

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**Efecto sinérgico de un agente de curado interno y un aditivo reductor de la retracción en el incremento de la durabilidad de concretos de alto desempeño expuestos a un ambiente industrial**

TESIS

Para la obtención del grado de:  
Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción

Presenta:

Ing. Edgar Ulises De Los Santos Rodríguez.

Director de Tesis:

Dr. José Manuel Mendoza Rangel.

Co-Director:

Dr. Alejandro Durán Herrera.

## Contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>III</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>V</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>VI</b>
<b>1.- Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1.- Ambiente de exposición. ....	1
1.2.- Cemento.....	5
1.2.1.- Definición. ....	5
1.2.2.- Composición. ....	6
1.3.- Cementantes suplementarios.....	8
1.3.1.- Definición. ....	8
1.3.2.- Características químicas de la ceniza volante. ....	10
1.4.- Concreto.....	10
1.4.1.- Definición. ....	10
1.4.2.- Concreto de Alto Desempeño. ....	11
1.4.3.- Curado del concreto. ....	19
1.5.- Aditivos.....	22
1.5.1.- Definición. ....	22
1.5.2.- Tipos de aditivos. ....	23
1.6.- Corrosión del acero de refuerzo. ....	28
1.6.1.- ¿Qué es la corrosión? .....	28
1.6.2.- El acero de refuerzo en el concreto.....	29
1.6.3.- Mecanismos que desencadenan la corrosión del acero en el concreto.....	29
1.7.- Mediciones electroquímicas. ....	34
1.7.1.- Mediciones de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ). ....	35
1.7.2.- Velocidad de corrosión ( $I_{corr}$ ). ....	36
<b>2.- Antecedentes</b> .....	<b>40</b>
2.1.- Curado.....	41
2.2.- Cementantes suplementarios.....	48
2.3.- Carbonatación. ....	52

2.4.- Cloruros.....	54
2.5.- Aditivos reductores de retracción (SRA).....	56
2.6.- Método VERDiCT.....	57
<b>3.- Objetivos.....</b>	<b>60</b>
<b>4.- Hipótesis.....</b>	<b>61</b>
<b>5.- Metodología experimental.....</b>	<b>62</b>
5.1.- Materiales.....	62
5.1.1.- Cemento.....	62
5.1.2.- Ceniza volante .....	64
5.1.3.- Agregados.....	66
5.1.4.- Agua.....	70
5.1.5.- Acero.....	70
5.1.6.- Aditivos.....	71
5.1.7.- Concreto.....	72
5.2.- Métodos.....	77
5.2.1.- Propiedades en estado fresco.....	77
5.2.2.- Propiedades en estado endurecido.....	79
5.2.3.- Análisis químicos.....	81
5.2.4.- Pruebas electroquímicas.....	86
5.2.5.- Inspección visual.....	87
<b>6.- Análisis y discusión de resultados .....</b>	<b>88</b>
6.1.- Propiedades en estado fresco.....	88
6.2.- Propiedades en estado endurecido .....	89
6.2.1.- Resistencia a compresión .....	89
6.2.2.- Módulo de elasticidad.....	93
6.3.- Monitoreo de especímenes expuestos en campo .....	94
6.3.1.- Monitoreo ambiental.....	94
6.3.2.- Carbonatación.....	96
6.3.3.- Perfiles de cloruros.....	98
6.3.4.- Mediciones electroquímicas .....	109
6.3.5.- Inspección visual.....	118

<b>7.- Conclusiones .....</b>	<b>121</b>
<b>Anexo A. Características y dimensiones de las probetas utilizadas en el desarrollo de la investigación.....</b>	<b>124</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>127</b>

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a todas las personas e instituciones que contribuyeron de alguna manera para la realización de este trabajo que hoy culmina principalmente:

Al Dr. José Manuel Mendoza Rangel director de la tesis, por su atención, dirección en este proyecto, apoyo, aportaciones de gran importancia y sugerencias y que sin duda alguna es una gran persona.

Al Dr. Alejandro Durán Herrera por las facilidades brindadas como encargado del Departamento de Tecnología del Concreto y por las sugerencias hechas como Co director de este trabajo.

La Facultad de Ingeniería Civil por darme la oportunidad de formar parte de esta institución.

Al cuerpo académico por su dedicación, paciencia y formación durante los cursos llevados a lo largo de la maestría.

A mis compañeros de posgrado así como al Ing. Francisco J. Vázquez Rodríguez por el apoyo en las pruebas llevadas a cabo en este proyecto.

Al personal técnico de los laboratorios de Tecnología del Concreto y Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción en especial a Gumaro Tovar, por su amabilidad y apoyo.

Al personal administrativo de la Dirección de Posgrado, así como al Dr. Pedro Valdez Tamez por su servicio y atenciones.

Al Ing. Manuel Rodríguez por facilitarnos el ingreso a la zona de exposición en la empresa que dignamente representa.

Al M.C. Isidro Martínez G. (q.e.p.d.) y al Dr. José Betancourt Hdz. por su apoyo y motivación al inicio y a lo largo de esta etapa.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca económica No. 359776, otorgada durante el periodo de la maestría.

Y a todas las personas que pusieron de alguna u otra manera de su parte para terminar esta etapa.

## Dedicatoria

Este trabajo lo quiero dedicar a todas las personas que recorrieron junto conmigo, a esas personas que siempre me dieron una palabra de aliento para seguir adelante y de quienes he aprendido lecciones importantes de la vida, ya que hay cosas que no se aprenden en un aula, sino con el paso de la vida y la convivencia con las personas que forman parte de ella. Por eso es que quiero agradecer:

A mi hija Allison que vino a darme fuerzas para salir adelante en este último periodo de maestría, por contagiarme de sus ganas de vivir y aprender cada día cosas nuevas.

A mi esposa Blanca E. García Requejo, que siempre ha apoyado en las metas que me he propuesto y a estado a mi lado como amiga, consejera, gracias por seguirme y acompañarme en este sueño.

A mis padres Armando De Los Santos y María Del Rocío Rodríguez a quienes les debo mis logros y ganas de salir adelante. Por su enseñanza de valores y ejemplo de fortaleza. De quienes he aprendido a ser constante y perseverante en lo que se quiere y sueña.

A mis Hermanas Ivonne y Janeth, que han formado parte de mi vida como excelentes amigas.

Gracias por su apoyo incondicional, por escucharme cuando los necesito, por motivarme y demostrarme que la distancia no es una barrera para la unidad de una familia.

## Resumen

En la actualidad, el crecimiento de las poblaciones demanda una gran cantidad de elementos necesarios para su subsistencia tanto de alimentación, como de algunas otras necesidades de la sociedad en general, como los servicios, los cuales requieren de una buena organización y una economía sustentable.

En investigaciones recientes se ha observado una tendencia a mejorar la calidad de los materiales de que están constituidas las estructuras civiles que forman parte de nuestra vida diaria y son de uso cotidiano, buscando el aumento de su durabilidad y vida útil. La base para la subsistencia de la sociedad y las poblaciones actuales es la infraestructura ya sea de transporte, de vivienda, hidráulica, energética, de comunicación, esparcimiento, industria, comercio, educación y salud, etc.

El concreto, principal material utilizado en las estructuras de obra civil, es afectado, además de las cargas comunes, por agentes agresivos del medio ambiente, como el dióxido de carbono proveniente de las industrias y de los vehículos en las grandes ciudades y los cloruros que se encuentran principalmente en zonas costeras y ciertas industrias que lo producen como parte de sus procesos. Estos agentes agresivos producen una degradación acelerada en el concreto debido a la corrosión del acero de refuerzo, disminuyendo de manera considerable su vida útil.

Debido a que el principal material para la construcción de todos estos elementos es el concreto, esta investigación presentará los resultados obtenidos de concretos elaborados con materiales que le confieren características distintas a las de un concreto normal (constituido por cemento, agua y agregados), como la implementación de la pumicita o piedra pómez (agregado ligero) para lograr el curado interno. La pumicita es un material que

capta o almacena agua en los poros por medio de fuerzas capilares, esta es una característica que nos permite utilizarla como almacén de agua para curado interno.

Otro ingrediente utilizado es un aditivo reductor de la retracción que le brinda propiedades a la pasta como la reducción de la tensión superficial de los poros y en consecuencia una menor contracción autógena, además, disminuye los patrones de poros continuos que causan la migración del agua hacia la superficie, manteniendo así un mayor número de poros que actúan como reservas de agua. Por último como una sustitución mineral se recurre al uso de ceniza volante tipo F. La adición de estos materiales tiene por objetivo obtener mezclas de concreto para su evaluación en un ambiente industrial severo con visión a aumentar la vida útil de las estructuras expuestas a estos ambientes degradantes.

En este trabajo se evalúa el avance de carbonatación y la difusión de cloruros en cada una de las mezclas elaboradas, derivado de esto se relaciona el efecto de cada uno de los distintos materiales sobre la protección contra la corrosión del acero de refuerzo.

Los resultados obtenidos muestran tener una disminución en la difusión de los iones cloro en las mezclas con el uso combinado de curado interno y aditivo reductor de retracción aunque su efectividad en la disminución de la corrosión depende de los factores externos. El curado interno por si solo mostró más susceptibilidad a los cambios de concentración de cloruros por efecto de la HR aunque su comportamiento ante la corrosión fue mejor que otras mezclas.

El comportamiento de la corrosión fue influenciado por el ambiente de exposición pero mientras que en un ambiente algunas mezclas tienen desventajas, en otro presentan un mejor desempeño por lo que no se puede considerar alguna mezcla mejor que otra en un caso general.



## **1.- Introducción.**

El concreto reforzado es el material de mayor uso para la construcción de infraestructura en el mundo, esto debido a su facilidad para adquirir formas preconcebidas por medio de cimbras, su uso va desde elementos estructurales de edificios, carreteras, presas, silos, canales, puertos, etc.

A pesar de su amplio uso, su durabilidad se ve afectada por el ambiente en que se encuentre, lo que aumenta los costos de mantenimiento de estructuras ya existentes.

En este trabajo se habla sobre el desarrollo de una investigación en concretos de alto desempeño (CAD) y se ponen a prueba en distintos ambientes nocivos y altamente degradantes. Pero la degradación evalúa principalmente en el acero de refuerzo, ya que la corrosión es de los principales mecanismos de degradación de estructuras.

### **1.1.- Ambiente de exposición.**

En estudios realizados por el INEGI (1), a principio del siglo 21, se dice que para el 2001 en México se tenía alrededor del 60.9% de la población en localidades mayores a 15000 habitantes, contando con 362 ciudades, de las cuales 9 contaban con poblaciones de más de un millón de personas. En estas nueve ciudades residía en ese entonces el 51.1% de la población urbana nacional.

La zona metropolitana de Monterrey (ZMM) se encuentra en tercer lugar nacional dentro de las ciudades más desarrolladas y pobladas del país.

En cuanto economía, en conjunto las tres ciudades principales del país (D.F., Guadalajara y Monterrey) aportaban el 40.4% del PIB nacional.

La ZMM se caracteriza por ser una ciudad con gran desarrollo en el ámbito industrial, social, económico e infraestructura. Su principal ingreso es la industria, al contar con empresas de gran prestigio. Pero su desarrollo industrial y su alta población, ocasiona que se tengan problemas de contaminación ambiental.

Los altos contenidos de dióxido y monóxido de carbono en el ambiente, son generados no solo por la industria, sino también por transporte público y privado.

En cuanto al clima, Monterrey cuenta con una temperatura promedio de 23°C que suele llegar a los 40°C en verano y a menos 0°C en invierno. La humedad promedio, es de 62% (humedad óptima para el deterioro del concreto reforzado) y se presentan lluvias fuertes durante los meses de agosto, septiembre y octubre de acuerdo a datos publicados por el INEGI (1).

La ZMM para el 2000, contaba con una superficie urbana de 560.7 km<sup>2</sup>, y está compuesta por los municipios de (1):

Apodaca

García

General Escobedo

Guadalupe

Juárez

Monterrey

San Nicolás de los Garza

San Pedro garza García

Santa Catarina.

Para la investigación llevada a cabo en este trabajo, se expusieron especímenes de concreto con y sin refuerzo (ver anexo) en un ambiente industrial en el municipio de García. La empresa en que se colocaron los

especímenes lleva a cabo procesos que crean un ambiente agresivo y dañino para el concreto.

Dentro de la fábrica hay dos plantas, una donde se produce cloruro de sodio y cloruro de calcio, potencialmente dañinos para el concreto ya que provocan una corrosión por picadura que reduce la sección del refuerzo.

En las siguientes imágenes se muestra algunos daños provocados por la presencia de cloruros en elementos de concreto reforzado dentro de la planta; en la figura 1 se aprecia la parte inferior de una losa donde se puede observar el acero de refuerzo, que aparentemente ya había sido reparado por medio de parche.



**Figura 1. Daño en losa por corrosión**



**Figura 2. Daño en viga donde se aprecia el acero de refuerzo**

En la figura 2 se aprecia el daño en una viga anexa a la zona donde se expusieron los especímenes, cabe mencionar que en la misma área se observaron elementos en proceso de reparación, ya sea por medio de parcheo o por sustitución total de la sección.

En otra planta de la misma compañía, se fabrica carbonato de sodio y bicarbonato de sodio. El principal agente en esta área es la carbonatación por el  $\text{CO}_2$  liberado en el proceso ya que se utiliza caliza como materia prima y esta es calcinada.

Aunque la corrosión no es tan severa como en el caso de los cloruros, también se observaron daños en columnas y vigas principalmente.



**Figura 3. Grietas en columna de planta de carbonatos**

La planta cuenta específicamente con un equipo de ingenieros civiles avocados al mantenimiento y reparación de todos los daños que se presentan continuamente, esto con el fin de alargar la vida útil de la estructura.

## **1.2.- Cemento.**

### **1.2.1.- Definición.**

El cemento portland es un cemento hidráulico compuestos de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción conocida como hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra llamada pasta.

Existen distintos tipos de cemento que se adecuan a las necesidades o al uso final de la estructura.

A continuación se muestra la clasificación dada en la norma NMX- C-414:

**Tabla 1. Clasificación de los cementos de acuerdo con NMX-C-414 (2)**

Tipo	Denominación	Clase resistente	Características especiales
CPO	Cemento portland ordinario	20	RS: Resistente a los sulfatos  BRA: Baja reactividad álcali agregado  BCH: Bajo calor de hidratación  B: Blanco
CPP	Cemento portland puzolánico	30	
CPEG	Cemento portland con escoria granulada de alto horno		
CPC	Cemento portland compuesto	30R	
CPS	Cemento portland con humo de sílice	40	
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno	40R	

### 1.2.2.- Composición.

La composición del cemento portland tiene gran influencia en su comportamiento, así como en su cinética de hidratación. Su composición normalmente se reporta en cuanto al contenido en porcentaje de óxidos, siendo

el óxido de calcio (CaO) y el óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) los que tiene en mayor porcentaje.

Las características de cada cemento y su resistencia ante ataques químicos son proporcionados por las variaciones de estos compuestos.

La tabla 2 muestra la composición de óxidos de un cemento portland, donde vemos en menor cantidad pero no de menor importancia algunos óxidos de los cuales, cabe mencionar, tienen un efecto en el proceso de hidratación del cemento. Los cuatro óxidos principales son CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Tabla 2. Composición de óxidos en un cemento portland (3)**

Óxidos	Contenido máximo (%)	Contenido promedio (%)
CaO	60-69	65
SiO <sub>2</sub>	18-24	21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4-8	6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-8	3
MgO	<5	2
K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O	<2	1
SO <sub>3</sub>	<3	1

El cemento se encuentra formado por cuatro fases cristalinas, resultados de la combinación de los óxidos antes mencionados.

**Tabla 3. Principales fases cristalinas encontradas en el cemento portland (3)**

Fase pura	Nombre	Escritura simplificada	Fase impura
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico	$\text{C}_3\text{S}$	Alita
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato dicálcico	$\text{C}_2\text{S}$	Belita
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico	$\text{C}_3\text{A}$	Algunas veces celita
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferroaluminato tetracálcico	$\text{C}_4\text{AF}$	Algunas veces felita
$\text{CaSO}_4$	Sulfato de calcio	CS	
$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso	CS2H	
	Silicato de calcio hidratado	C-S-H	
	Hydróxido de Calcio	CH	

### 1.3.- Cementantes suplementarios.

#### 1.3.1.- Definición.

Las puzolanas son materiales sílicos o sílico-aluminosos (que contienen sílice y/o aluminio) que por sí mismos poseen un poco o ningún valor cementicio pero que lo tendrán divididos finamente o en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas normales para formar compuestos que poseen propiedades cementantes (4).

La ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, el humo de sílice (sílice activa o microsílice) y las puzolanas naturales, como esquisto calcinado, arcilla



calcinada o metacaolinita, son materiales que le contribuyen a las propiedades del concreto endurecido.

Las puzolanas y las escorias se consideran como un material cementicio suplementario o aditivo (adición) mineral.

En la siguiente tabla se muestran la clasificación de los principales materiales suplementarios y la norma que las rige.

**Tabla 4. Especificaciones y clasificación de los materiales suplementarios**

Material	Norma	Clasificación
Escoria granulada de alto horno	ASTM C-989	<p><b>Grado 80.</b> Escorias con bajo índice de actividad</p> <p><b>Grado 100.</b> Escorias con índice moderado de actividad.</p> <p><b>Grado 120.</b> Escorias con alto índice de actividad</p>
Ceniza volante y puzolana natural	ASTM C-618	<p><b>Clase N.</b> Puzolanas naturales crudas o calcinadas, incluyendo:</p> <p>Tierras diatomáceas (tobas).</p> <p>Silex opalino y esquistos,</p> <p>Tufo y cenizas volcánicas o pumicita,</p> <p>Arcillas calcinadas, incluyendo metacaolinita y esquisto.</p> <p><b>Clase F.</b> Ceniza volante con propiedades puzolánicas.</p> <p><b>Clase C.</b> Ceniza volante con propiedades puzolánicas y cementantes.</p>
Humo de sílice	ASTM C-1240	

### 1.3.2.- Características químicas de la ceniza volante.

La ceniza volante se clasifica de acuerdo a su contenido de óxidos y a su potencial puzolánico el cual es un indicador de su reactividad para formar compuestos que aporten resistencia al concreto.

**Tabla 5. Clasificación de la ceniza volante por su contenido de óxidos (5).**

Característica o compuesto	Clase	
	F	C
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (% mín.)	70.0	50.0
SO <sub>3</sub> (% máx.)	5.0	5.0
Contenido de humedad (% máx.)	3.0	3.0
PPI (% máx.)	6.0	6.0

### 1.4.- Concreto.

#### 1.4.1.- Definición.

Existen distintas definiciones en lo que a concreto se refiere, de las cuales se mencionan algunas.

De acuerdo a la norma ASTM C125: “Es un material compuesto que consiste esencialmente de un medio de unión dentro del cual están embebidas partículas o fragmentos de agregado; en el concreto de cemento hidráulico, el cementante está formado de una mezcla de cemento hidráulico y agua” (4).

ACI 318S-08: “Mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y, con o sin aditivos” (6)

PCA: “Mezcla de material aglomerante (conglomerante) y agregados fino y grueso. En el concreto normal, comúnmente se usan como medio aglomerante, el cemento portland y el agua, pero también pueden contener puzolanas, escoria y/o aditivos químicos” (7).

En sí las definiciones no varían mucho entre una y otra, solo que algunas hacen referencia al cementante que puede ser cemento portland o alguna puzolana.

En la actualidad ya no es común encontrar concretos convencionales ya que la mayoría incluye el uso de algún aditivo, que es un material distinto del agua, agregados, cemento hidráulico y refuerzo de fibras, utilizado como ingrediente de una mezcla cementante para modificar sus propiedades en estado fresco, fraguado o en estado endurecido y que se agrega a la mezcla antes o durante su mezclado (8).

El concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo ya que su capacidad para moldearse cuando está en estado fresco lo hace muy versátil. Entre otras ventajas se encuentra que las materias primas son de fácil obtención y económicas principalmente los agregados y el agua.

En la zona norte de México los principales agregados utilizados para la elaboración de concreto son los de tipo calizo (obtenidos de cerros) y silíceos.

#### 1.4.2.- Concreto de Alto Desempeño.

Un concreto de alto desempeño (CAD) se caracteriza por tener características especiales que normalmente van enfocadas a mejorar el uso del concreto en el ambiente específico en donde se utilice.

Pierre C. Aïtcin describe algunas características del CAD, enfatizando en que un concreto de alto desempeño no solo es de alta resistencia, sino que tiene otras características especiales aunque desde el punto de vista de la relación  $a/mc$  se denomina concreto de alto desempeño a un concreto con una relación  $a/mc$  menor a 0.40 (9).

Un CAD puede constar de uno o más materiales cementantes, el uso de aditivos, agregados especiales, con el fin de lograr un diseño óptimo.

La tabla 6 muestra los materiales más comúnmente utilizados en concretos de alto desempeño y la contribución de cada uno.

**Tabla 6. Materiales utilizados en la fabricación de CAD (7).**

Material	Contribución principal/ propiedad deseada
Cemento portland	Material cementante/ durabilidad
Cemento adicionado o mezclado	Material cementante/ durabilidad/ alta resistencia
Ceniza volante	Material cementante/ durabilidad/ alta resistencia
Escoria	Material cementante/ durabilidad/ alta resistencia
Humo de sílice	Material cementante/ durabilidad/ alta resistencia
Arcilla calcinada	Material cementante/ durabilidad/ alta resistencia
Metacaolinita	Material cementante/ durabilidad/ alta resistencia
Esquisto calcinado	Material cementante/ durabilidad/ alta resistencia
Superplastificante	Fluidez
Reductores de agua de alto rango	Reducción de relación agua-cemento
Aditivos de control de hidratación	Control de fraguado
Retardadores	Control de fraguado
Aceleradores	Aceleración del fraguado
Inhibidores de corrosión	Control de la corrosión del acero
Reductores de agua	Reducción del contenido de cemento y de agua
Reductores de contracción	Reducción de la contracción
Inhibidores de RAS	Control de la reactividad álcali-sílice
Modificadores poliméricos/látex	Durabilidad
Agregado con granulometría optimizada	Mejoría de la trabajabilidad y reducción de la demanda de pasta
Fibras	Mejora de la resistencia al impacto y reducción de agrietamiento por retracción

Los CAD han incrementado su uso en la actualidad debido a que sus prestaciones se adecuan a cada proyecto en particular.

Estos son solo algunos ejemplos de CAD, ya que existe una gran variedad de ellos y sus aplicaciones también son amplias.

