ba!eriesto Power Cathodic Protection of Embedded Steelin Concrete. *Journal of Sustainable Desing & Applied Research*. Vol. 3: Iss. 1, Article 3.
- ICONTEC. (1998). *Ingenieria Civil y Arquitectura. Concretos. Concreto Fresco. Toma de Muestras*. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- ICONTEC. (2000). *NTC 174. CONCRETOS. Especificaciones de los agregados para concreto*. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- ICONTEC. (2007). *NTC 5551. Concretos. Durabilidad de estructuras de concreto*. Bogota D.C.: ICONTEC.
- Juca. (2015). *Alconpat*, Volumen 5, Numero 2.
- Laboratory, C. T. (2018). Obtenido de <https://corrosion.ksc.nasa.gov/corrincon.htm>
- M.Barrios, C. A. (2016). Método de perfiles de difusión de cloruros para la estimación. *Prospect*, Vol 14, N° 1,, 23-27.
- Markham. (13 de Junio de 2016). Obtenido de <https://www.markhamglobal.com/marine-concrete-structures-steel-corrosion/>
- MAVDT. NSR10. (2010). *Reglamento Colombiano de Construccin Sismo Resistente*.

photographers-resource. (Junio de 2010). *Smeaton's Tower 1759 - 1882 Postcard photo of painting showing Smeaton's tower left and Douglass' right standing together*. Obtenido de photographers-resource: photographers-resource.co.uk