#### 1.4.2.1.- Problemas generados en los CAD

Los CAD tienen buenas prestaciones y durabilidad cuando se elaboran de manera adecuada, pero debido a las bajas relaciones  $a/mc$  ( $<0.40$ ) utilizadas, se pueden tener algunos defectos como contracciones.

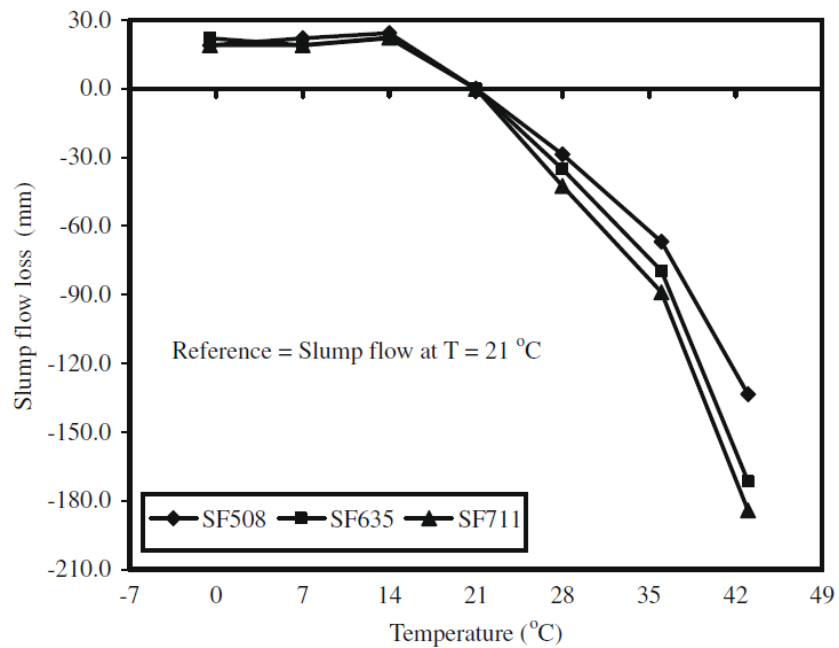
La compactación deficiente al momento de la colocación, produce normalmente una red de poros de gran tamaño que le brinda poca o nula protección al acero.

La baja relación  $a/cm$  de estos concretos genera un trabajabilidad deficiente, por lo que es recomendable recurrir al uso de aditivos reductores de agua (AR) o aditivos reductores de agua de alto rango (HRWR). En la figura 4 se muestra un claro ejemplo de un pavimento de concreto hidráulico con una deficiente compactación.



**Figura 4. Pavimento con una mala colocación**

Las bajas relaciones a/mc y las altas temperaturas también son factores que disminuyen el tiempo de fraguado del concreto, lo que reduce considerablemente el tiempo de colocación y una pérdida de la trabajabilidad. En la figura 5 se muestra un gráfico de los efectos de la temperatura en el revenimiento de tres CAD (10).



**Figura 5. Efecto de la temperatura en tres tipos de CAD distintos (10).**

#### 1.4.2.1.1.- Contracciones en el concreto

Las contracciones o retracciones en el concreto son un problema reciente en los CAD, las cuales se presentan como grietas en los elementos estructurales a edades tempranas.

Hay distintos tipos de retracción: Por secado, plástica, química y la autógena. A continuación se describe brevemente cada una de ellas:

Retracción por secado.

La retracción por secado se presenta por una evaporación del agua de la mezcla de concreto resultado de la disminución de la HR en el ambiente, esto se presenta principalmente en materiales porosos. La evaporación del agua líquida intersticial y el seguido descenso del agua de saturación aumentan el efecto de la presión capilar que provoca la retracción del esqueleto sólido (11).

Retracción plástica.

La retracción plástica se presenta, como su nombre lo dice, en la etapa plástica del concreto, y es una combinación de la retracción por secado y la química, ya que ambas se presentan en esta edad temprana.

Las grietas por retracción plástica aparecen en la superficie del concreto fresco tan pronto como se coloca y mientras está aún plástico. Estas grietas aparecen la mayoría de las veces sobre superficies horizontales. Usualmente son paralelas y se presentan a una distancia de 1 a 3 pies. Es muy probable que estas grietas se presenten cuando se presentan altas velocidades de evaporación que causan que la superficie del concreto pierda humedad antes del fraguado (12).



Retracción química.

La retracción química es la reducción en el volumen absoluto de sólidos y líquidos de la pasta de cemento, a causa del proceso de hidratación del cemento. Debido a que el volumen absoluto de los productos de hidratación es menor que el del cemento y el agua que constituyen la pasta inicialmente (7).

Retracción autógena.

La retracción autógena se lleva a cabo en un concreto hidratándose como en un sistema cerrado sin ningún intercambio con el exterior y es una consecuencia de la retracción química. Sin importar la relación  $a/mc$ , la retracción química que ocurre durante la hidratación del cemento, esta es restringida por la estructura de la pasta y el esqueleto de agregado lo que genera una porosidad muy fina (3).

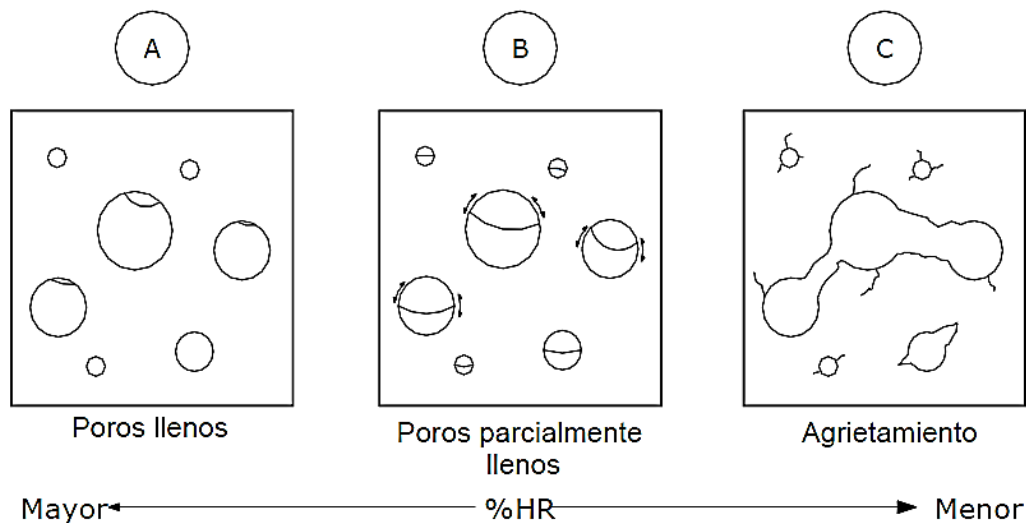
Agrietamiento por contracción.

Uno de los problemas más comunes cuando se construye con concreto es la contracción. Algunas de las construcciones donde las grietas ocurren con frecuencia debido a la retracción por secado, y en las cuales las consecuencias pueden ser graves, son cubiertas de puentes, estacionamientos, estructuras marinas, estructuras primarias y secundarias de contención y pisos industriales.

La susceptibilidad del concreto al agrietamiento depende de si se restringe o no su movimiento. De estar sin alguna restricción, puede contraerse libremente y cambiar de volumen sin agrietarse.

Sin embargo, la mayoría del concreto se encuentra restringido por cimbras, cimentaciones, refuerzo, o miembros de conexión, frecuentemente se desarrollan esfuerzos de tensión lo suficientemente altos para provocar el agrietamiento, algunos otros factores que afectan el agrietamiento son la velocidad de contracción, características del creep, módulo de elasticidad y resistencia a tensión del concreto. En la figura 6 podemos observar un esquema

del efecto la disminución de la humedad relativa en los poros de la pasta del concreto y como este fenómeno genera el agrietamiento.



**Figura 6. Agrietamiento por contracción.**

A continuación se describe la mecánica de los esfuerzos dentro de los poros de acuerdo a la figura 6:

- A. En edades tempranas del concreto, dígase desde la colocación, se tiene una HR interna alta, por lo cual los poros se encuentran en perfectas condiciones. Al llevarse a cabo las reacciones de hidratación correspondientes, el agua dentro de los poros (Agua capilar) sirve de almacén para permitir que las reacciones sigan llevándose a cabo, como consecuencia el agua libre disminuye y con ella la HR.
- B. Al presentarse un descenso en la HR, se aumenta la tensión superficial de los poros.
- C. El agrietamiento se presenta cuando la tensión superficial de los poros es mayor a la resistencia a tensión del concreto.

### 1.4.3.- Curado del concreto.

#### Definición

Neville: El curado es el nombre que se le da a los procedimientos utilizados para promover la hidratación del cemento; consiste en un control de la temperatura y en el movimiento de humedad, a partir de la superficie hacia adentro del concreto (13).

De acuerdo a la PCA (7) el curado es la mantención de la temperatura y del contenido de humedad satisfactorios, por un periodo de tiempo que empieza inmediatamente después de la colocación (colado) y del acabado, para que se puedan desarrollar las propiedades deseadas en el concreto.

ACI 308R (14): Proceso por el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y calor.

Por otro lado, el curado de un concreto es el proceso que sigue del colado, y este procedimiento es utilizado para promover la hidratación del cemento; consiste en un control de temperatura y en el movimiento de humedad a partir de la superficie, hacia dentro del concreto. El objetivo del curado es mantener saturado el concreto o lo más cercano posible para que el espacio llenado por el agua sea posteriormente, llenado por los productos de hidratación del cemento (13).

El curado del concreto es parte importante en la construcción ya que sin él no se puede obtener estructuras de edificios, carreteras, puentes, etc. de buena calidad, por ello se han desarrollado distintos métodos de curado convencionales algunos descritos por la PCA (7) son:

- Encharcamiento o inmersión.
- Rociado o aspersion.
- Coberturas húmedas.
- Papel impermeable.

- Hojas de plásticos.
- Compuestos de curado formadores de película.
- Cimbras dejadas en su lugar.
- Mantas o cubiertas aislantes.
- Curado a vapor.
- Curado eléctricos con aceite, microondas y rayos infrarrojos.

Todos estos curados tienen un objetivo: mantener la humedad relativa del ambiente constante o evitar que disminuya para evitar pérdidas de agua durante el fraguado del concreto.

Algunas desventajas de estos tipos de curados es que su alcance, debido a que al hidratarse el cemento de la superficie del elemento, se vuelve más densa y disminuyendo la efectividad del curado ya que es más difícil que el agua ingrese y continúe hidratando el cemento a más profundidad, por lo tanto su alcance es limitado (13).

Factores que afectan el curado:

- Humedad relativa.
- Tipo de cemento.
- Relación a/mc.
- Temperatura ambiente.
- Velocidad del viento.

Curado interno

Debido a la ineffectividad del curado convencional (CC), se ha optado por desarrollar otros métodos como el curado interno, que consiste principalmente en el uso de materiales con una alta capacidad de absorción de agua para

adicionarse al concreto durante el mezclado y que de esta manera el agua absorbida pueda ser liberada a edades posteriores.

De acuerdo a documento de terminología del ACI, curado interno (CI) se define como la acción de suplir agua a toda una mezcla cementicia utilizando reservas, por medio de agregados de peso ligero presaturados, que libera fácilmente el agua necesaria para la hidratación o para remplazar la humedad perdida por medio de la evaporación auto desecación (15).

La tabla 7 muestra algunos materiales que se han utilizado para curado interno que pueden ser susceptible de usarse con este fin.

**Tabla 7. Clasificación de materiales para curado interno (16)**

Clasificación	Material o técnica
Sustancias con agua ligada químicamente	Aluminatos de calcio <sup>1</sup>
Sustancias con agua adsorbida físicamente	Arcilla de bentonita Polímeros superabsorbentes
Sustancias con agua retenida físicamente	Pumicita Perlita Liapor y Leca Stalite Tierra diatomácea
Sustancias con agua no ligada	Micro encapsulación Agua emulsificada

#### Ventajas del curado interno

- Aumento del grado de hidratación del cemento

<sup>1</sup> No se recomienda su uso por su relación con reacciones deletéreas en la pasta de cemento

- Aumento de la resistencia
- Reducción de la retracción y agrietamiento
- Permeabilidad reducida
- Aumento de la durabilidad

El agregado ligero (AL) utilizado en esta investigación nos permite lograr el curado interno por medio de la disposición de agua dentro de la matriz, ya que su estructura porosa nos sirve como almacén de agua para hidratación. El uso de agregado ligero, ha demostrado ser capaz de disminuir la deformación autógena (13)

## **1.5.- Aditivos.**

### **1.5.1.- Definición.**

Los aditivos son reconocidos como componentes importantes del concreto utilizados para aumentar su desempeño, son ingredientes que, además del cemento portland, del agua y los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o después del mezclado (7).

De acuerdo al ACI 212.3R (17) y ASTM C 125 (4): los aditivos químicos son utilizados para mejorar las propiedades del concreto y mortero tanto en estado plástico como en estado endurecido.

El uso de aditivos en el concreto en la antigüedad no ha sido bien documentado. Se sabe que el cemento mezclado con materia orgánica fue aplicado como una capa de superficie para la resistencia al agua con fines de pintar. El uso de aditivos naturales en el concreto fue una progresión lógica. Los materiales usados como aditivos incluída la leche y manteca de cerdo por los romanos; huevos durante la edad media en Europa; pasta de arroz de pulidos glutinosos, laca, aceite de tung, melaza y extractos de olmo mojados en agua hervidos por los chinos; en Mesoamérica y Perú, jugo de cactus y látex de plantas de goma. Los mayas también utilizaron extractos de corteza y otras

sustancias como retardantes de fraguado para mantener el estuco trabajable por un largo periodo de tiempo (18).

#### 1.5.2.- Tipos de aditivos.

A continuación se muestran los principales tipos de aditivos utilizado en la fabricación de concreto (19).

Reductores de agua

Reductores de agua de alto rango

- Superplastificantes
- Incluidores de aire
- A prueba de agua
- Aceleradores de fraguado
- De propósito especial:
  - Reductores de la expansión álcali agregado
  - Anti-congelamiento
  - Anti-lavado
  - Inhibidores de corrosión
  - Expansivos a base de sulfoaluminato de calcio
  - A base de polímeros
  - Para reciclaje de desechos de concreto
  - Para concreto lanzado
  - Reductores de la retracción

Los aditivos más comúnmente utilizados en la actualidad son los reductores de agua, ya que nos proporcionan una disminución en el consumo de agua y nos ayudan a mejorar la trabajabilidad y afectar la relación a/mc. Hoy es difícil encontrar un concreto que no utilice un aditivo de este tipo ya que algunas de las propiedades logradas con estos aditivos son:

- Mantener la trabajabilidad a una menor relación a/mc.
- Altamente fluidos, cercanos a un concreto auto-nivelable a la misma o a una relación a/mc más baja que el mismo concreto con trabajabilidad normal.
- O una combinación de ambas: un concreto con una trabajabilidad incrementada moderadamente con una reducción en la relación a/mc.

Para objetivo de este trabajo, a continuación se cita algunas de las características físicas y químicas de dos de estos aditivos: Reductor de agua de alto rango (HRWR<sup>2</sup>) y Reductor de la retracción (SRA<sup>3</sup>).

#### 1.5.2.1.- Aditivos reductores de agua de alto rango.

El HRWR a diferencia de los reductores de agua convencionales, frecuentemente son conocidos como superplastificantes y pueden reducir el consumo de agua hasta en un 30%, sin el efecto colateral de un retardo excesivo en el fraguado (18).

Los HRWR actúan de manera similar a la de los aditivos reductores convencionales, son productos orgánicos clasificados en tres familias:

1. Condensado de melanina-formaldehído sulfatado
2. Condensado de naftalina-formaldehído sulfatado
3. Poli-carboxilos-poli-éter

Los HRWR a base de éter de poli-carboxilo retardan menos y desarrollan una resistencia más rápida a comparación de las otras formulaciones.

---

<sup>2</sup> Siglas de "High Range Water Reducing Admixture

<sup>3</sup> Siglas de Shrinkage Reducing Admixtures



Una característica de algunos HRWR es que el efecto de incremento de revenimiento se mantiene en el concreto solo de 30 a 60 minutos, en dicho tiempo el concreto recuperará su revenimiento normal. La cantidad de tiempo que el concreto mantiene el revenimiento logrado, depende del tipo y cantidad de cemento, la temperatura del concreto, el tipo de HRWR, la dosificación, el revenimiento inicial, el tiempo de mezclado y el rigor del mezclado.

#### Ventajas de los HRWR:

1. Reducción significativa del agua.
2. Contenido reducido de cemento.
3. Aumento de trabajabilidad.
4. Disminución en el esfuerzo necesario para la colocación.
5. Uso más efectivo del cemento.
6. Mayor velocidad de desarrollo de resistencia temprana.
7. Incremento de la resistencia a largo plazo.
8. Disminución en la permeabilidad.
- 9.

#### Desventajas de los HRWR:

1. Costo adicional del aditivo (Puede reducirse el costo de colocación del concreto).
2. Pérdida de revenimiento mayor que el concreto convencional.
3. Modificación en la dosificación del aditivo incluso de aire.
4. Menor respuesta con un poco de cemento.
5. Decoloración leve del concreto de color claro.
6. Huecos de color y manchas de color en los acabados expuestos y formados.

#### 1.5.2.2.- Aditivos reductores de retracción (SRA).

Como ya se vio en apartados anteriores, la pérdida de humedad del concreto mientras se seca resulta en una retracción del volumen denominado retracción por secado.

La retracción por secado es indeseable cuando produce agrietamiento debido a una restricción interna o externa, alabeo de losas de piso, pérdida excesiva de preesfuerzo en elementos de concreto preesforzado.

La magnitud de la retracción por secado puede reducirse disminuyendo el contenido de agua unitaria de la mezcla de concreto y utilizando agregados de buena calidad y de mayor tamaño posible de acuerdo a la aplicación particular. Otra manera de reducir la retracción por secado es utilizando SRA's, ya que son formulaciones orgánicas que reducen la tensión superficial del agua en los poros capilares, reduciendo así las fuerzas de tensión dentro de la matriz de concreto que provoca la retracción por secado (18).

##### 1.5.2.2.1.- Efecto sobre las propiedades del concreto en estado fresco.

Al adicionarse en dosis de 2% por peso de cemento, sin ajustar el volumen de agua introducida por el aditivo puede verse aumentado el revenimiento del concreto y la porosidad. Sin embargo, cuando se sustituye por un volumen igual de agua, el SRA tiene poco o casi ningún efecto sobre el revenimiento del concreto. Tiene un ligero efecto de retardo sobre la velocidad de hidratación y puede extender el tiempo de fraguado por hasta una hora. El uso de este aditivo, afecta el contenido de aire del concreto fresco.

#### 1.5.2.2.2.- Efectos sobre las propiedades del concreto en estado endurecido

##### Agrietamiento por contracción.

La cantidad de reducción en la retracción obtenida es dependiente de la relación a/mc de la mezcla. Entre más baja sea la relación a/mc, se puede alcanzar un mayor porcentaje de reducción de la contracción (20).

##### Resistencia a la compresión.

Se ha observado una disminución de hasta 15% a 28 días. En general la reducción es menor en concretos con relaciones a/mc más bajas. Normalmente los fabricantes recomiendan un aumento de 7-10% de superplastificante para reducir el agua de mezcla mientras se mantenga constante el contenido de cemento (21).

##### Agrietamiento térmico.

Un gran porcentaje de las grietas en el concreto pueden atribuirse a los efectos térmicos. Dos causas básicas son las diferencias de temperatura dentro de secciones masivas y el cambio de volumen total de las secciones delgadas ocasionado por el enfriamiento. Los SRA's debido a su efecto de retardo sobre la hidratación que acompaña sobre las temperaturas pico puede reducir el agrietamiento térmico debido a la retracción térmica disminuida en el enfriamiento.

##### Alabeo.

Un problema común es el alabeo de losas de concretos que es causado por el secado de la superficie superior y la retracción más rápida que el centro del concreto. El SRA ha demostrado una tendencia significativa a reducir el alabeo de la losa.

### 1.5.2.2.3.- Factores que afectan el desempeño de los aditivos reductores de retracción.

Efecto de la relación a/mc.

La relación a/mc juega un papel importante sobre la retracción del concreto, ya que a menor relación, (menor contenido de agua), se aumenta la contracción, habiendo menor retracción a mayores relaciones a/mc.

Efecto del tipo de cemento y las mezclas de materiales cementantes

Pruebas hechas en mezclas de mortero en las que se ha adicionado SRA, donde se mide la retracción en especímenes desde edades tempranas, han dado reducciones a largo plazo que va del 25 al 38% (22), lo que es benéfico para la durabilidad del concreto.

Efecto del curado húmedo.

El curado húmedo incrementa la efectividad del aditivo, especialmente en edades tempranas del concreto. Los niveles máximos de retracción se reducen por periodos extendidos de curado húmedo (23).

## **1.6.- Corrosión del acero de refuerzo.**

### 1.6.1.- ¿Qué es la corrosión?

La corrosión es el deterioro de un material, usualmente un metal, por la reacción con el ambiente (24).

La corrosión es un fenómeno inevitable al ser la respuesta de los metales a una ley natural, y es un fenómeno que se lleva a cabo a través de un comportamiento electroquímico en el que hay un intercambio de electrones por

medio de una reacción química llevándose a cabo la pérdida de estos para que ocurra la oxidación (25).

#### 1.6.2.- El acero de refuerzo en el concreto.

El concreto funciona como una barrera de protección al acero ya que los protege de los agentes ambientales. Esta protección es brindada por la capa pasiva que se forma alrededor del acero de refuerzo producto de la hidratación del cemento

La capa formada está compuesta por óxidos del mismo metal. Para la formación de esta capa es necesaria la presencia de humedad; si no existe humedad, el metal sufrirá una corrosión severa en lugar de una pasivación (26).

Además el pH del concreto (12.6-14, en estado sano) ayuda a que esta capa se conserve y mantenga en estado pasivo al acero de refuerzo.

La alcalinidad del concreto se debe principalmente al hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento y a los álcalis que puedan estar incorporados como sulfato en el clínker. De esta forma el concreto actúa como una barrera física y química para protección del acero (27).

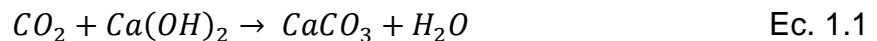
#### 1.6.3.- Mecanismos que desencadenan la corrosión del acero en el concreto.

Los dos mecanismos de corrosión que se presentan con mayor frecuencia en el concreto reforzado, y por lo mismo los más estudiados son la corrosión por carbonatación y por el ataque de cloruros.

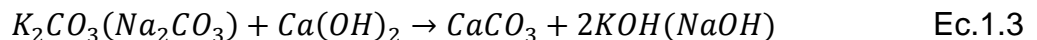
### 1.6.3.1.- Corrosión por carbonatación

La carbonatación de los compuestos hidratados del cemento por el CO<sub>2</sub> que contiene el aire reduce el pH de la solución intersticial a un valor tal que la capa pasiva se destruye y la corrosión puede entonces desarrollarse en un medio aireado y húmedo.

El aire contiene CO<sub>2</sub>, este contenido depende de la presión y la temperatura, siendo más importante en ambientes industriales y urbanos que en medios rurales. A continuación se muestra el mecanismo de reacción (28):



El mecanismo no solo se da en la portlandita [Ca(OH)<sub>2</sub>], sino también en las bases alcalinas que se carbonatan al contacto con el dióxido de carbono disuelto como se muestra a continuación (28):



La portlandita es la que se carbonata más rápidamente, sin embargo los otros compuestos hidratados, aluminatos y silicatos de calcio, son también sensibles al ataque por carbonatación (28).

La carbonatación no daña en si al concreto aunque si puede generar retracción, caso contrario, puede reducir la porosidad e incrementar la resistencia (28).

Donde se tienen efectos por la carbonatación es en el acero de refuerzo del concreto, ya que al carbonatarse las fases del cemento, se presenta una disminución del pH, acercándolo a un nivel neutro. La disolución en los poros se compone principalmente por agua pura; por lo tanto el acero en concreto carbonatado se corroe como si estuviera en contacto con el agua (29) (30).

La corrosión por carbonatación se presenta normalmente como una corrosión generalizada a lo largo del acero de refuerzo.

Una forma de detectar la profundidad a la que se encuentra el avance de carbonatación es por medio de la aplicación de fenolftaleína, ya que cambia su coloración de acuerdo al pH. A un pH por encima de 9, se torna de color rosa púrpura, a pH menor a 9, la fenolftaleína se mantiene incolora (28).

La velocidad de carbonatación disminuye con el tiempo, ya que el CO<sub>2</sub> tiene que difundir a través de los poros de la capa exterior ya carbonatada. La penetración de la carbonatación en el tiempo se describe por el siguiente modelo:

$$d = Kt^{0.5} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde:

d es la profundidad carbonatada, t es el tiempo medido en años y K es una constante que depende de varios factores como el tipo de cemento, proporciones, relación a/mc, etc. (27)

#### 1.6.3.2.- Corrosión por ataque de cloruros.

La corrosión presentada en el caso de ataques por cloruros es localizada. La corrosión por ataque de cloruros es la más agresiva y responsable del mayor número de casos de corrosión en armaduras.

A continuación se muestra la tabla 8 con los casos en que se presenta la corrosión localizada.

**Tabla 8. Factores causantes de la corrosión localizada (27)**

Corrosión localizada	
Agentes desencadenantes	Fuentes de suministro
Iones despasivantes (cloruros, sulfatos, sulfuros)	Materias primas, aditivos, penetración exterior
Pilas de pH y de aireación diferencial	Fisuras, coqueras, estructura en dos medios
Pilas galvánicas	Contacto entre dos metales
Corrientes erráticas	Fugas eléctricas

Los factores antes mencionados tienen la capacidad de destruir de forma puntual la capa pasiva, desencadenando la corrosión por picaduras. Estas picaduras funcionan como el ánodo de la pila de corrosión, por lo que progresan en profundidad, pudiendo provocar la falla por ruptura del acero de refuerzo.



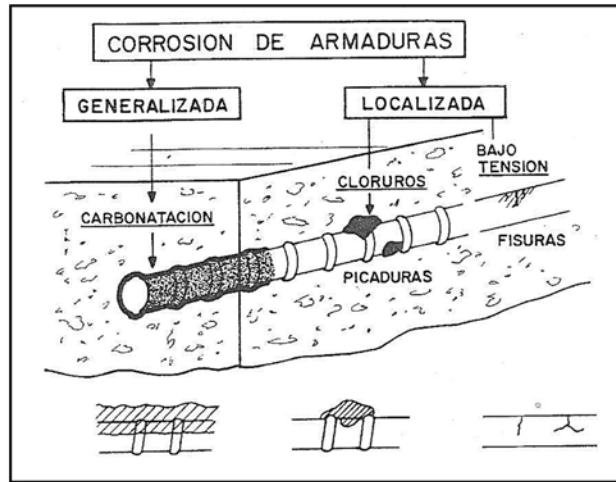


Figura 7. Tipos de corrosión en las armaduras y factores que la provocan tomado de (27)

Durante la corrosión por efecto de los cloruros se forman varios compuestos, la figura 8 muestra un esquema del mecanismo.

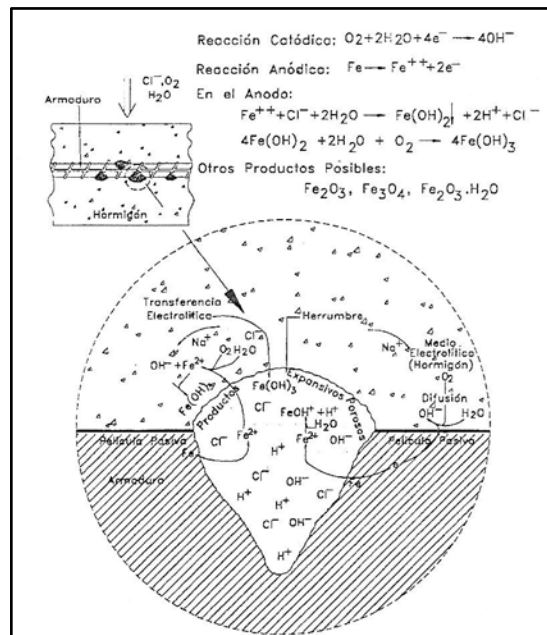


Figura 8. Mecanismo de corrosión.

## **1.7.- Mediciones electroquímicas.**

Los métodos de prueba electroquímicos son algunas de las herramientas más útiles disponibles para el entendimiento y control de la corrosión. Estos métodos de prueba pueden ser aplicados para el seguimiento de problemas como (31):

1. Evaluación de alternativas de control de corrosión.
2. Monitorear la efectividad de un programa de control de corrosión.
3. Monitorear la velocidad de corrosión para permitir la predicción del tiempo de vida de un componente y optimización del remplazo del componente, mantenimiento o esquemas de reparación.
4. Evaluación de diferentes materiales con el propósito de selección durante el diseño inicial remplazo de un componente.
5. Determinación de los parámetros y mecanismos que controlan un proceso de corrosión.

Los métodos de prueba electroquímicos son de gran utilidad cuando se utilizan en conjunto con otros métodos para estudiar la corrosión y entre los beneficios que ofrecen están:

1. Son relativamente rápidos con resultados en cuestión de minutos u horas. Las velocidades de corrosión electroquímicas son solo medios de obtener información de este parámetro en tiempo real.
2. Las mediciones de velocidad de corrosión en tiempo real pueden diseñarse para brindar monitoreo continuo de cambios del proceso en el orden de unos cuantos minutos.
3. Las mediciones de velocidad de corrosión en tiempo real pueden ser utilizadas para retroalimentación y control de los sistemas de protección de corrosión u otros procesos.

4. El comportamiento de la corrosión puede ser medido en un amplio rango de condiciones de oxidantes o en un solo ambiente.
5. La mayoría de los métodos pueden aplicarse ya sea en el laboratorio o en plantas de proceso u otras condiciones de servicio.

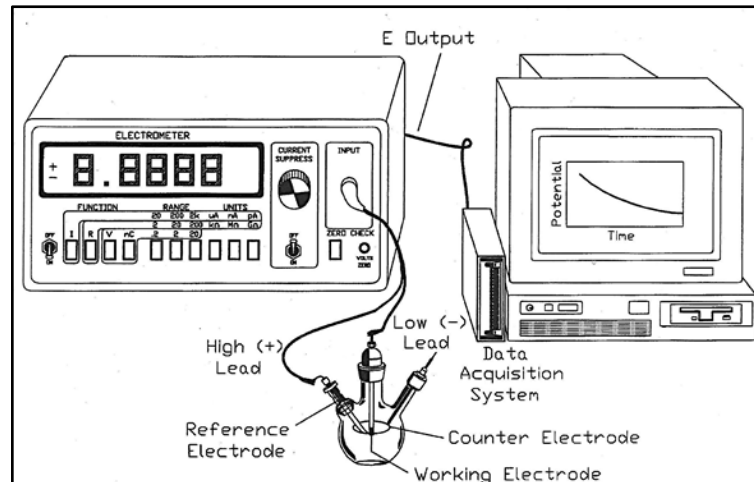
#### 1.7.1.- Mediciones de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ).

La medición de potencial electroquímico es una de las mediciones más básicas en la electroquímica.

El potencial de un metal en una solución acuosa está en función de la reactividad inherente del metal y el poder de oxidación de la solución. El objetivo de estas mediciones es medir el potencial del espécimen sin afectar las reacciones electroquímicas sobre la superficie del mismo. Es necesario hacer las mediciones de potencial con respecto a un electrodo de referencia estable ya que el cambio en el potencial medido puede atribuírsele a los cambios de la interface espécimen/solución (31).

La mayoría de las técnicas electroquímicas requieren del potencial con respecto al electrodo de referencia. En la siguiente imagen se muestra un arreglo para realizar mediciones de potencial.

La medida de potencial de corrosión consiste en determinar la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de refuerzo y un electrodo de referencia que se coloca en la superficie del elemento a medir. Esta técnica es cualitativa ya que solo nos dice si el metal está o no en una etapa de corrosión (28).



**Figura 9. Arreglo para mediciones de potencial (31).**

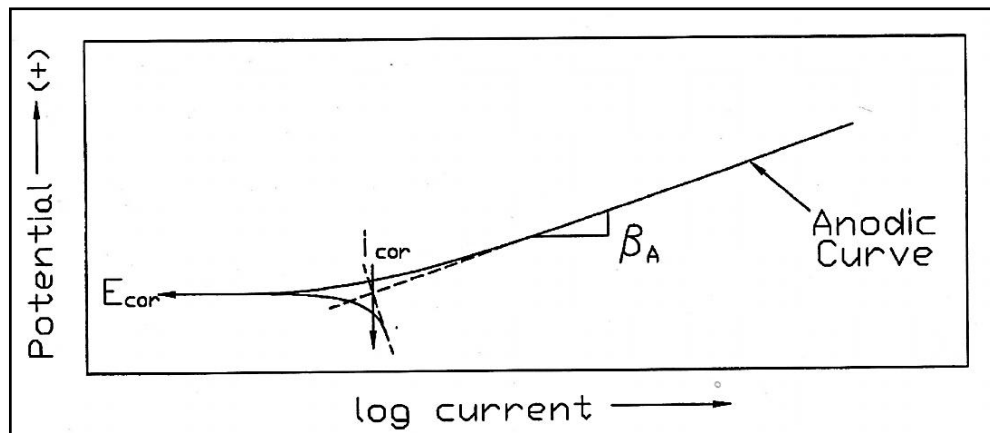
El potencial se puede medir con un electrodo de referencia y un multímetro, para mediciones en concreto, se hace con referencia a la norma ASTM C-876 (32) y contra un electrodo de referencia de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ .

#### 1.7.2.- Velocidad de corrosión ( $I_{\text{corr}}$ ).

La resistencia a la polarización es una técnica cuantitativa y no destructiva, que permite la estimación de la velocidad de corrosión instantánea de un metal en un medio. El procedimiento se basa en que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entrono del potencial de corrosión y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión. Durante la prueba se aplica una variación de  $\pm 10$  mV y se mide la velocidad de corriente resultante. La ventaja de este método es que las polarizaciones aplicadas son tan pequeñas que no alteran el espécimen medido.

Una vez que se ha obtenido el comportamiento de la polarización, la medición del potencial de corrosión cambia el sistema con respecto al comportamiento a la polarización. La magnitud de la corriente anódica puede relacionarse directamente con la pérdida de peso del material. De manera similar, puede determinarse si el metal está en una región de corrosión activa o pasiva.

La siguiente figura muestra la curva de polarización de un metal corroyéndose activamente.



**Figura 10. Curva de polarización de un metal con comportamiento activo.**

La figura 10 muestra una curva de polarización de la cual se obtiene la velocidad de corrosión intersectando la pendiente de la curva obtenida en valores anódicos contra el potencial inicial.

En el caso de la aplicación de estas mediciones a especímenes de concreto reforzado, el concreto es el elemento que funciona como electrolito, el refuerzo como electrodo de trabajo, se tiene un electrodo de referencia y un contraelectrodo que normalmente es un metal que se coloca en la parte externa del espaciamiento de concreto. Para lograr un buen contacto, se colocan materiales absorbentes entre las superficies entre el electrodo de referencia y el concreto y entre el contraelectrodo y el concreto.

Valores de referencia:

Para medidas de potencial de corrosión en la norma ASTM C-876 se especifican tres zonas principales como se describe en la tabla 9 (32).

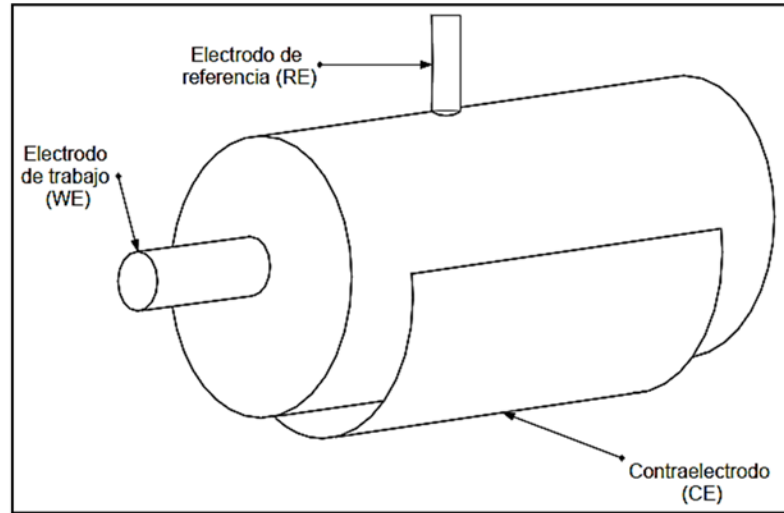
**Tabla 9. Probabilidad de presencia de corrosión de acuerdo al potencial.**

Valor (V)	Probabilidad de corrosión
Más de -.20	10% de que se presente
De -.20 a -.35	Zona incierta
Más negativo que -.35	Más del 90% de probabilidad de que se presente.

Para la velocidad de corrosión se presentan los valores en la tabla 10, cabe mencionar que la velocidad de corrosión se ve afectada por la humedad del espécimen de concreto (27).

**Tabla 10. Nivel de corrosión en función de la velocidad (28).**

Velocidad ( $\mu A/cm^2$ )	Nivel de corrosión
<0.1	Despreciable
0.1 a 0.5	Baja
0.5 a 1	Moderada
>1	Alta



**Figura 11. Configuración pruebas electro química en especímenes de concreto reforzado**

En la figura 11 se muestra la conexión de las probetas utilizadas en este trabajo para la obtención de velocidades y potenciales de corrosión por medio de un potencióstato.

## 2.- Antecedentes.

En el año de 1824 se realizó la patente por parte de Joseph Aspdin de un material en esos tiempos recién descubierto cuyo nombre es cemento portland, cuyas características cementantes, lo han hecho hasta nuestros días, el material de construcción más utilizado en el mundo.

El concreto es un material moldeable hecho por la mezcla de cemento, agua, agregado grueso y agregado fino, esto es lo que conocemos como concreto simple o convencional. Con el paso del tiempo y las investigaciones enfocadas al mejoramiento de sus propiedades, se ha avanzado tanto en los procesos de elaboración, como de transporte, colado, curado, características en estado fresco y endurecido.

Las propiedades en estado fresco y endurecido son de gran importancia en nuestros días ya que podemos fabricar concretos más densos, ligeros, resistentes a congelamientos, a ambientes marinos, de alta resistencia, celulares, etc. La mayoría de las modificaciones de estas propiedades se realizan por medio de aditivos.

Con el uso de los aditivos de alto rango (con el uso de estos aditivos es posible una reducción de hasta 30% en el consumo de agua necesaria para la hidratación sin el efecto colateral de retardo), se ha logrado conseguir relaciones tan bajas que se han presentado algunos otros efectos colaterales que afectan la calidad del concreto en la construcción.

Una de ellas es el curado, que hasta hace poco solo se consideraba de forma externa como lo es el curado por inmersión, por riego, por membrana, por encharcamiento, siendo el curado húmedo continuo el más recomendado, ya que si la humedad relativa dentro del concreto decae menos del 80%, la hidratación se mantiene por un periodo corto y posteriormente se interrumpe (13). Con la disminución de las relaciones a/mc se presentan problemas como el agrietamiento consecuencia de las retracciones en el concreto por la pérdida prematura de humedad o por la autodesecación.

Recientemente se ha utilizado el curado interno como una alternativa para obtener una mayor hidratación del cemento y con esto el aumento de los productos de hidratación, logrando así eliminar los poros interconectados. Este consiste en la adición a la mezcla de algunos materiales como pumicita o polímeros superabsorbentes que contienen agua con el objeto de liberarla



cuando se presente una disminución de la HR o una pérdida de humedad por secado (33) (34).

La calidad y durabilidad de un concreto recae principalmente en la densidad de la matriz, ya que si se logra un aumento, podemos disminuir la permeabilidad y el ingreso de agentes externos. La ceniza volante es una puzolana que se obtiene como residuo de la combustión en plantas generadoras de electricidad y su uso se ha incrementado en las mezclas de concreto como cementante suplementario ya que mejora la vida útil del concreto y nos permite un ahorro en el consumo de cemento. La ceniza volante reacciona con los productos de hidratación del cemento en este caso, con la portlandita o hidróxido de calcio (35) generando matrices más densas.

En los apartados siguientes se hace una relación de las investigaciones llevadas a cabo en la literatura especializada con respecto a los temas más relevantes para este trabajo de investigación.

## 2.1.- Curado.

En lo que respecta al curado interno ya se han realizado investigaciones en el uso de una variedad de materiales y se han obtenido algunas observaciones en cuanto a sus beneficios y desventajas.

El problema del curado fue reconocido en 1991 por Philleo, quien sugirió la incorporación de agregado fino de peso ligero dentro de la mezcla de concreto para proveer una fuente de curado interno y brindar el agua necesaria para remplazar la consumida por la contracción química durante el curado del concreto (36).

Se han elaborado algunos modelos sobre la efectividad y la distancia protegida por el curado interno donde se hacen estimaciones sobre el contenido óptimo de sustitución de agregado ligero por agregado de peso normal para asegurar el agua del curado de la pasta de cemento.

La siguiente ecuación nos sirve para calcular el volumen de agua necesaria para prevenir la contracción química (por hidratación del cemento).

$$V_{wat} \left( \frac{m^3 \text{ de agua}}{m^3 \text{ de concreto}} \right) = \frac{C_f \cdot C_S \cdot \alpha_{max}}{\rho} \quad \text{Ec. 2.1}$$

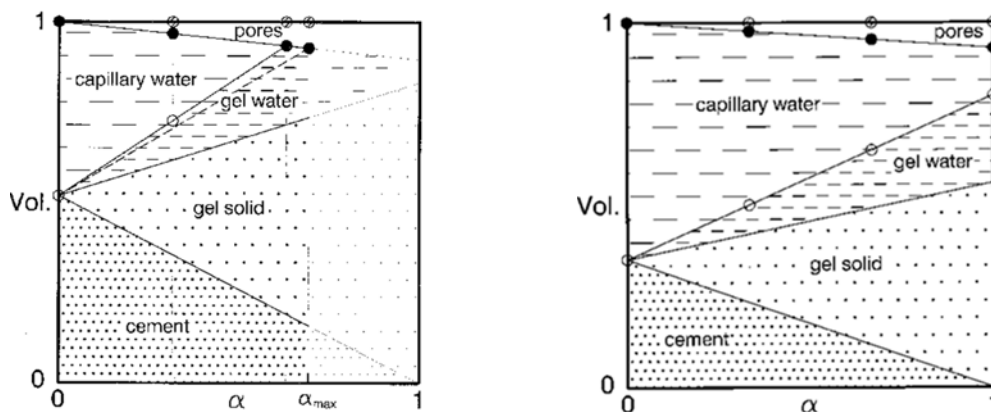
Donde  $V_{wat}$  es el volumen de agua,  $C_f$  es el contenido de cemento por  $m^3$  de concreto,  $CS$  es la contracción química (alrededor de 0.06 kg de agua/kg de cemento),  $\alpha_{max}$  es el máximo grado de hidratación y  $\rho$  es la densidad del agua.

Después de obtener el volumen de agua necesario, se calcula el volumen de agregado ligero, como se muestra.

$$V_{LWFA} = \frac{V_{wat}}{S\phi_{LWFA}} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde  $V_{LWFA}$  es el volumen de agregado ligero,  $S$  es la saturación del agregado ligero fino y  $\phi_{LWFA}$  es la porosidad del mismo. Esta ecuación asume que el agua absorbida por el agregado estará disponible en su totalidad para la pasta de cemento que rodea a cada agregado.

En su publicación compuesta de dos artículos, Jensen y Hansen retoman la teoría del modelo de T.C. Power, donde se establece que la cantidad necesaria para lograr la completa hidratación de una pasta de cemento es 0.42 kg de agua por kg de cemento, al igual que T. C. Hansen quien dedujo algunas ecuaciones del modelo de Powers (37).

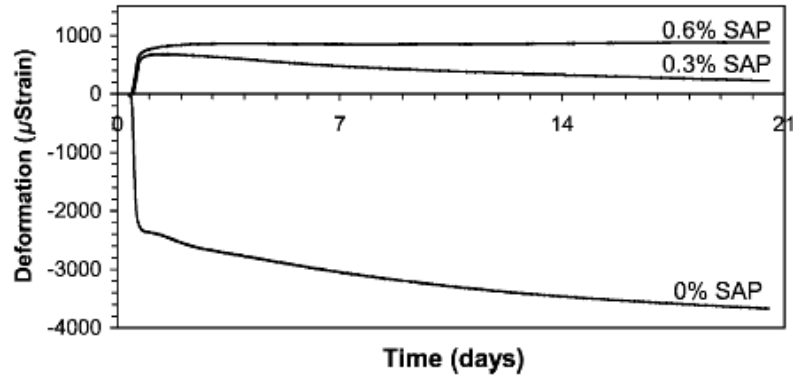


**Figura 12. Distribución volumétrica de fases de pasta de cemento en función del grado de hidratación, a una rel. a/c=0.6 y 0.3 respectivamente (38).**

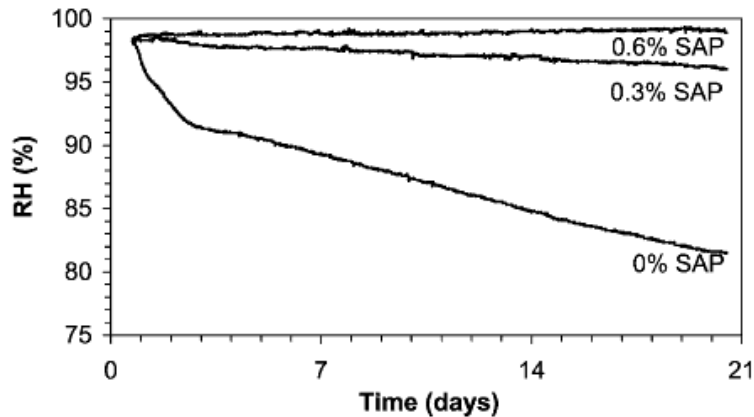
En la figura anterior se observan modelos de distribución de fases de pasta de cemento y el grado de hidratación alcanzado, se puede observar una hidratación parcial para una relación a/c= 0.3 y una hidratación total del

cemento para la relación a/c=0.6 pero con un mayor porcentaje de agua capilar (38).

En base a estos principios, se ha utilizado polímeros superabsorbentes (SAP's, por sus siglas en inglés) como agentes de curado interno, por su gran capacidad de absorción (34).



**Figura 13. Efecto la adición de PSA's sobre la deformación de pastas de cemento (% por peso de cemento) (34).**

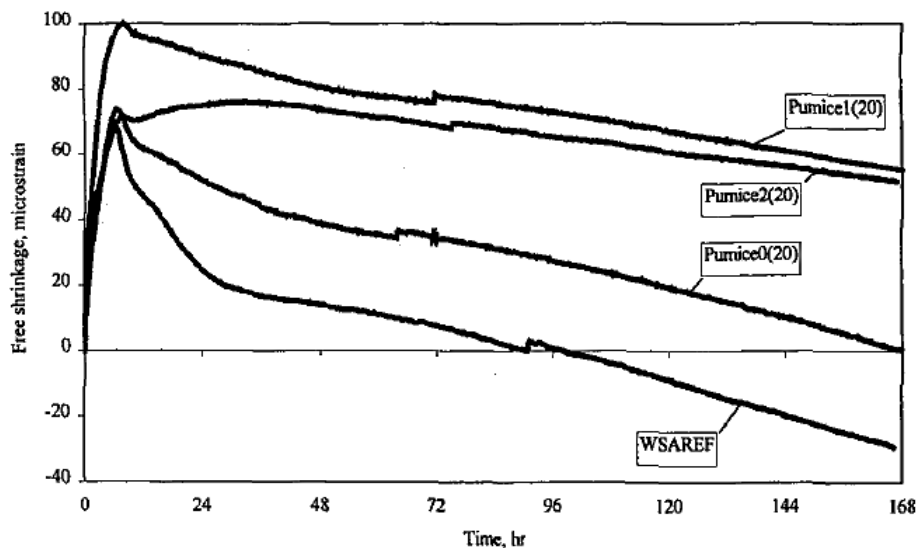


**Figura 14. Efecto de la adición de PSA's sobre la deformación de pastas de cemento (% por peso de cemento) (34).**

Con la adición de PSA's se ha logrado mantener una HR óptima en pastas de cemento y evitar la contracción. El problema del uso de estos polímeros son el cambio de tiempo de fraguado (ya que aumenta, siendo un factor que debe ser

considerado de acuerdo a elemento que se pueda fabricar) y la reología, separación de las partículas de PSA's durante el mezclado debido a los agregados (34).

El uso de agregados de distinto tamaño y la efectividad en el curado interno también se ha estudiado (39), las investigaciones respecto a esta variable han demostrado las mayores ventajas en el uso de agregado fino, debido a que la distribución sobre la pasta es más homogénea y se puede obtener un mayor volumen de pasta con agua disponible del agregado ligero, aunque se observó un mejor efecto sobre el agregado de mayor tamaño, argumentando que puede deberse a su mayor factor de eficiencia ( $\eta$ ), este factor se refiere a la capacidad del agregado para liberar el agua absorbida.



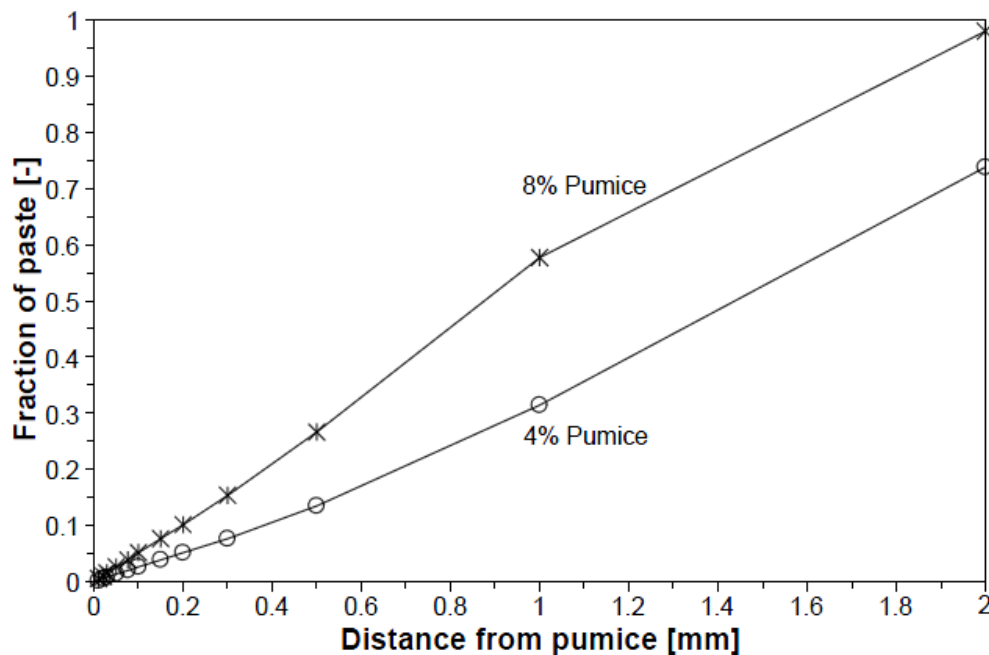
**Figura 15. Efecto del tamaño del agregado ligero presaturado sobre la disminución de la retracción (39).**

En la figura anterior, se utilizaron tres tamaños de agregado ligero (pumicita) siendo identificado con 0 el de menor tamaño, la mezcla identificada como WSAREF es la mezcla con agregado normal, pero con el agregado presaturado, lo cual también mostró un mejor comportamiento sobre la contracción (39).

Algunas otra propiedades se han medido en agregados ligeros como la desorción (40), ya que es un factor importante en el curado interno, esto porque no toda el agua absorbida por el agregado estará disponible para curado interno

por lo que se han hecho pruebas de desorción de los agregados, esto con ayuda de sales de potasio que mantienen la HR en valores constantes comenzando con el agregado desde un estado saturado. Además de que es un factor en la ecuación para el cálculo del agregado ligero necesario en sustitución para curado interno.

Algunas investigaciones (41), se han enfocado en la distancia o volumen de pasta protegido por efecto del curado interno como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 16. Fracción de pasta dentro de una cierta distancia del LWA calculado con un modelo para dos sustituciones distintas en morteros (41).**

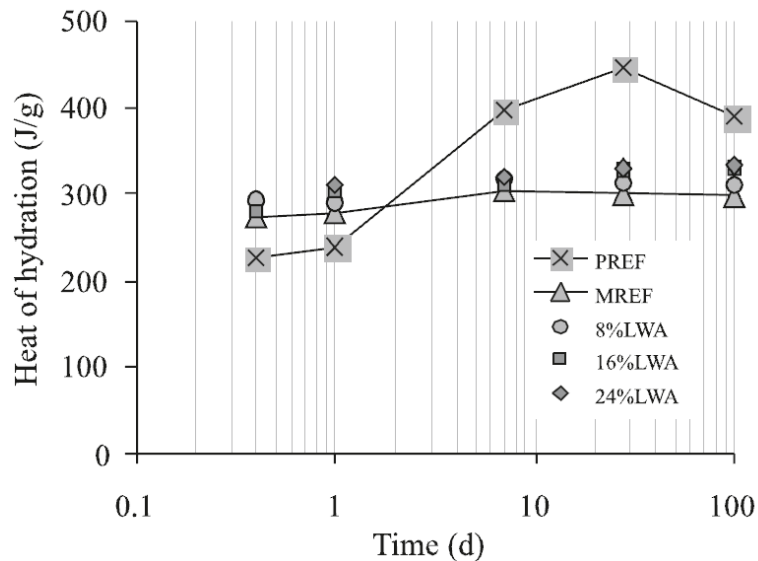
Se puede concluir que una mayor sustitución de agregado ligero nos aumenta la cantidad de pasta beneficiada dentro de una distancia de hasta 2 mm debido a que las distancias que se tienen entre LWA's se reducen (41).

Algunos autores han llevado a cabo también investigaciones en especímenes de gran tamaño (200x200x1000 mm) reforzados, concluyendo que de no controlarse la contracción autógena, se pueden presentar contracciones realmente importantes dentro de periodos de 24 horas llevando a una falla rápida bajo retracción restringida.

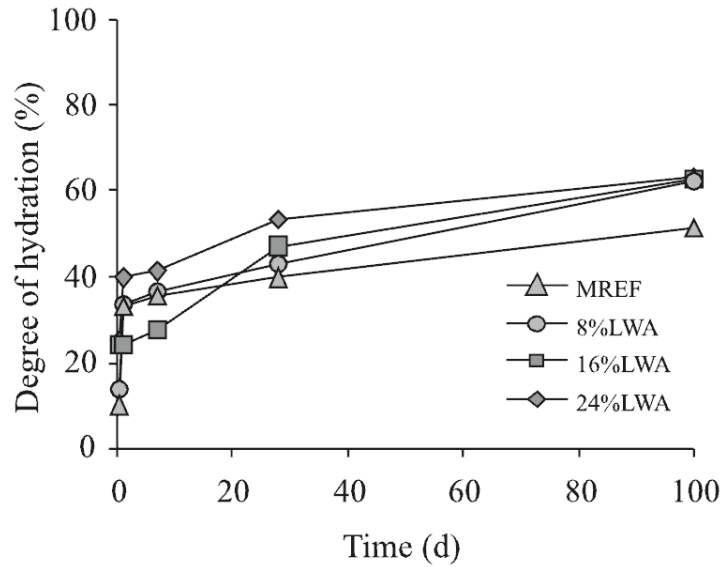
Además de que un 20% de la arena total brinda suficiente agua de curado interno para hidratar el cemento con el fin de eliminar la contracción autógena y

mantener la relación esfuerzo/resistencia por debajo del 50%. El contenido óptimo, de acuerdo a esta investigación, es un 25% en sustitución, además que en sustituciones de hasta un 20% no afectan negativamente la resistencia o el módulo elástico del concreto, ya que el agua suministrada por curado interno fue corregida del agua de la mezcla (42).

Además, la adición de agregado ligero como agente de curado ha mostrado tener efectos benéficos sobre el calor de hidratación, que al igual que la retracción también es un efecto de la hidratación, la adición de LWA disminuye el calor de hidratación, aunque un incremento en la sustitución, incrementa ligeramente el calor de hidratación, esto se debe a que las partículas de cemento pueden encontrar fácilmente agua para hidratarse, en consecuencia se puede lograr un mayor grado de hidratación (43).

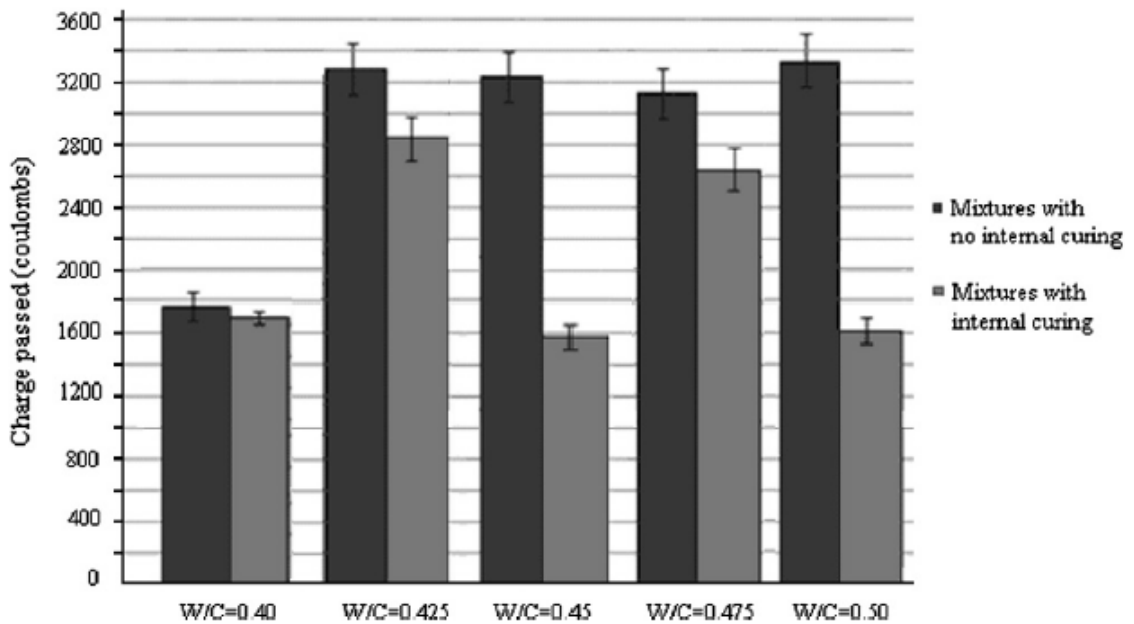


**Figura 17. Variación del calor de hidratación con el tiempo para pastas de referencia de cemento y morteros. PREF, pasta de referencia, MREF, mortero de referencia (43).**



**Figura 18. Efecto de uso de agregados ligeros sobre el grado de hidratación de morteros, MREF, mortero de referencia (43).**

El uso se ha propuesto no solo para concretos de alto desempeño, sino para concretos convencionales ( $a/mc > 0.40$ ), mostrando disminución de la difusión en pruebas de permeabilidad rápida a los cloruros (44).



**Figura 19. Permeabilidad rápida a los cloruros en concretos con y sin curado interno a 90 días, para diferentes rel. a/c (44).**

## 2.2.- Cementantes suplementarios.

Algunas investigaciones se han enfocado a promover el curado interno en morteros realizados con mezclas cementantes, las cuales se han concentrado en la depercolación de los poros capilares y como se modifica o se ve afectada a distintas edades de acuerdo al material suplementario utilizado. Siendo mucho más susceptible a edades tempranas el uso de humo de sílice seguido por la escoria y finalmente la ceniza volante (45).

Esta susceptibilidad se debe a la velocidad de reacción de cada material cementante, ya que por ejemplo, la ceniza volante reacciona a edades posteriores debido a que requiere de la hidratación de los silicatos de calcio para reaccionar con la portlandita que se forma, resultado de esta reacción.

Además de que la contracción química para cemento portland es de alrededor 0.07 gramos de agua por cada gramo de cemento, para humo de sílice, escoria y CV son de alrededor de 0.22, 0.18 y de 0.10 a 0.16 gramos respectivamente, mejor dicho, la cantidad de agua necesaria para hidratar cementantes suplementarios es más alta, por lo que el curado en este tipo de concretos es más crítico.

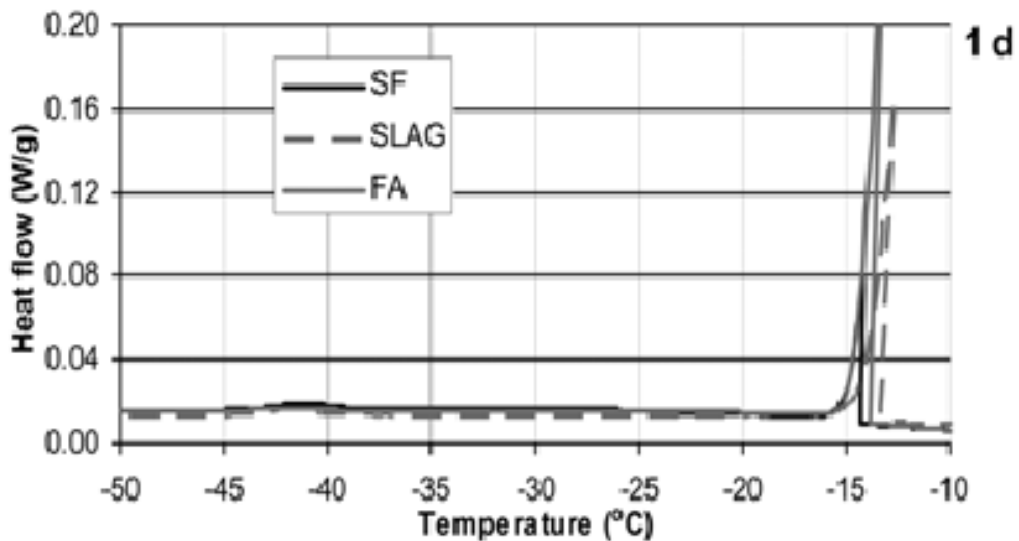


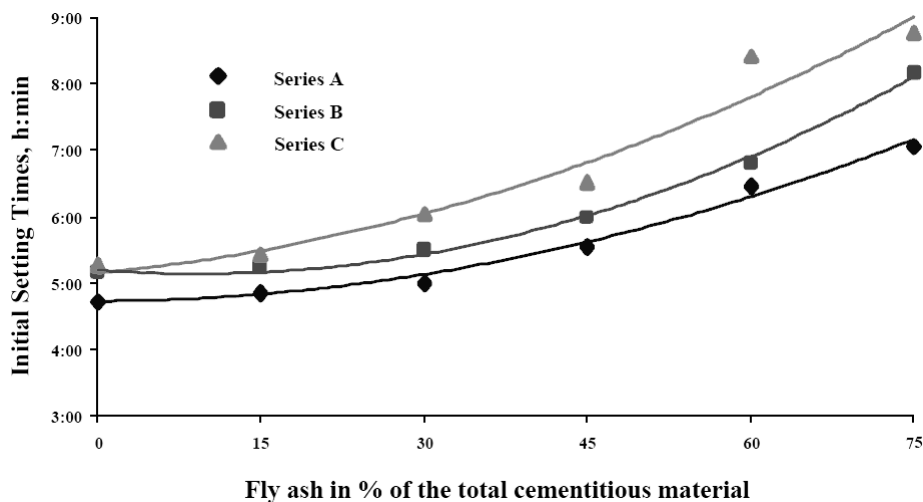
Figura 20. Escaneos de LTC para pastas de cemento mezcladas con  $w/cm=0.3$  (45).

La figura anterior, muestra un análisis de calorimetría de baja temperatura (LTC= Low temperature calorimetry) para pastas de cementos suplementarios



con una relación  $a/mc=0.3$ , en la cual un pico más grande indica una mayor cantidad de poros capilares percolados, lo cual indica una mayor reactividad de las pastas con humo de sílice a edades tempranas. En la figura 9 se muestra un análisis a 1 día.

El uso de ceniza volante en mezclas de concreto, tiene efectos también sobre la resistencia a distintas edades y sobre los tiempos de fraguado (inicial y final) ya que a mayores sustituciones de CV por cemento se aumenta considerablemente tanto el tiempo de fraguado inicial como el final, lo que puede ser un punto importante a considerar si se utilizan concretos con sustituciones de CV en elementos estructurales que requieran de una alta resistencia inicial. Cabe mencionar que la resistencia a compresión es menor a edades tempranas para estos concretos que para concretos normales debido a que la reactividad de la CV es más lenta (46).



**Figura 21. Tiempos de fraguado inicial para concretos con distintas relaciones  $a/mc$ ; A=0.5, B= .55 y C= 0.6 y distintos volúmenes de sustitución de CV (46).**

**Tabla 11. Resistencia a compresión de concretos con distintas relaciones a/mc y contenidos de CV (46).**

Series	FA (%)	Compressive strength (MPa)						
		Age (d)						
		1	3	7	14	21	28	56
A	0	15.0	26.9	35.1	38.8	41.4	43.5	44.9
	15	15.6	24.8	27.6	29.3	30.5	36.8	40.1
	30	11.7	21.2	24.1	26.2	30.0	32.5	35.5
	45	6.4	14.0	18.6	19.2	23.7	23.8	26.8
	60	4.4	7.2	10.1	11.9	13.8	16.8	17.2
	75	1.1	3.2	4.1	5.4	6.4	7.0	9.9
B	0	19.4	26.8	30.4	30.9	33.7	37.0	38.4
	15	12.5	24.3	27.9	29.8	30.2	32.4	35.7
	30	10.6	18.7	20.7	22.8	24.0	25.4	27.0
	45	5.7	11.4	12.9	18.0	19.0	19.6	21.5
	60	3.8	5.9	7.8	9.5	11.6	13.1	14.0
	75	--	2.6	3.4	4.3	5.5	6.0	7.9
C	0	16.1	22.5	26.3	31.9	29.0	32.1	34.5
	15	8.8	17.4	19.8	24.9	26.9	27.5	29.3
	30	7.5	11.6	16.7	18.5	20.1	21.3	24.5
	45	3.1	6.9	9.1	10.7	12.1	13.4	16.6
	60	--	4.6	6.7	7.9	9.4	9.8	12.6
	75	--	--	2.6	3.8	4.2	5.0	6.7

FA= Fly Ash

Otra propiedad importante a seguir es la de porcentaje de poros contenidos en morteros, que en estudios recientes se ha observado que éste porcentaje se ve reducido con la adición a mayores cantidades de CV. Sin embargo, ésta reducción puede verse afectada por el efecto de la carbonatación ya que entre muestras carbonatadas y no carbonatadas, se ve un aumento de la distribución de poros. (35).

**Tabla 12. Efecto de la carbonatación y el uso de CV (25%) sobre la distribución y el tamaño de poros en morteros (35).**

Condición	A/C	Porosidad Total %	Distribución del radio del poro %		
			Ultramacroporos	Macroporos	Mesoporos
			$r > 75,000 \text{ \AA}$	$300 \leq r \leq 75,000 \text{ \AA}$	$37 \leq r < 300 \text{ \AA}$
Mortero sin CV					
MNC	0.35	13.2	4	18	78
	0.45	14.5	3	35	62
	0.55	14.4	4	41	56
	0.65	17.4	3	52	45
MC	0.35	5.8	7	30	63
	0.45	8.5	7	38	55
	0.55	10.8	9	42	49
	0.65	14.3	5	57	38
Mortero con CV					
MNC	0.35	15.6	3	18	79
	0.45	17.4	3	38	59
	0.55	20.1	2	46	52
	0.65	24.3	2	50	48
MC	0.35	12.1	5	30	65
	0.45	13.3	6	38	56
	0.55	13.9	6	51	43
	0.65	16.6	6	58	36

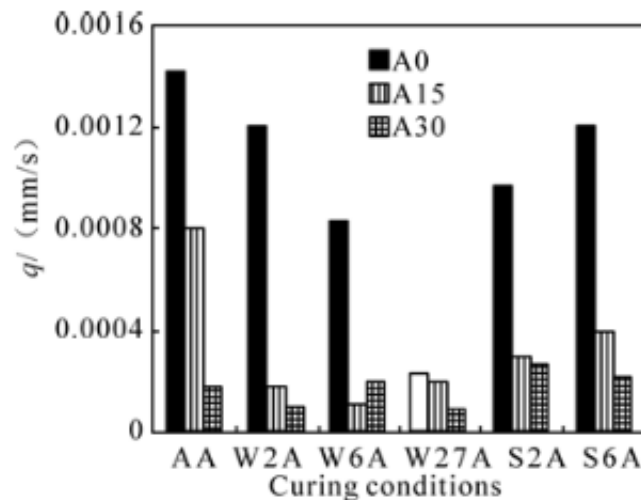
El cambio en el pH del mortero por efecto de la reacción puzolánica y por la carbonatación no es tan marcado como en un mortero normal. Como se observa en la tabla 13:

**Tabla 13. Efecto de la carbonatación y el uso de CV sobre el pH de morteros (35).**

Material	A/C, mortero sin CV				A/C, mortero con CV			
	0.35	0.45	0.55	0.65	0.35	0.45	0.55	0.65
Coeficiente de permeabilidad al agua ( $K$ , cm/s) $10^{-10}$								
MNC	0.07	0.75	1.31	10.10	0.08	0.73	1.20	9.00
pH antes y después del periodo de exposición								
Consumo de cemento, kg/m <sup>3</sup>	800.0	549.0	444.0	360.0	600.0	412.0	333.0	270.0
MNC	12.6	12.5	12.4	12.1	12.7	12.7	12.6	12.7
MC	11.3	9.0	8.5	8.1	11.3	10.3	9.9	8.7

La resistividad del concreto es un parámetro que se relaciona directamente con el contenido de humedad del mismo y también es sensible al contenido de ceniza volante y al régimen de curado. Como se ha demostrado en algunos estudios, el aumento del contenido de ceniza volante aumentar la resistividad de concreto, lo que indica una pérdida más rápida de agua. El curado también

tiene influencia sobre la permeabilidad al agua siendo significativa la reducción con el aumento del tiempo de curado y aún menor a sustituciones de CV de 15 y 30% (47).



**Figura 22. Influencia de las condiciones de curado sobre la permeabilidad al agua sobre la capa superficial del concreto. A0=CPO, A15, A30 = 15 y 30 por ciento de remplazo de CPO por FA (47).**

En la figura anterior se observa como la simple adición de CV disminuye significativamente la permeabilidad al agua y puede verse como regímenes de curado más largo son recomendables para obtener concretos de gran durabilidad consecuencia de la baja permeabilidad. Los concretos identificados con S2A y S6A indican un curado sellado por 2 y 6 días respectivamente, claramente se puede decir que las membranas de curado pueden tener un efecto menor que un curado por inmersión o riego por periodos prolongados.

### 2.3.- Carbonatación.

La carbonatación es el ingreso del  $\text{CO}_2$  del ambiente a través de la red de poros, el avance o rapidez con que se presenta, depende de la estructura, tamaño y la interconexión de los poros, estas características dependen principalmente de las relaciones  $a/mc$ , del uso de materiales cementantes (CV, humo de sílice, o escoria, etc.) y la cantidad o forma en que se apliquen (adición o sustitución) (35). El coeficiente de carbonatación tiende a ser mayor con una mayor sustitución de material cementante pero en general disminuye con el tiempo de curado y la edad del concreto (48).

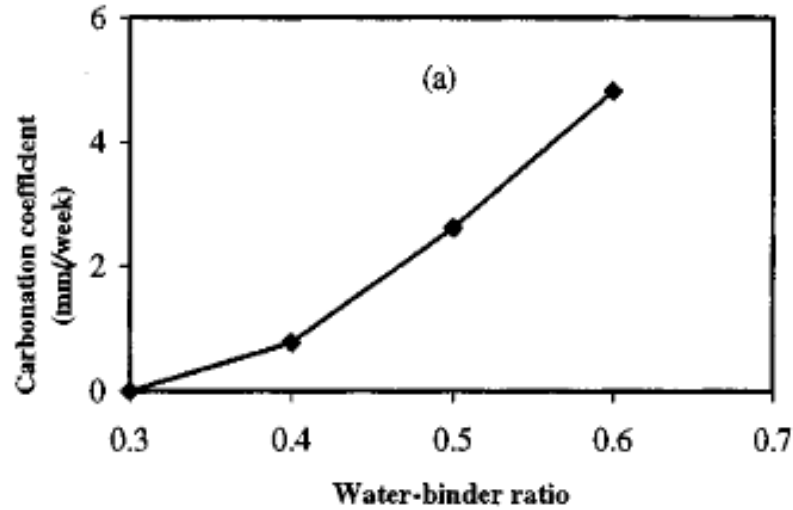


Figura 23. Efecto de la rel. a/mc sobre el coeficiente de carbonatación (48).

Normalmente la carbonatación es más alta en morteros con sustituciones cementantes debido a que la reacción puzolánica consume principalmente el hidróxido de calcio (de pH alcalino) disminuyendo el pH del concreto. El área superficial está relacionada con la reactividad de los materiales cementantes y también, en la siguiente figura se observa que un aumento en el área superficial de cementos con escoria, disminuye el coeficiente de carbonatación (48).

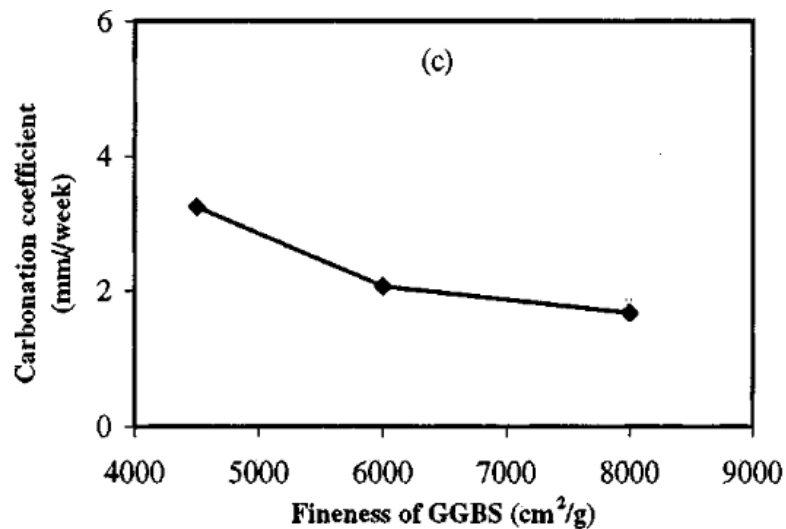


Figura 24. Relación entre el coeficiente de carbonatación y el área superficial de escoria en concretos con rel. a/mc= 0.5 (48).

## 2.4.- Cloruros.

La exposición de estructuras de concreto a ambientes con altos contenidos de cloruros, es uno de los factores que generan mayores costos debido a la corrosión que generan sobre el concreto.

Investigaciones realizadas (49), han focalizado sus estudios en distintas áreas. La difusión es uno de los principales temas de interés, ya que al disminuir la difusión, de especies químicas en el concreto, se alarga su vida útil, se disminuyen sus costos por mantenimiento y se brinda una mayor seguridad a los usuarios de las obras.

El efecto de la carga sobre la difusión de los iones cloro es un factor que puede implicar daños, demostrándose que la difusión de iones cloro y el ingreso del  $\text{CO}_2$  es menor en zonas de compresión que en zonas de tensión, de elementos estructurales. Esto debido al incremento de la porosidad resultado del daño en la interface agregado /pasta (49).

Nagataki et. al. investigaron la concentración de iones cloruro, ligadas y totales en concretos, morteros y pastas. Encontraron que la concentración de  $\text{Cl}^-$  puede ser mayor dentro de concretos expuestos a ambientes marinos que la del agua que las rodea, además de presentar una mayor concentración sobre la superficie del acero de refuerzo que en la misma profundidad de concretos sin refuerzo y expuestos a las mismas condiciones (50).

Un punto fuerte de esta investigación es analizar el contenido óptimo de cloruros que pueden provocar o iniciar la corrosión del acero embebido en concreto. Aunque ya varias investigaciones se han hecho al respecto, no hay suficiente información, debido a la variabilidad con que se presentan los resultados y a las mediciones utilizadas para obtener los resultados.

De acuerdo a C. Alonso et. al. las mediciones utilizadas como base para estimar la despasivación del acero son: cambios en el potencial de corrosión, inspección visual, polarización anódica, velocidad de corrosión promedio, velocidad de corrosión, incremento en la densidad de corriente, asumiendo un umbral de  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  de 0.3, corrientes de macro celdas, pérdida de masa e impedancia AC. La medición más recomendable es por medio de velocidades de corrosión (51).

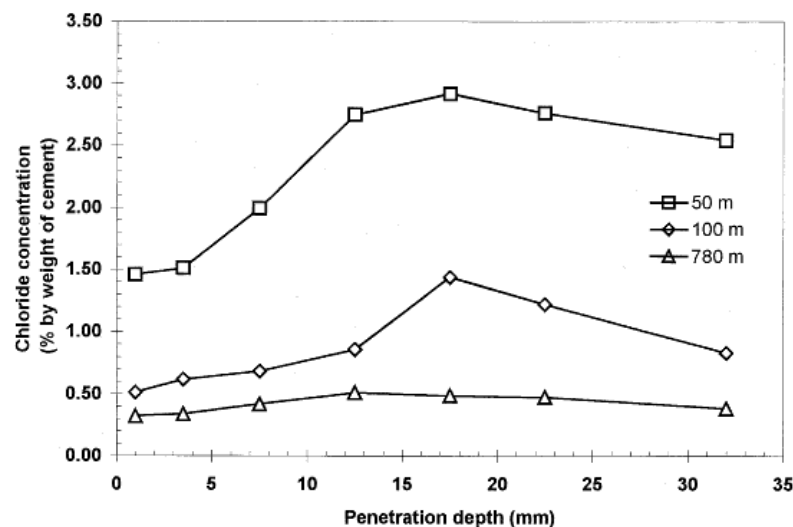
En cuanto a la forma de presentar los resultados van desde cloruros libres en porcentaje por peso de cemento, cloruros totales en porcentaje por peso de cemento y relaciones  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ .

Además de que los ambientes varían en cuanto a si es una solución, CPO, cementos con cementantes complementarios, concretos, etc. Dicho lo anterior, es difícil especificar un contenido como umbral de cloruros (51).

Se ha encontrado también que el umbral de cloruros puede disminuir con el incremento de la sustitución de ceniza volante, debido a que el uso de esta adición puede densificar aún más la matriz cementante, disminuyendo así la difusión de iones y agentes químicos (52).

Hobbs (53), elaboró algunos modelos de difusión, concluyendo que el tipo de agregado es importante para el ingreso de iones cloro y no solo el contenido de pasta, ya que si el coeficiente de difusión del agregado varía de 10 a 0.2 veces el de la pasta de cemento, puede producir variaciones de 10:1 en el coeficiente de difusión del concreto. Siendo que el coeficiente se ve influenciado por el tipo y tamaño de agregado, Brown y Beeby (54) también observaron que las profundidades de carbonatación fueron 90% más grandes para concretos de agregado grueso ligero que para concretos con agregado grueso denso.

En sí, la difusión de cloruros es un proceso complejo, ya que como describe Castro et. al, los perfiles de cloruros pueden verse modificados por las condiciones ambientales como HR, temperatura, agresividad del ambiente y en el caso de estructuras cercanas al mar, los perfiles pueden ser iguales o muy parecidos, aunque la concentración es menor a mayor distancia (55).



**Figura 25. Perfiles de concentración de cloruros de concretos con rel. a/c de 0.53, 3 días de curado, expuestos por 24 meses a 50,100 y 780 m de la costa (55).**

En estructuras expuestas a ambientes marinos se presenta el efecto de dos capas con distinta humedad, el espesor de estas capas depende de la calidad del concreto, ya que una se mantiene húmeda (núcleo) por el efecto higroscópico del concreto y la otra varía su humedad de acuerdo a los cambios en el ambiente (capa más externa).

Se debe considerar que las mediciones hechas en ambientes naturales y en condiciones controladas en laboratorio pueden tener cierta diferencia debido a la variabilidad de las condiciones del ambiente en donde se exponen los especímenes de concreto, Castellote, et. al, determinaron umbrales de cloruros para despasivación por medio de la aplicación de voltaje para la migración de cloruros y por medio de difusión, encontrando valores cercanos entre ambas condiciones, aunque se requieren más pruebas en distintos materiales como concretos, sustituciones, etc. para verificar la efectividad de la prueba (56).

La difusión en concretos con LWA fue investigado por Liu et. al (57), concluyendo que concretos con sustituciones de agregado grueso tienen una resistencia a la difusión de iones cloro, permeabilidad y porosidad similar a la de un concreto de agregado de peso normal, aunque al utilizar agregados cada vez más finos de peso ligero en conjunto con agregado grueso ligero, se aumentan dichos parámetros.

## **2.5.- Aditivos reductores de retracción (SRA).**

En el año de 1996, Balogh (58) publicó un artículo sobre los efectos de un nuevo aditivo enfocado a la disminución de la contracción por secado y sobre los beneficios que el uso del aditivo brinda al concreto, este era una de las primeras publicaciones respecto a las cualidades de este aditivo.

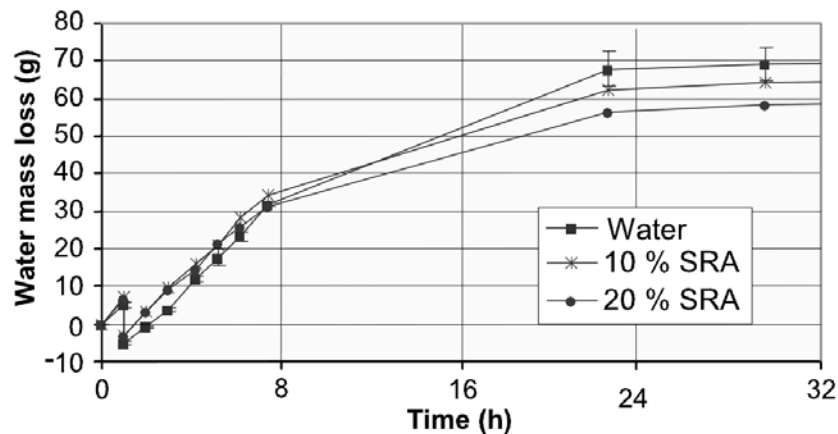
Desde entonces se han publicado investigaciones sobre el uso de este aditivo y su efectividad en cementantes, He et. al. (59), realizó pruebas sobre pastas y morteros, monitoreando la evolución del proceso de hidratación por medio de pruebas de resistividad, concluyendo que a mayor cantidad de SRA se retrasa la hidratación del cemento, aunque puede deberse especial precaución en estructuras de concreto masivo, ya que mostró tener una mayor velocidad de hidratación.

La hidratación, como ya se ha dicho, es una característica modificada por el uso de SRA's. Bentz (60), encontró que el uso de este aditivo puede afectar los perfiles de secado y reducir la contracción a edades tempranas, aunque de



acuerdo a estudios de LTC realizados en la misma investigación demostraron que el adicionar estos aditivos se incrementa el contenido de agua susceptible al congelamiento por lo que exhorta a tener especial cuidado en concretos expuestos en climas fríos. Relativo a la difusión, puede verse disminuida, por el incremento en la viscosidad de la solución de poro, reduciendo el ingreso de los iones deletéreos.

Los SRA se han utilizado también como soluciones aplicadas sobre la superficie de morteros con relaciones  $a/c=0.4$ , se observó que el uso de esta solución reducía la pérdida de masa de los morteros consecuencia de una menor pérdida de humedad (61).



**Figura 26. Pérdida de agua evaporada con respecto al tiempo en morteros con aplicación de líquidos externos después de una hora, el líquido aplicado son agua, y dos soluciones con SRA (61).**

## 2.6.- Método VERDiCT.

El uso de los aditivos para mejorar el desempeño del concreto tiene muchas ventajas como aumento en la durabilidad, inhibición de la corrosión, anti deslave, SRA, pero tienen como desventaja que modifican algunas propiedades en estado fresco. D. P. Bentz (62), propuso el uso de agregado ligero no solo como una forma de suministrar agua para curado interno, sino como un vehículo para reservar soluciones o mezclas de aditivo con el objetivo de que no afecten el comportamiento en estado fresco de la mezcla, como el uso de SRA, en su investigación compara el desempeño del agregado ligero y la

diferencia entre adicionar el aditivo a la mezcla o preparar una solución con la que se satura el agregado ligero previo a la preparación de la mezcla este término lo denominó con el acrónimo de FLAIR (Fine Lightweight Aggregates as Internal Reservoirs).

Un método propuesto por Dale P. Bentz (63) se basa en el método FLAIR pero con el nombre de VERDiCT (Viscosity Enhancers Reducing Diffusion in Concrete Technology), respecto a su trabajo, hizo investigación sobre morteros, con agregado ligero saturado en una solución de 50% de un aditivo modificador de la viscosidad en agua, en este caso un reductor de retracción.

El objetivo de este método es disminuir la difusión de algunas especies dañinas, aumentando la viscosidad de la solución de poro, una ecuación que describe la difusión de especies iónicas es la siguiente:

$$D_o = \frac{k_B T}{6\pi\eta_0 r} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Esta es la relación Stokes-Einstein (64), donde  $D_o$  es el coeficiente de difusión propio de un ion,  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura,  $r$  es el radio de la partícula que se difunde y  $\eta$  es la viscosidad de la partícula que se difunde.

Lo que significa que al incrementar la viscosidad se disminuye la difusión de la partícula.

VERDiCT consiste precisamente en el uso de soluciones de mayor viscosidad introducidas por medio del curado interno para incrementar la durabilidad del concreto.

Por medio del uso de este método, se observó una disminución en el ingreso de cloruros detectado por medio de la aplicación de  $\text{AgNO}_3$  a 28 y 56 días, la disminución del ingreso de los cloruros fue mejor para el método VERDiCT en varias condiciones, esta condiciones eran: el uso de la solución sobre la superficie y la misma solución presaturada en agregado ligero, mostrando un menor ingreso de cloruros en la mezcla donde se utilizó agregado ligero como vehículo para el ingreso de la solución con respecto a la mezcla de control. La absorción en los morteros de referencia expuestos en soluciones de curado tuvieron un mayor ingreso de cloruros, esto de acuerdo a Bentz et. al. (63), se

debe a que la desecación es mayor en los morteros normales que en los que se utilizó el método VERDiCT, lo que genera una mayor absorción y como consecuencia un mayor avance, aunque se alenta a probar el método en más materiales, como concreto.

### **3.- Objetivos.**

#### **Objetivo general**

Evaluar la calidad de la matriz cementante en distintas mezclas de concreto expuestas a un ambiente industrial, que utilizan la combinación del curado interno, aditivos reductores de la retracción y ceniza volante, con la finalidad de mejorar la durabilidad, disminuir la permeabilidad y reducir la retracción autógena.

#### **Objetivos específicos**

- Comparar las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad y resistencia a compresión) a diferentes edades de exposición al ambiente industrial (7, 28, 90 y 180 días) y compararlas con sistemas de control previamente establecidos.
- Determinar los perfiles de cloruros mediante el método potenciostático y colorimétrico a diferentes edades de exposición al ambiente industrial.
- Determinar el avance de la carbonatación mediante métodos químicos de los especímenes expuestos a ambiente industrial.
- Determinación del umbral de cloruros necesario para despasivar al acero a diferentes edades de exposición al ambiente industrial.
- Identificar los beneficios y desventajas de la utilización del SRA en sinergia con el AL (Agregado Ligero).

#### **4.- Hipótesis.**

La combinación de ambos sistemas (curado interno y adición del aditivo) reducen en mayor proporción las retracciones que se presentan en los concretos de alto desempeño disminuyendo así el agrietamiento y por lo tanto la difusión de agentes externos en conjunto con bajas relaciones agua/cementante, generando más retención de agua disponible dentro de la muestra para el curado interno para evitarla autodesecación.

## **5.- Metodología experimental.**

### **5.1.- Materiales.**

A continuación se describirán los materiales utilizados en la fabricación de los especímenes utilizados a lo largo de la investigación.

#### **5.1.1.- Cemento.**

El cemento utilizado en la experimentación es un Cemento Portland Ordinario 40 (CPO 40) de una marca disponible en la región, cumple con la norma NMX C 414 (2), con una composición del 90 al 95% de clínker y yeso, marcando el resto como componentes minoritarios.

De acuerdo a su clase resistente CPO 40 tiene una resistencia a la compresión mínima de 40 N/mm<sup>2</sup> a los 28 días.

En la siguiente tabla se muestra la composición química obtenida por medio de FRX del cemento utilizado.

**Tabla 14. Composición química del CPO 40**

Compuesto o característica	Contenido (%)
CaO	65.49
SiO <sub>2</sub>	20.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.84
K <sub>2</sub> O	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.37
MgO	1.68
SO <sub>3</sub>	1.99
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12
TiO <sub>2</sub>	0.22
Cr <sub>2</sub> O	0.07
MnO	0.06
NiO	0.01
ZrO <sub>2</sub>	0.00
HfO <sub>2</sub>	0.00
PPI	0.00

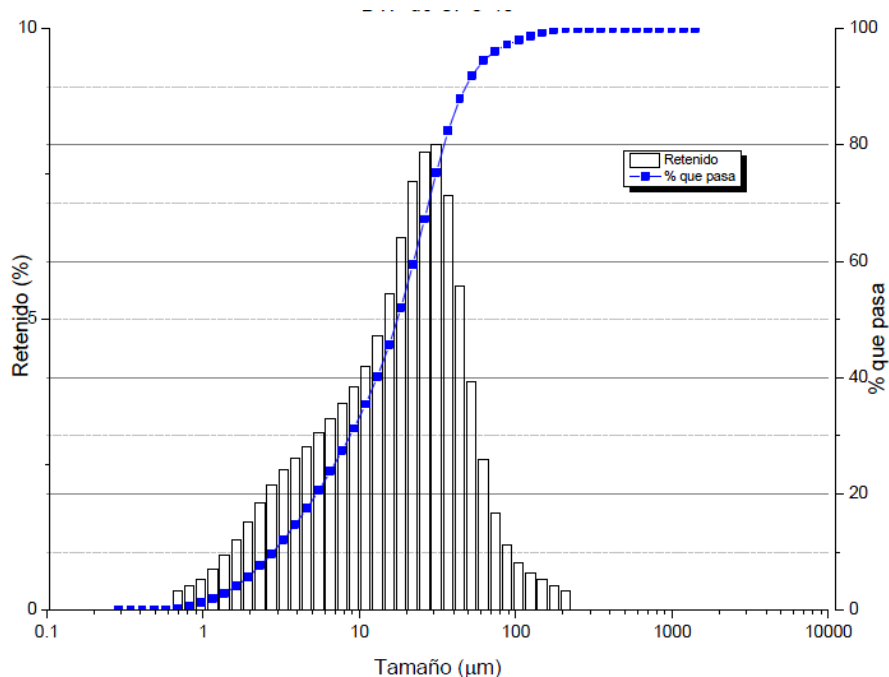
En cuanto a los tiempos de fraguado, la norma establece para este tipo de cemento un fraguado inicial mínimo de 45 minutos y un fraguado final máximo de 600 min.

Densidad del cemento.

La densidad se obtuvo por medio de la norma ASTM C 188 (65) para densidad de cemento hidráulico, obteniendo una densidad de 3.14 g/cm<sup>3</sup>.

Distribución de tamaño de partícula.

La distribución de tamaño de partícula o DTP por sus iniciales es una prueba para obtener el tamaño de las partículas en materiales muy finos así como su contenido.



**Figura 27. Distribución de tamaño de partícula del CPO 40.**

5.1.2.- Ceniza volante

La ceniza volante utilizada en esta investigación es de tipo F de acuerdo a la norma ASTM C 618 (5). Donde se describe como:

“Ceniza normalmente producida de la quema de antracita o carbón bituminoso”

De acuerdo a la norma, esta ceniza cuenta con las siguientes características:

**Tabla 15. Requerimientos para la ceniza volante tipo F de acuerdo a ASTM C-618 (5).**

Compuesto químico	Contenido (%)
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ), más óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), más óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	70.0 (mín.)
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	5.0 (máx.)
Contenido de humedad	3.0 (máx.)
Pérdida por ignición	6.0 (máx.)



## Composición

La composición de la ceniza volante se evaluó por medio de un análisis de fluorescencia de rayos X. En la siguiente tabla se muestra su composición de la cual la suma de los óxidos de aluminio, silicio y hierro es 93.8%:

**Tabla 16. Composición química de la CV**

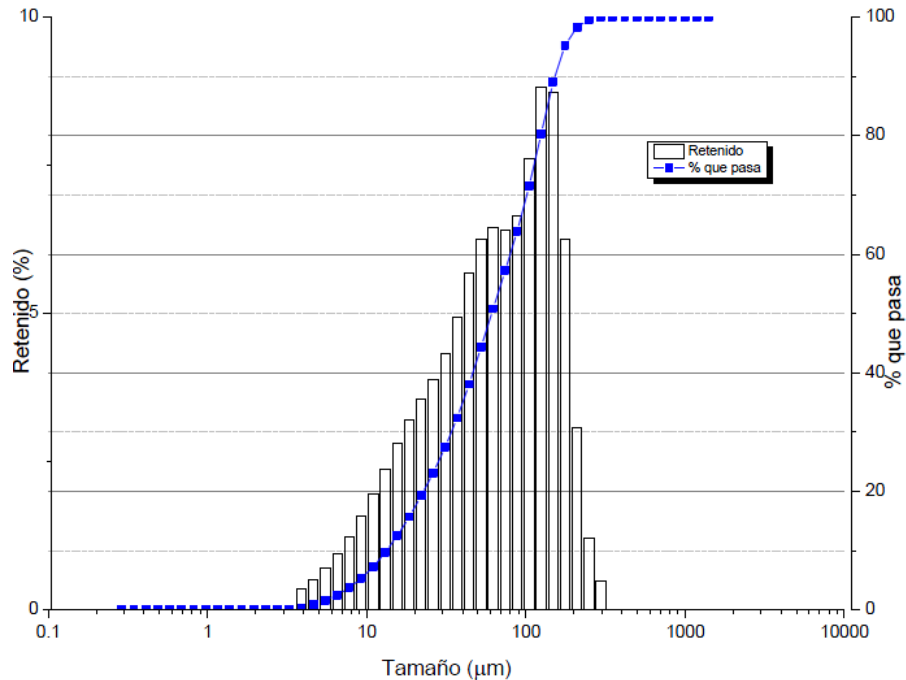
Compuesto o característica	Contenido (%)
CaO	2.29
SiO <sub>2</sub>	63.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.01
K <sub>2</sub> O	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.64
MgO	0.01
SO <sub>3</sub>	0.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.93
Cr <sub>2</sub> O	0.05
MnO	0.01
NiO	0.00
ZrO <sub>2</sub>	0.00
HfO <sub>2</sub>	0.00
PPI	0.04

## Densidad.

La densidad se evaluó de acuerdo a la norma ASTM C 188 de acuerdo a las recomendaciones de la norma ASTM C 311 (66). La densidad obtenida para esta ceniza volante fue de 2.64 g/cm<sup>3</sup>.

## Distribución de tamaño de partícula.

Al igual que el cemento se realizó un análisis para observar la distribución de las partículas y obtener el tamaño promedio de partícula del cual se muestra la distribución en la siguiente figura:



**Figura 28. Distribución de tamaño de partícula de la CV**

### 5.1.3.- Agregados.

#### Agregado grueso.

El agregado grueso utilizado fue de tipo calizo, con un tamaño máximo de partícula de 19 mm (3/4 pulg.), extraídos en la región, su composición es principalmente carbonato de calcio, de tono gris claro, algunas.

#### Agregado fino.

En este trabajo se utilizaron dos tipos de agregado fino, uno de tipo calizo al igual que el agregado grueso y un agregado fino del tipo pumicita.

#### Agregado fino de caliza.

El agregado fino de piedra caliza se utilizó como se encontraba, sin darle ningún otro tratamiento, las propiedades más importantes se describen más adelante.

Agregado fino de pumicita.

La pumicita se utilizó como agregado ligero en sustitución como vehículo para el curado interno, debido a su alta capacidad de absorción, sus propiedades al igual de las de los agregados mencionados anteriormente se describen más adelante.

#### 5.1.3.1.- Peso volumétrico.

El peso volumétrico es un parámetro importante para el diseño de la mezcla que nos indica la masa del material en un metro cúbico este se obtiene mediante la norma ASTM C 29 (67).

#### 5.1.3.2.- Absorción.

La absorción del agregado grueso se obtuvo mediante la norma ASTM C127 (68), este parámetro es importante para conocer la capacidad de absorción de agua de los agregados para de esta manera tomarla en cuenta y adicionarla a la mezcla para no afectar el contenido de agua.

#### 5.1.3.3.- Densidad.

La densidad del agregado se obtiene mediante la norma ASTM C127 esta medición considera el peso del material por metro cúbico excluyendo los vacíos entre agregados, esto se hace por medio de la saturación de los agregados por 24 horas y secándolos superficialmente para obtener su peso SSS y su volumen por medio de un picnómetro.

Para la evaluación de la densidad, se debe tener especial cuidado al igual que en la prueba de absorción, ya que el material puede pasar rápidamente del estado sobre saturado al insaturado y es de especial cuidado ya que la condición de importancia es la saturada superficialmente seca (SSS).

**Tabla 17. Características físicas de los agregados**

Agregado	Peso volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad (%)	Absorción (%)
Grueso	1543.3	2.66	0.63
F. Caliza	1596.7	2.63	2.25
F. pumicita	849.36	1.57	33

#### 5.1.3.4.- Granulometría

La granulometría se obtuvo mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C 136 (69), en la siguiente tabla se muestra su distribución:

##### 5.1.3.4.1.- Granulometría del agregado grueso

**Tabla 18. Granulometría del agregado grueso**

Malla	Retenido (%)	Pasa (%)
1"	0	100.00
3/4"	9.35	90.65
1/2"	46.12	44.53
3/8"	25.94	18.60
#4	16.43	2.17
Pasa	2.17	0.00

##### 5.1.3.4.2.- Granulometría de agregados finos.

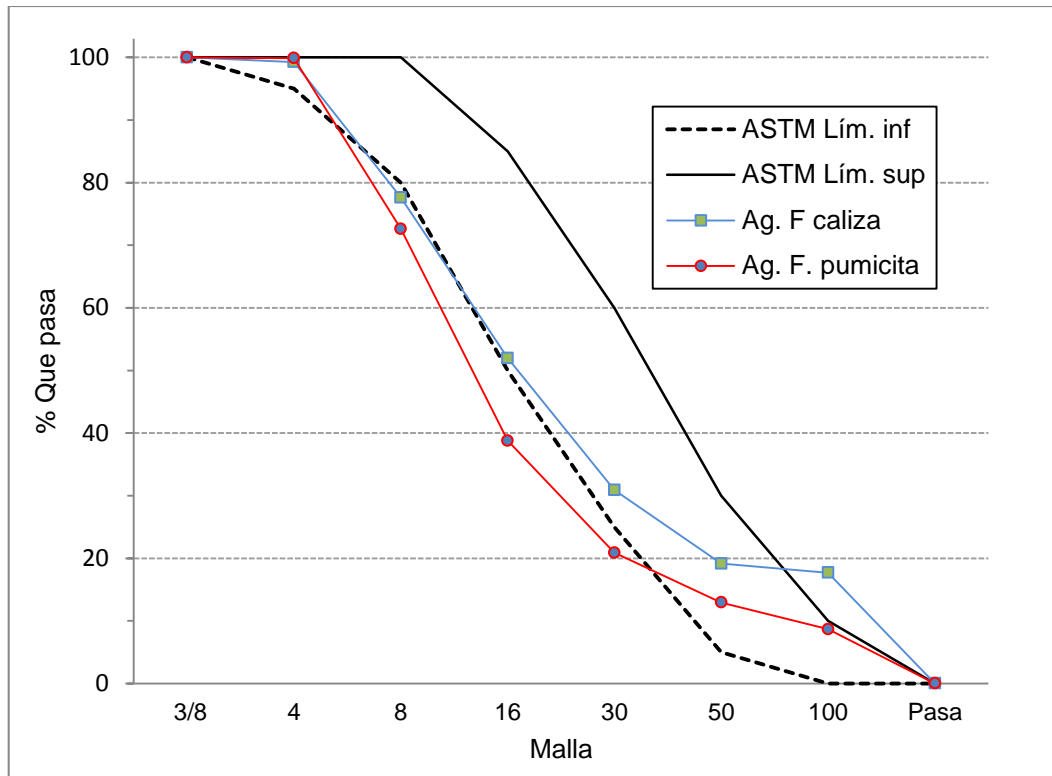
La distribución del agregado fino se muestra en la siguiente tabla y una comparación con las propiedades recomendadas por la norma ASTM C-33 (70) se muestra en la figura 3.

**Tabla 19. Granulometría del agregado calizo**

Malla	% Retenido	%Pasa
3/8	0.00	100.00
4	0.73	99.27
8	21.65	77.61
16	25.65	51.96
30	21.04	30.91
50	11.76	19.15
100	1.47	17.68
Pasa	17.68	0.00

**Tabla 20. Granulometría de pumicita**

Malla	% Retenido	% Pasa
3/8	0	100
4	0.13	99.87
8	27.27	72.60
16	33.84	38.76
30	17.88	20.88
50	7.95	12.93
100	4.27	8.66
Pasa	8.66	0.00



**Figura 29. Comparación granulométrica de agregados finos**

#### 5.1.3.5.- Desorción.

La desorción nos permite conocer el agua que se puede liberar de un material, esta depende de las características del material, tamaño de poro, granulometría, HR del ambiente en el que se encuentra el material, temperatura, etc. Por lo que para conocer la cantidad aproximada del agua obtenida del material suministrado al concreto en sustitución de agregado fino de peso normal se realizó esta prueba en el laboratorio por medio del uso de una cámara ambiental. La norma que describe el procedimiento es la norma ASTM C1498 (71).

#### 5.1.4.- Agua.

El agua utilizada para la elaboración de las mezclas de concreto fue agua potable, la cual es aceptable para concretos.

#### 5.1.5.- Acero.

En la elaboración de las probetas para las pruebas electroquímicas, se utilizó acero grado 42, cuyas especificaciones de acuerdo al fabricante son las siguientes:

Las especificaciones con las que debe cumplir de acuerdo a la norma NMX-C-407-ONNCCE son las siguientes:

**Tabla 21. Especificaciones del acero de acuerdo a norma mexicana.**

Característica	Dimensión o cantidad
Número de designación	3 (3/8")
Masa nominal (kg/m)	0.560
Área de la sección transversal (mm <sup>2</sup> )	71
Perímetro (mm)	29.8
Resistencia a la tensión mínima (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	63
Esfuerzo de fluencia mínimo (kg <sub>f</sub> /mm <sup>2</sup> )	42

#### 5.1.6.- Aditivos.

Durante la investigación se utilizaron dos tipos de aditivos de la marca BASF, en el proceso de investigación, se elaboraron pruebas como densidad y contenido de agua. El contenido de agua es útil para tomar en cuenta el agua disuelta en el aditivo y tomarla como agua de mezcla.

##### 5.1.6.1.- Glenium 3030 NS.

El Glenium 3030 NS es un aditivo reductor de alto rango (HRWR), a base de éter de carboxilato.

En la ficha técnica del producto se muestran las características que modifica, como tiempos de fraguado, resistencia a la compresión, retención de asentamiento y dosificaciones que varían de acuerdo al tipo de aplicación. Para conocer su contenido de agua y tomarla en cuenta en la mezcla, se tomaron 100 gramos de aditivo y se colocaron en una charola de peso conocido, para colocarla en el horno de secado a una temperatura de 105°C por 24 hr. De este procedimiento se calculó un contenido de agua del 80%, después del procedimiento quedaron residuos de polvo sobre el fondo del recipiente

#### 5.1.6.2.- Masterlife SRA 20.

El Masterlife SRA 20 es un aditivo reductor de retracción (SRA). Algunos datos proporcionados son la dosificación que va de 1.0 a 2.5% de cementante, además de un posible incremento de la velocidad de sangrado (10% más), retraso en el tiempo de fraguado dependiente de la dosificación y la temperatura.

Adicionalmente al igual que el aditivo reductor de agua se obtuvo el contenido de agua el cual fue de 37.63% y es un aditivo a base de oxirano, metil-, polímero con oxirano y éter monobutil. A diferencia del HRWR, el SRA mostró a las 24 horas un líquido de consistencia parecida al aceite debido a sus compuestos.

#### 5.1.7.- Concreto.

Para la experimentación se hizo una propuesta de 7 mezclas con distintas características, en dichas mezclas se mantuvo constante la relación agua-material cementante ( $a/mc=0.4$ ). El contenido de cementante se fijó en  $425 \text{ kg/m}^3$  de acuerdo con pruebas realizadas anteriormente para lograr un revenimiento de  $15 \pm 2$  cms. Además se utilizó sustitución en algunas mezclas de 20% de volumen aproximado en sustitución de agregado fino de peso normal por agregado ligero, esto utilizarlo como reserva de agua para hidratación del cemento.

##### 5.1.7.1.- Descripción de las mezclas:

###### 5.1.7.1.1.- Mezcla de referencia.

La mezcla de referencia se elaboró solo con cemento portland agregados (grueso, fino), agua y aditivo reductor de agua. En base a las pruebas preliminares se buscó un revenimiento de  $15 \pm 2$  cms. Esta mezcla se identificó como R.



#### 5.1.7.1.2.- Sustitución de agregado ligero.

Las mezclas con agregado ligero son cuatro, en estas mezclas se hizo una sustitución del 20%~ en volumen de agregado fino de peso normal.

#### 5.1.7.1.3.- Aditivo reductor de retracción.

Para la adición del aditivo reductor de retracción se utilizaron dos métodos diferentes, esto con el fin de observar las diferencias que presenta en el concreto.

El primer método fue utilizarlo como una adición al momento del mezclado del concreto, adicionando la cantidad máxima recomendada por el fabricante, la cual es del 2.5% del material cementante denominado.

El segundo método fue utilizarlo como agente de curado interno, por medio del agregado ligero. Para lograr este objetivo, se preparó una solución de 50:50 agua: aditivo reductor de retracción, en la cual se colocó el agregado ligero para saturarlo durante 24 horas, este es el método VERDiCT.

#### 5.1.7.1.4.- Ceniza volante.

La ceniza volante se utilizó en sustitución de cemento en peso, utilizando un 20% de sustitución, el objetivo de utilizar la CV es para observar el efecto que tiene en las propiedades del concreto con agregado ligero y uso de ARR.

**Tabla 22. Características de las mezclas.**

Id. Mezcla	IC	SRA	Solución SRA:Agua	FA
R				
IC	x			
SRA		x		
IC-SRA	x	x		
V	x		x	
FA				x
FA-V	x		x	x

IC: Sustitución de agregado normal por agregado ligero

SRA: Aditivo reductor de retracción en la dosificación máxima recomendada por el fabricante

V: Saturación del agregado ligero en la solución 50:50

CV: Sustitución de CPO por ceniza volante.

Resumen de mezclas.

Mezcla R.

Mezcla de referencia elaborada solo con agregados de peso normal, cemento, agua y aditivo reductor de agua.

Mezcla IC.

Mezcla de referencia con una sustitución de agregado fino de peso normal por agregado ligero o pumicita, aproximadamente un 20% en volumen.

Mezcla SRA

Mezcla de referencia (R) con una adición de SRA en la mezcla de acuerdo a la dosificación máxima recomendada por el fabricante.

Mezcla IC-SRA.

Mezcla en la que se sustituyó un 20% en volumen de agregado fino de peso normal por pumicita y se adicionó SRA de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

Mezcla V.

En esta mezcla se utilizó el método VERDiCT con la sustitución de 20% aproximadamente de agregado fino de peso normal por agregado ligero y saturado en la solución de 50% agua y 50% aditivo.

Mezcla FA.

Esta mezcla es similar a la de referencia pero con una sustitución del 20% de CPO 40 en peso por ceniza volante.

Mezcla FA-V.

Mezcla con sustitución de CPO 40 por ceniza volante y curado interno con agregado ligero saturado en solución al igual que la mezcla V.

#### 5.1.7.2.- Elaboración.

Para la fabricación del concreto se llevaron a cabo las siguientes tareas:

1. Saturación del agregado ligero 24 horas antes de la elaboración de la mezcla (en el caso de las mezclas que lo requerían).  
Para la preparación del agregado, se calculó primero el peso seco del material necesario para la bachada, posteriormente se preparaba el agua o la solución necesaria para saturar ese agregado. Finalmente se añade el agua o la solución al agregado en un bote limpio y se mantuvo tapado durante el lapso de saturación.
2. El día de la elaboración de la mezcla se obtuvo la humedad de obra de los agregados de peso normal para realizar las correcciones de agua necesarias.
3. Se pesó la cantidad de material necesario de: agua, cemento, CV (en caso de requerirlo, aditivo reductor de agua, SRA (en caso de ir en la mezcla) y agregados.

#### 5.1.7.2.1.- Mezclado.

Para el mezclado se utilizó una revolvedora con capacidad de 90 lts. La adición de los materiales se hizo uno a uno de la siguiente manera:

1. Pre humectación del interior de la revolvedora para evitar que esta absorba agua de la mezcla.
2. Se agregó el agregado fino y grueso de peso normal adicionando un poco de agua para pre homogenización por 30 segundos.
3. Se adicionó el cemento y la ceniza volante (en caso sustitución) seguido del agua, dejando solo la necesaria para enjuagar la probeta con el aditivo.
4. Se mezcló por 3 minutos
5. Se dejó en reposo por 3 minutos, en el caso de llevar agregado ligero en cualquiera de las dos condiciones, se agregó en este lapso, y 20 segundos antes de iniciar el siguiente lapso de mezclado se adicionó el

HRWR (en todas las mezclas) y el SRA (en caso de llevarlo en la mezcla) se tomó la decisión de adicionar el agregado ligero en esta etapa ya que de agregarlo al inicio se puede romper al chocar con el agregado normal y liberar agua antes de que se requiera.

6. Se mezcló por 2 minutos adicionales.
7. Después de terminado el procedimiento de mezclado se llevaron a cabo las propiedades en estado fresco.



**Figura 30. Mezclado del concreto**

#### 5.1.7.2.2.- Colocación.

La colocación se realizó en tres moldes distintos.

1. Moldes metálicos de 10 cms. de diámetro por 20 cms de altura.
2. Moldes de pvc de 7.5 cms de diámetro por 15 de altura.
3. Moldes de pvc de 7.5 cms de diámetro por 15 de altura preparados con barras de acero de 3/8".

El llenado de los moldes se realizó en dos capas y picando 25 veces entre capa y capa con una varilla de punta redonda de 1/4", para finalmente enrazar con la misma varilla y dar acabado con una llana metálica. Después del colado de cada mezcla, los especímenes se conservaron en un cuarto con temperatura controlada a  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 1 día.

Después del primer día, se retiraron del molde para colocarlos en curado.



**Figura 31. Llenado de especímenes con refuerzo**

#### 5.1.7.2.3.- Curado.

El curado, de acuerdo a experiencias anteriores se llevó a cabo por 14 días en contenedores llenos con agua, donde se mantuvieron todos los especímenes, los contenedores se mantuvieron en el mismo cuarto de temperatura controlada, por lo que los especímenes y el agua de curado se mantuvieron a esta temperatura durante este lapso.

El curado por inmersión se eligió con el fin de lograr una humedad más uniforme entre las distintas mezclas y de esta manera disminuir el efecto de las diferencias de humedad relativa a la que se exponen los cilindros.

### **5.2.- Métodos.**

#### 5.2.1.- Propiedades en estado fresco.

La propiedades en estado fresco, como se mencionó anteriormente se llevaron a cabo inmediatamente después de terminado el mezclado.

#### 5.2.1.1.- Peso volumétrico.

El peso volumétrico se realizó por medio de una tina de acuerdo a la norma ASTM C138 (72) con el fin de ver el efecto o la relación de los materiales utilizados con el peso por metro cúbico del concreto.



**Figura 32. Prueba de peso volumétrico de acuerdo a ASTM C-138**

#### 5.2.1.2.- Revenimiento.

El revenimiento del concreto se realizó mediante la norma ASTM C 143 (73). Esta nos da una idea de cómo se afecta el flujo del concreto con cada adición o sustitución sobre la capacidad para fluir del concreto, ya que el cono de revenimiento es una medida indirecta y muy básica de la reología del concreto además de ser un método muy utilizado en la práctica.



**Figura 33. Medición del revenimiento de acuerdo a ASTM C-143**

#### 5.2.1.3.- Contenido de aire.

Este se obtuvo con la ayuda de una coctelera como la descrita en la norma ASTM C 173 (74) el procedimiento utilizado es el volumétrico, ya que este es más recomendable para concretos que utilizan agregado ligero.



**Figura 34. Prueba de contenido de aire ASTM C-173**

#### 5.2.2.- Propiedades en estado endurecido.

Las propiedades en estado endurecido nos dan una idea de cómo se encuentra el concreto elaborado en etapas anteriores con respecto a su edad de

fabricación, de ahí la importancia de realizar estas pruebas para justificar la diferencia de calidades entre los distintos concretos fabricados.

#### 5.2.2.1.- Resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión es un indicador de la calidad del concreto, ligada a la durabilidad, esta prueba nos da una idea, en el caso de la investigación, de cómo se ve afectada la calidad del concreto con la combinación y variación de distintos materiales así como sustituciones de agregado, cementantes y adiciones de aditivos.

En este proyecto, la resistencia nos da idea de cómo se ve afectadas las distintas mezclas por la adición del SRA, sustitución de agregado y sustitución de CPO 40 por CV en proporciones definidas, la norma utilizada en este procedimiento es la ASTM C-39 (75). Esta prueba se llevó a cabo en una máquina marca ELE International modelo ADR auto 2000.



**Figura 35. Prueba de resistencia a compresión de acuerdo a ASTM C-39**

#### 5.2.2.2.- Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad o también conocido como módulo de Young, es la relación entre el esfuerzo y la deformación de un material sometido a carga.



El ACI 318S-08 lo define como: “Relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material (76).”

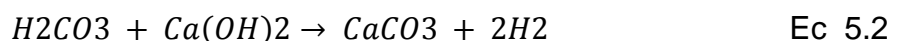
El módulo está estrechamente relacionado con la resistencia a compresión del concreto.

En esta investigación se realizaron evaluaciones del módulo de elasticidad con el fin de observar los efectos que tienen los distintos materiales y cementantes utilizados sobre el comportamiento del concreto bajo carga la norma utilizada para esta prueba es la ASTM C-469 (77).

### 5.2.3.- Análisis químicos.

#### 5.2.3.1.- Carbonatación.

La carbonatación es resultado de la interacción del  $CO_2$  de la atmósfera con los hidróxidos alcalinos en el concreto. El  $CO_2$  al igual que otros gases se disuelve en agua para formar un ácido. A diferencia de otros ácidos, el ácido carbónico no ataca a la pasta de cemento, pero neutraliza los álcalis en el agua de la solución de poro, formando carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ). A continuación se muestran las reacciones que se llevan a cabo durante este proceso:



En los poros del concreto hay hidróxido de calcio que puede ser disuelto en los poros de agua, lo que mantiene el pH a un nivel de 12 a 13 mientras no se produzcan reacciones de carbonatación (78).

Al llevarse a cabo la carbonatación en la pasta del concreto, se presenta también un descenso en el pH, el cual no es dañino para el concreto, sino para el acero, ya que pierde la capa pasiva que se forma en la interface del acero con el concreto al llegar a pH menores a 9 (27).

El objetivo de esta prueba es obtener de manera indirecta una idea sobre la difusión que se presenta del  $CO_2$  en las distintas mezclas y ver las diferencias presentadas en cada una debido a las sustituciones y aditivos.

#### Descripción de la prueba:

El procedimiento que se lleva a cabo para obtener el avance de carbonatación no es un procedimiento normalizado pero si de gran uso y consiste en:

Equipo:

Cortadora eléctrica con disco diamantado.

Vernier.

Herramientas:

Martillo

Cinzel

Brocha

Reactivos:

Fenolftaleína al 1% en alcohol isopropílico

Procedimiento:

1. Se hace una pequeña hendidura alrededor de la muestra paralela a la superficie o cara de exposición, la hendidura debe tener la menor profundidad posible.
2. Con ayuda del martillo y cinzel se va dando cinceladas alrededor siguiendo la marca hecha con la cortadora hasta lograr que la muestra se corte.
3. La superficie del corte se limpia inmediatamente con la brocha para eliminar el exceso de polvo.
4. Con ayuda de un atomizador, se rocía la superficie procurando no aplicar demasiada fenolftaleína.

Después de rociar la muestra con la fenolftaleína, se puede apreciar un cambio de coloración o ninguno. Un cambio a color fucsia, indica que el pH está por encima de 9, de no mostrar alguna coloración, es indicio de que el pH está por debajo de este valor, y por lo tanto ya se encuentra carbonatada.

Finalmente se mide el avance de la carbonatación con el vernier tomando la distancia de la cara externa o de exposición hasta el límite del cambio de coloración. En la siguiente figura se puede apreciar una muestra que fue rociada con fenolftaleína y donde se aprecia el avance de carbonatación.



**Figura 36. Muestra rociada con fenolftaleína para medir el avance de carbonatación**

#### 5.2.3.2.- Perfiles de cloruros.

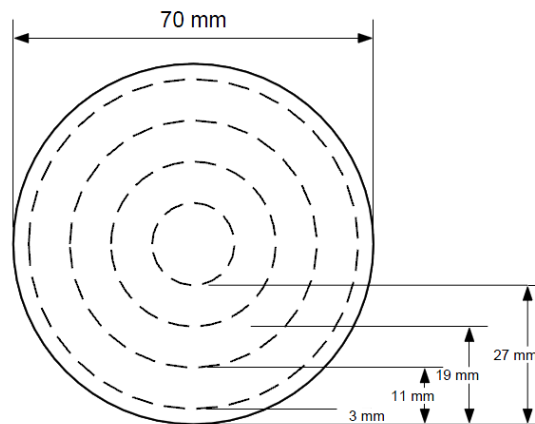
Los perfiles de cloruros es una prueba de tipo destructiva que se puede realizar a estructuras ya existentes o a concretos para evaluar el avance de los cloruros con el tiempo, el objetivo para esta prueba es tener cilindros o especímenes en los que se pueda evaluar el contenido de cloruros a distintas profundidades y sobre todo al nivel del refuerzo para que al momento de que se obtenga valores de potenciales y velocidades de corrosión que indiquen una actividad más alta, se pueda evaluar el porcentaje de cloruros en la superficie del acero.

Para esta prueba se cortaron rodajas de los especímenes ya expuestos en el ambiente a determinada edad, las edades a las que se extrajeron muestras son 14, 28, 90, 150 y 180 días de exposición, paralelo a la extracción se hicieron mediciones puntuales del ambiente para conocer su temperatura, HR y concentración de  $\text{CO}_2$  para poder relacionar el efecto de estos factores en el contenido de cloruros de cada mezcla, principalmente la HR y la temperatura.

##### 5.2.3.2.1.- Extracción de polvos.

En las muestras extraídas, se marcaron círculos concéntricos para extraer los polvos sobre el perímetro de los mismos, de la cara de exposición hacia el

centro de la muestra, se marcaron cuatro profundidades diferentes siendo la última, la que corresponde al contenido de cloruros en la superficie del acero.



**Figura 37. Esquema de extracción de polvos para perfiles de cloruros**

Para la extracción de cloruros se utilizó una herramienta de mano rotatoria de la marca dremel modelo 3000 con una broca para corte, en la siguiente figura se muestra las muestras después de terminar la extracción de polvos.



**Figura 38. Muestra de perfiles terminada.**

#### 5.2.3.2.2.- Titulación de cloruros.

La titulación de cloruros es un método para conocer el contenido de cloruros en una solución por medio de la adición de nitrato de plata  $\text{AgNO}_3$ .

Para esta prueba, después de extraídos los polvos, se pesan muestras de  $3 \pm 0.005$  gramos, a las cuales se les adiciona agua para disolverlos y formar una solución con 0.1 mL de ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  con el fin de estabilizar el pH de la solución.

La medición se realizó en un titulador marca Metro Ohm compuesto de un dosificador modelo 848 Titrino plus y un cambiador de muestras 869 Compac Sample Changer.

#### 5.3.3.- Umbral de cloruros.

Por medio del contenido de cloruros que se obtuvo en la superficie del acero de refuerzo para conocer el porcentaje necesario para iniciar la corrosión del acero de refuerzo, el criterio para considerar despasivado el acero se hace con referencia a las mediciones puntuales de velocidad de corrosión y el contenido de cloruros, calculando el contenido necesario para alcanzar un  $I_{\text{corr}}$  de  $0.2 \mu\text{Amp}/\text{cm}^2$

#### 5.3.4.- Fluorescencia de rayos X.

La fluorescencia de rayos X es una prueba que nos puede dar información interesante sobre los compuestos que se presentan en un material en forma de óxidos. Esta prueba nos da datos sobre la composición química de la ceniza volante, el CPO 40 y la pumicita.

De esta manera podemos ver si los materiales tienen algún compuesto que pueda ser de importancia o modificar el comportamiento de los materiales en conjunto.

#### 5.3.5.- Microscopía electrónica de barrido.

La microscopía electrónica de barrido se utiliza para obtener imágenes de los materiales a escalas que no son posibles por medio de un microscopio óptico, esta prueba es útil para conocer los efectos de los materiales adicionados en la microestructura, de esta manera podemos observar si hay diferencia alguna en las distintas mezclas de concreto.

#### 5.2.4.- Pruebas electroquímicas.

Los análisis electroquímicos son de mucha utilidad para conocer el estado del acero de refuerzo en las probetas que se han elaborado para cada mezcla. Cuando estas pruebas (Potenciales y velocidades de corrosión) nos indiquen un estado activo de corrosión, entonces se procede a extraer las muestras para su análisis, en nuestro caso contenido de cloruros y MEB para observar las diferencias en la interface acero-concreto.

#### 5.4.1.- Potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ).

Los potenciales de corrosión nos brindan información sobre la probabilidad de que el acero se encuentre en estado activo de corrosión. Esta prueba nos ayuda a conocer en qué momento el acero de refuerzo se encuentra despasivado. La norma ASTM C 876 (79) indica el procedimiento adecuado para la realización de la prueba.

Los rangos de potenciales y la probabilidad de que se presente corrosión se muestran en la siguiente tabla donde se tiene el  $E_{corr}$  con respecto a un electrodo de calomelanos saturados (ECS, compuesto de  $Hg/Hg_2Cl_2$ ):

**Tabla 23. Probabilidad de presencia de corrosión por rangos de  $E_{corr}$**

E <sub>corr</sub> vs ECS (mV)	
> -120	10% de que se presente
-120 a -270	Zona incierta
< -270	90% de que se presente

#### 5.4.2.- Velocidad de corrosión ( $I_{corr}$ ).

La velocidad de corrosión nos indica que tan rápido se están desarrollando las reacciones de corrosión en las probetas. Los resultados de esta prueba están correlacionados con el área superficial del acero en exposición. En este proyecto, el área expuesta es de 24 cms<sup>2</sup>.

La siguiente tabla muestra las consideraciones del estado de corrosión de acuerdo a la  $I_{corr}$ :

**Tabla 24. Estado del acero con respecto a la  $I_{corr}$**

Estado del acero con respecto a la $I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	
<0.2	Estado pasivo
0.2 – 0.5	Baja
0.5 – 1	Corrosión moderada
> 1	Alta velocidad de corrosión

#### 5.2.5.- Inspección visual.

##### 5.5.1.- Estado del refuerzo.

La inspección visual del acero de refuerzo se hizo con el fin de observar el estado del mismo. Para esta etapa, se extrajeron muestras con refuerzo para abrirlas longitudinalmente y observarlas. Adicionalmente se extrajeron rodajas con refuerzo para el análisis de la interface acero-concreto.

##### 5.5.2.- Análisis con aplicación de $AgNO_3$ .

El análisis por medio de la aplicación de nitrato de plata, es un método similar al de la carbonatación con fenolftaleína. Este método consiste en fracturar o cortar la muestra de forma transversal a la cara de exposición, para rociarlo con nitrato de plata 0.1 N, ya que al entrar en contacto con los cloruros, cambia su coloración de acuerdo a la concentración de los mismos, presentando un tono marrón para cierto contenido de cloruros. Observando de esta manera el nivel al que hasta donde han penetrado los cloruros.

## 6.- Análisis y discusión de resultados

### 6.1.- Propiedades en estado fresco

Las propiedades en estado fresco se obtuvieron inmediatamente después del mezclado, con la finalidad de observar como varían de acuerdo al uso de pumicita, SRA, ceniza volante y la tecnología VERDiCT. La tabla 25 muestra las propiedades obtenidas de estas pruebas.

**Tabla 25. Propiedades en estado fresco de mezclas de concreto.**

Mezcla	Revenimiento ( <i>cm</i> )	Contenido de aire (%)	Peso volumétrico ( <i>kg/m<sup>3</sup></i> )
R	13.5	2.75	2399
IC	13.0	2.25	2308
SRA	14.0	2.25	2410
IC-SRA	14.5	2.25	2305
V	16.5	2.5	2298
FA	16	2.5	2351
FA-V	21	2.5	2252

En cuanto al revenimiento, se puede observar que el uso del IC no genera un aumento significativo del mismo, aunque se debe tener especial cuidado ya que si el agregado es muy suave, puede romperse por la interacción con los agregados de mayor densidad, como el agregado calizo, fue por eso que se decidió adicionar el agregado ligero en la etapa de reposo del mezclado.

De romperse el agregado, puede haber una desorción o una liberación del agua retenida, modificando la relación a/mc. Lo que indica que la decisión de adicionarlo en ese momento es recomendable.

En la ficha técnica del aditivo se indica que el revenimiento se puede ver modificado por el uso de este, aunque para la cantidad en que se utilizó, no es significativo.

En general las mezclas con agregado ligero presaturado en agua o con la tecnología VERDiCT, muestran un mayor revenimiento.



Se puede observar que en las mezclas con ceniza volante y ceniza volante con VERDiCT se tiene un aumento en el revenimiento en comparación con las demás mezclas, esto puede deberse a que la sustitución de la CV se hizo en peso, y esta CV sustituida tiene mayor volumen y un tamaño de partícula mayor, que disminuye el área superficial, aumenta el volumen de cementante y trae como consecuencia un mayor revenimiento.

En cuanto al contenido de aire, se ve disminuido por el uso de agregado ligero, SRA, y CV aunque no fue mayor a 0.5%. A pesar de que la cantidad adicionada de SRA en las mezclas con la tecnología VERDiCT es mayor (aproximadamente el doble), no tienen mucho efecto debido a la forma de agregarlo.

El peso volumétrico está relacionado con los materiales utilizados y sus proporciones, las mezclas con SRA aumentan ligeramente su peso, esto puede estar relacionado con la disminución de aire por efecto de aditivo SRA, se tiene la mezcla FA-V con un menor peso, debido al efecto combinado del agregado ligero y la CV. La mezcla IC disminuye su peso solo con la sustitución del agregado ligero.

## **6.2.- Propiedades en estado endurecido**

Las propiedades en estado endurecido se llevaron a cabo en el laboratorio, las edades corresponden a los días desde la fabricación del concreto.

### **6.2.1.- Resistencia a compresión**

La resistencia a compresión se hizo en cilindros de 10x20 cms, en la tabla 26, se muestran los resultados para cada mezcla a las edades de 14, 28, 90 y 180 días.

**Tabla 26. Resistencia a compresión (kg/cm<sup>2</sup>)**

Mezcla	Edad (Días)			
	14	28	90	180
R	432.5	540.3	535.1	548.9
IC	354.5	500.1	506.2	515.2
SRA	370.9	467.6	491.6	509.4
IC-SRA	390.5	445.8	482.9	484.3
V	384.7	433.1	475.8	481.8
FA	343.1	398.9	476.5	485.7
FA-V	314.6	353.4	437.4	442.8

En la tabla 26, se puede observar que la mezcla con mayor resistencia a la compresión a los 28 días es la Referencia (R), con valores similares a IC cuya resistencia fue menor pero se tiene casi el total de ella a la misma edad. Esto se puede observar de mejor manera en la tabla 27, donde se muestra el porcentaje de resistencia obtenida con respecto a los 90 días, en la última columna se presenta el porcentaje de cada resistencia a lo 90 días de cada mezcla con respecto a la de referencia. No se toma en cuenta la de 180 días, ya que ésta varía por muy poco y no resulta significativa. Posteriormente en la tabla 4 se muestran las pendientes por intervalos de cada mezcla de 0 a 90 días.

**Tabla 27. Relaciones de porcentajes de resistencia**

Mezcla	% vs f'c 90 días			% vs R	Reducción de resistencia (%)
	14	28	90		
R	80.8	101.0	100	100.0	
IC	70.0	98.8	100	94.6	5.4
SRA	75.5	95.1	100	91.9	8.1
IC-SRA	80.9	92.3	100	90.2	9.8
V	80.9	91.0	100	88.9	11.1
FA	72.0	83.7	100	89.0	11
FA-V	71.9	80.8	100	81.7	18.3

**Tabla 28. Pendiente de resistencia a compresión por intervalos**

Intervalo (días)	Pendiente (kg/día)		
	0-14	14-28	28-90
R	30.895	7.700	-0.084
IC	25.321	10.398	0.099
SRA	26.493	6.905	0.387
IC-SRA	27.890	3.952	0.598
V	27.481	3.457	0.688
FA	24.507	3.983	1.252
FA-V	22.470	2.773	1.355

En la tabla 27 observamos que R tiene el 80% de su resistencia a los 14 días con una pendiente más alta (tabla 28), alcanzado su máxima resistencia a la compresión a 28 días.

La pendiente de R es menor, de 14 a 28 días con respecto a IC (10.398 kg/día) este intervalo marca el retiro de los especímenes del curado, por lo que esta diferencia de pendientes puede indicar el efecto positivo del curado interno. En lo que respecta a las mezclas SRA, IC-SRA y V, se observa que la tecnología VERDiCT tiene un comportamiento muy parecido a las otras dos y las resistencias a 90 días son prácticamente iguales. Aunque la pérdida resistencia con respecto a la de referencia es de 9.8 a 11.1 %.

Finalmente la mezcla más desfavorecida es FA-V que presentó una disminución de resistencia de 18.1% por el efecto combinado del VERDiCT y la sustitución de ceniza volante.

El uso del SRA y de agregado ligero genera una pérdida de resistencia por lo que el decidir el uso de estos métodos no debe ser afectado solo por la resistencia sino por el efecto que puedan tener en la durabilidad y en su caso, aportar un mayor beneficio que solo el de una mayor resistencia.

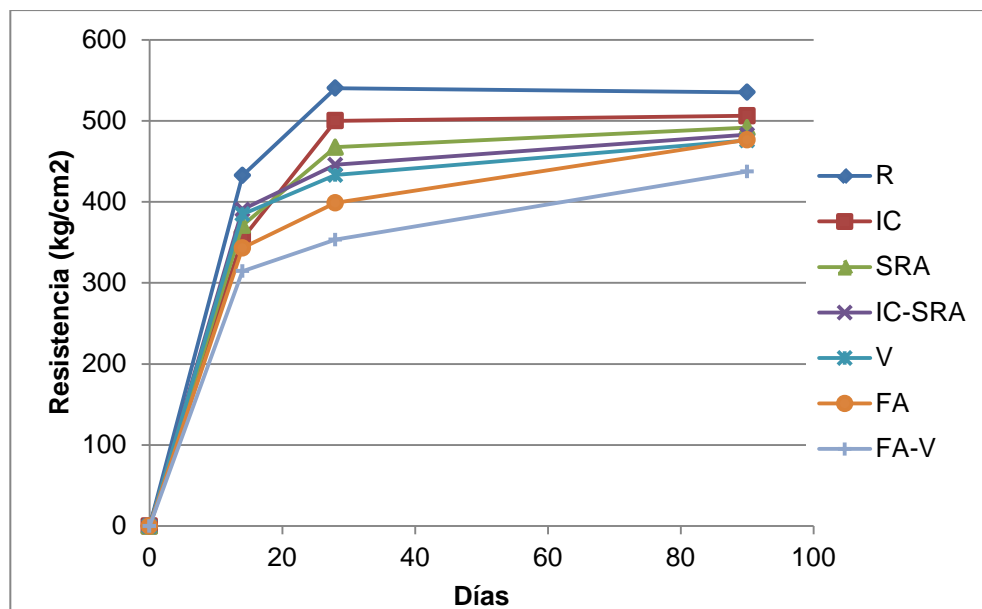


Figura 39. Resistencia a la compresión con respecto al tiempo.

Como apoyo visual se muestra la figura 39, donde se presentan las resistencias obtenidas de cada mezcla con respecto al tiempo en días, en la cual se verifica que prácticamente R e IC alcanzan su resistencia máxima a los 28 días, en tanto que las demás mezclas continuaron ganando resistencia aunque a una velocidad muy lenta.

#### 6.2.2.- Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es la pendiente de la recta secante obtenida del diagrama esfuerzo-deformación dentro del rango “plástico” de cada uno de los concretos. En la tabla 29, se muestran los módulos de elasticidad de cada uno de los concretos a la edad de 28 y 90 días

**Tabla 29. Módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)**

Mezcla	Edad (días)		Diferencia (%)
	28	90	
R	3214.94	2978.56	-7.35
IC	2841.66	2606.73	-8.27
SRA	2933.78	2907.06	-0.91
IC-SRA	2464.58	2411.57	-2.15
V	2561.03	2578.325	0.68
FA	2943.511	2766.00	-6.03
FA-V	2440.60	2510.63	2.87

En general se observa una disminución del módulo de elasticidad de los concretos, excepto para los concretos donde se utilizó la tecnología VERDiCT, esto puede estar ligado con la humedad de cada concreto, ya que de 14 a 90

días prácticamente se encontraban en el ambiente del laboratorio bajo una humedad y temperatura controladas.

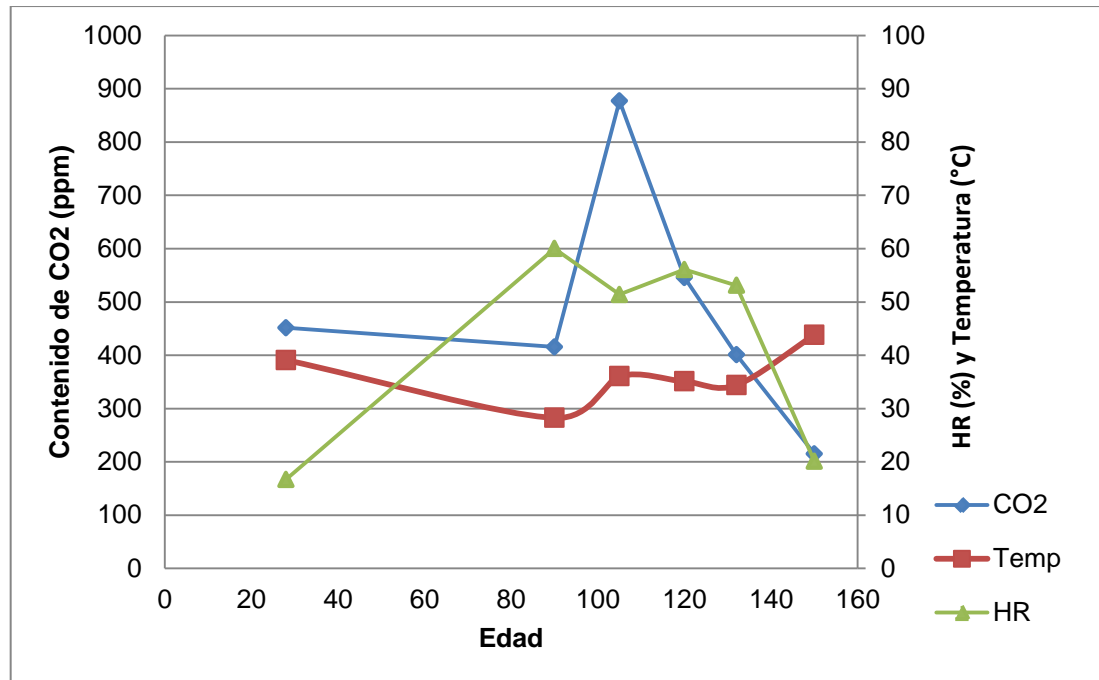
### **6.3.- Monitoreo de especímenes expuestos en campo**

A diferencia de las pruebas en estado fresco y en estado endurecido, las pruebas electroquímicas, perfiles de cloruros, carbonatación etc. se hicieron sobre especímenes colocados en campo, los tiempos o edades que se muestran a continuación en cada uno de los gráficos y tablas precedentes, se refieren al tiempo que tienen en días de exposición desde que se colocaron en el ambiente industrial.

Cabe mencionar, que para iniciar la exposición se fabricaron los especímenes y se colocaron en curado sumergido por 14 días, pasado este lapso, se retiraron del curado pero se mantuvieron en el mismo cuarto con la temperatura controlada hasta cumplir los 28 días desde la fecha de fabricación.

#### **6.3.1.- Monitoreo ambiental**

Para esta investigación, es de gran importancia el tomar en cuenta la variación de las condiciones ambientales, para relacionarlas con lo que sucede en las muestras expuestas, ya que parámetros ambientales como la humedad relativa y la temperatura pueden influir en el comportamiento electroquímico y químico de las muestras, así como la concentración de CO<sub>2</sub> afecta a la carbonatación de las mismas. En la figura 40, se muestra el comportamiento de cada uno de los parámetros antes mencionados, que se discutirán a continuación.



**Figura 40. Monitoreo ambiental.**

La exposición de las muestras se inició el día 23 de diciembre de 2011, y la primera medición se hizo a los 28 días. La temperatura dentro de la planta en invierno no es tan baja como en el ambiente, debido al calor que libera la maquinaria y equipo que funciona en la planta.

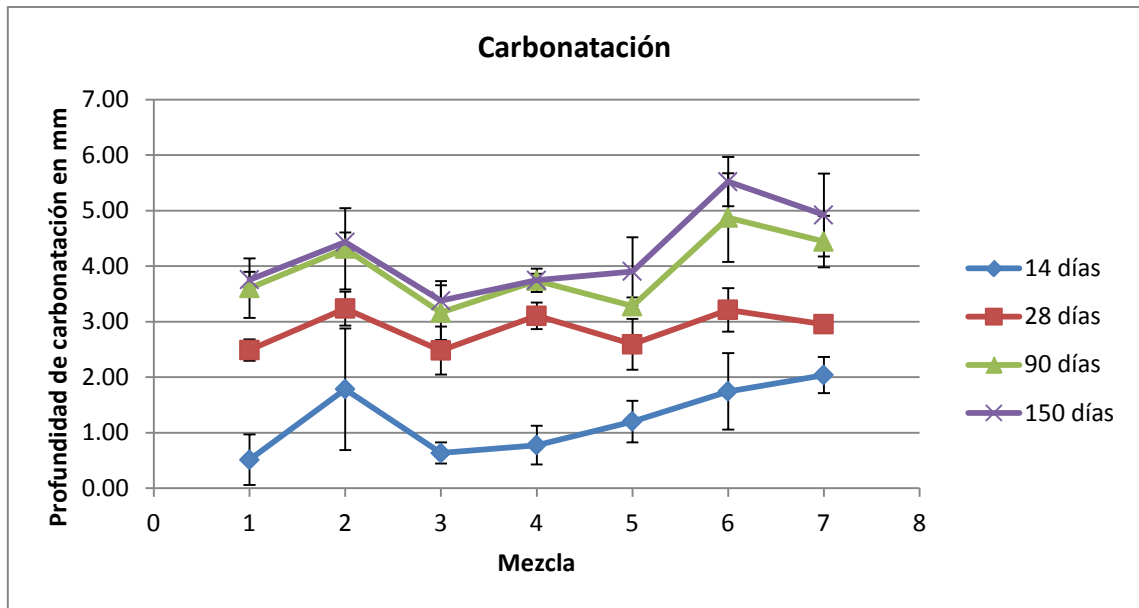
La humedad relativa también se ve influenciada por el ambiente. Especialmente a los 90 días se observa un pico máximo que coincide con una temperatura por debajo de los 30 grados y en días posteriores se observa un descenso de la humedad acompañado de un aumento de temperatura alcanzando hasta los 44°C a la edad de 150 días.

Este microclima, está relacionado un poco con las temperaturas que se tienen en la región, pero la diferencia se ve marcada por los factores de producción.

En cuanto al CO<sub>2</sub> que se encuentra en el ambiente, este si se debe al proceso de producción, mostrando un pico máximo a la edad de 110 días. Esto se analizará más adelante en los gráficos de carbonatación.

### 6.3.2.- Carbonatación

En los capítulos de introducción y antecedentes se explicó el fenómeno de la carbonatación del concreto, que aunque es benéfica para el concreto, no lo es de igual manera para el acero de refuerzo embebido en él.



**Figura 41. Carbonatación a diferentes días de exposición**

En la figura 41 se muestran las 7 mezclas con el avance de carbonatación a diferentes días de exposición.

Podemos observar que a 14 días de exposición las mezclas que presentan mayor carbonatación a esta edad son FA y FA-V, esto puede deberse al consumo de los elementos alcalinos (provenientes de las reacciones de hidratación del cemento) por parte de la ceniza volante a edades tempranas, lo que disminuye el pH de la solución del poro y hace más fácil la carbonatación.

La mezcla IC muestra también un avance de carbonatación considerable sucediendo a la FA-V y FA, pero aquí la razón es diferente, ya que el efecto es producido por el agregado ligero del curado interno, ya que la ser un material poroso, permite con mayor facilidad la difusión del  $\text{CO}_2$ . Aunque la mezcla IC presenta un avance considerable, no sucede lo mismo para IC-SRA donde la combinación logra una disminución comparada con IC, esto debido a que el



aditivo produce un aumento de la viscosidad del poro, sirviendo como barrera para impedir el avance de la carbonatación.

Finalmente vemos a la mezcla V con un avance intermedio en comparación con las demás; donde la tecnología VERDiCT generó un mayor frente de carbonatación que la referencia, esto puede deberse a las humedades internas de cada concreto afectadas por el curado interno y el aditivo SRA y que ésta humedad sea óptima para la carbonatación.

En la misma figura 41 se puede observar el avance de carbonatación a 28 días donde las mezclas menos carbonatadas son R, SRA y V, aquí se presenta ya una ventaja de la tecnología VERDiCT con respecto a las mezclas IC y IC-SRA (que tienen agregado ligero) debido a la acción del aditivo que incrementa la viscosidad, así como un menor avance también de FA-V con respecto a FA, lo que reafirma la ventaja de la tecnología, la diferencia de FA-V con respecto a V se puede deber al efecto puzolánico de la ceniza volante.

R tiene la menor carbonatación pero se considera prácticamente igual a SRA y V aún y cuando V tiene una mayor cantidad de poros y se pudiera considerar más propensa a un avance más rápido de carbonatación.

También se observa en la figura 41 el avance de carbonatación a 90 días, se puede ver que SRA y V se mantienen con menos avance al igual que en la gráfica de los 28 días, pero en este caso R ya presenta un mayor avance igualándose prácticamente con IC-SRA. Si observamos la figura 40 podemos observar un aumento en la HR en este periodo, llegando al rango óptimo para el avance de carbonatación. En cuanto a las mezclas FA, FA-V se observa un mayor avance del frente que puede deberse a los siguiente: el lapso de 0 a 60 días de exposición, coincide con el intervalo de 28 a 90 días de fabricación, periodo en el cual casi todas las mezclas alcanzaron su máxima resistencia, a excepción de FA y FA-V que continuaron hidratándose debido al efecto retardado de la reacción de la ceniza volante consumiendo  $\text{Ca(OH)}_2$  (portlandita) que aunado a una HR óptima (50-80%) (27) para la carbonatación, permitió un avance más rápido en comparación con las otras mezclas.

En la carbonatación a 150 días, se observa que el avance aún es mayor en FA que en FA-V, mostrándose que la tecnología VERDiCT continúa ayudando a la mezcla a resistir el avance de carbonatación. La mezcla con menor carbonatación ahora solo es SRA, en este punto, ya presenta una ventaja el uso del aditivo en la mezcla. R, IC-SRA y V presentan prácticamente el mismo avance de carbonatación, cabe mencionar que R puede tener diferente sensibilidad al cambio de HR que IC-SRA y V por el contenido de agregado

ligero. Para esta edad de exposición, se puede observar una disminución de la HR y un aumento de temperatura en la figura 40.

### 6.3.3.- Perfiles de cloruros

Para mejor análisis de los perfiles de cloruros primero haremos referencia a la figura 42 (27), donde se describe el efecto de la HR del ambiente y el riesgo de corrosión para concretos con cloruros, carbonatados y no carbonatados.

Los perfiles de cloruros fueron obtenidos de las muestras expuestas en el área de cloruros ya que de acuerdo a pruebas preliminares, presentan más riesgo de corrosión debido a que el ingreso de cloruros es menor en el área de carbonatos.

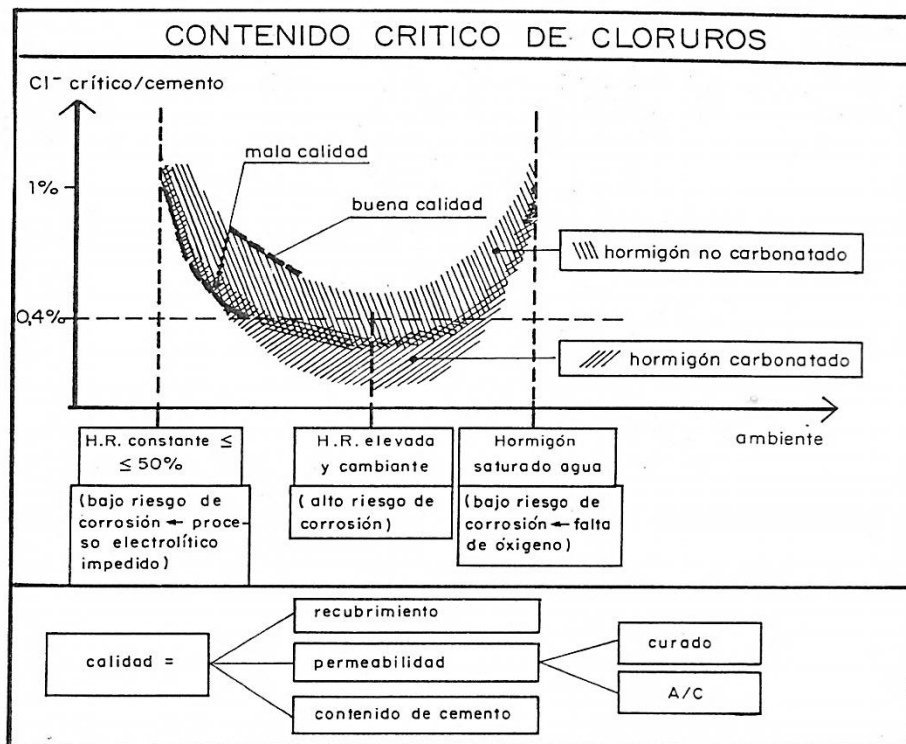
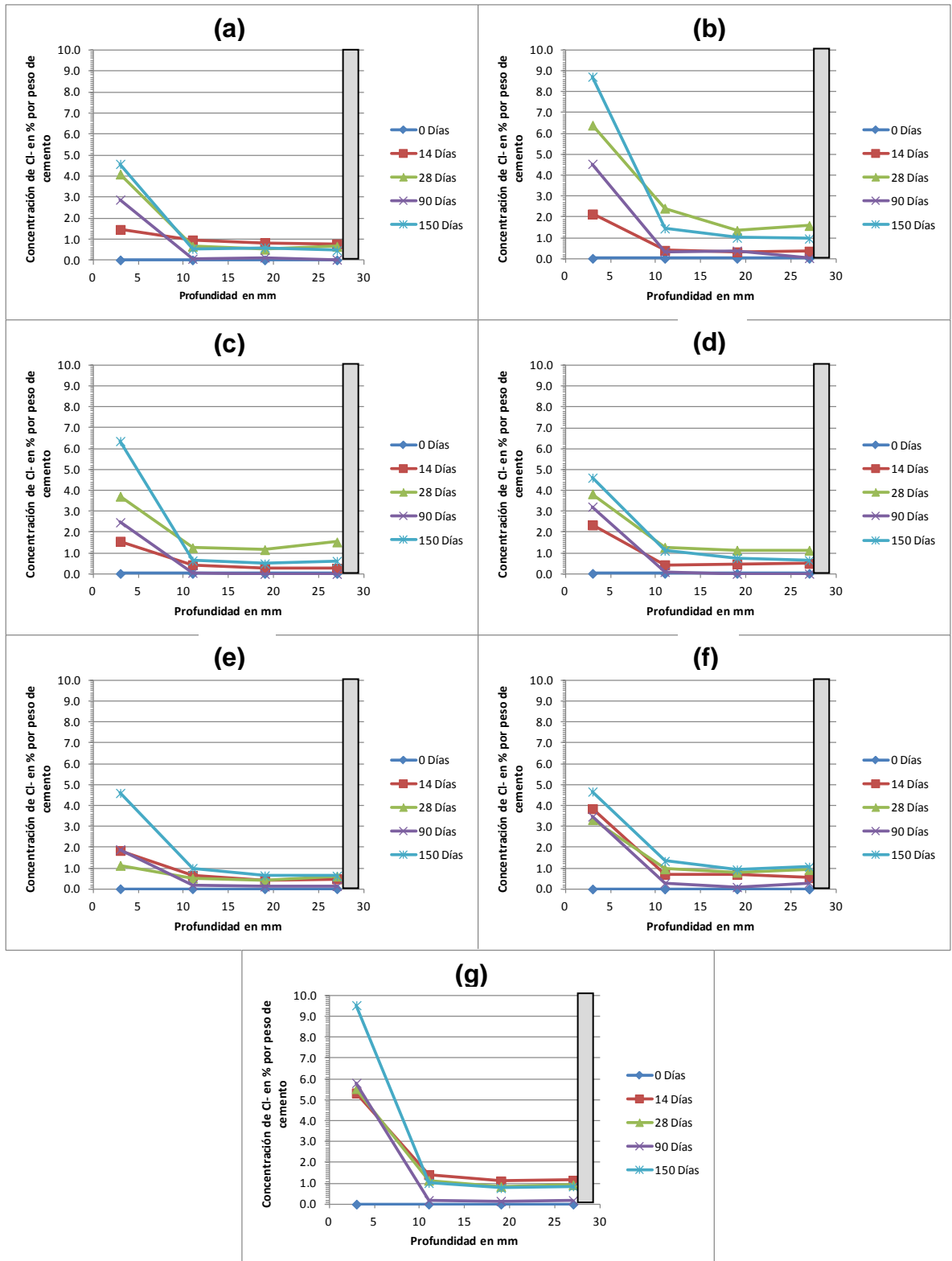


Figura 42. Esquema de variación del contenido crítico de cloruros en función de la calidad del concreto y la humedad ambiental (27).

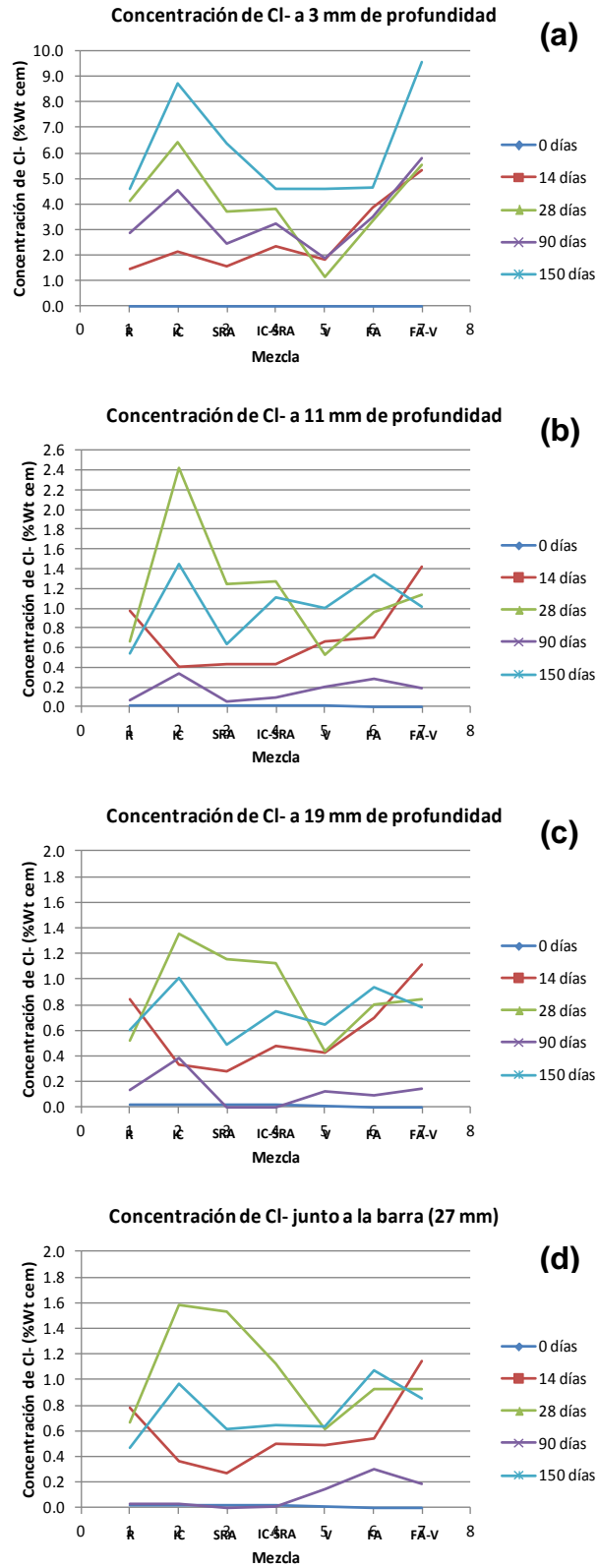
De acuerdo a la referencia de la imagen, un concreto carbonatado requiere de menos cantidad de cloruros, debido a que los cloruros que se ligan con los compuestos del concreto, pueden ser diluidos nuevamente por el efecto de la carbonatación. Además de que las condiciones más adversas son para un concreto carbonatado en combinación con una HR alta y muy variable, ya que en ese caso se requiere una cantidad muy baja de cloruros.

En las siguientes figuras se muestran los perfiles de cloruros de cada mezcla, las distancias indicadas son del perímetro de la muestra hacia el centro, el rectángulo gris representa el nivel del acero de refuerzo. La concentración de cloruros se indica como porcentaje con respecto al peso de cemento además de ser cloruros libres.

El segundo tipo de gráfica, representa la concentración de cloruros por profundidad, y como cambia con respecto al tipo de mezcla.



**Figura 43. Perfil de cloruros de las diferentes mezclas expuestas al ambiente industrial: (a) R, (b) IC, (c) SRA, (d) IC-SRA, (e) V, (f) FA y (g) FA-V.**



**Figura 44. Concentración de cloruros a diferentes profundidades: (a) 3 mm, (b) 11 mm, (c) 19 mm, (d) 27 mm.**

En la figura 43 se muestran los perfiles de cloruros de cada mezcla a los diferentes días de exposición al ambiente industrial, pudiéndose observar el típico comportamiento difusivo del ion cloruro con gradientes de concentración que van del exterior al interior.

Examinando las figuras 43 y 44, se puede advertir que a 3 mm de profundidad las mezclas que presentan los valores más altos de concentración de cloruros son IC y FA-V. Dado que 3 mm está muy cercano a la superficie del espécimen, para el caso de IC de 28 a 150 días de exposición la porosidad del agregado ligero que para este periodo (principalmente a 150 días) ya ha hecho su función de proveer de agua a la solución, pudo promover los espacios para que los cloruros ingresaran con mayor facilidad que en las otras mezclas, a 14 días muestra una menor concentración de cloruros, que puede deberse a que en ese periodo el agregado ligero aún estaba relativamente saturado no permitiendo con la misma facilidad la difusión del agente agresivo. En lo que se refiere a la mezcla FA-V de 14 a 90 días a esta profundidad la concentración prácticamente se mantuvo constante aunque mayor que las demás mezclas, pero a 150 días de exposición, se observa un incremento más brusco. Probablemente la acción puzolánica de la ceniza volante ante la entrada de más cloruros no favorece los efectos de incremento en la viscosidad de la tecnología VERDiCT, ya que si se observa la concentración de cloruros para las mezclas V y FA, éstas son mejores que FA-V que las combina, sin embargo si se observa a mayor profundidad (figuras 43 (b) y 43 (g)), a 150 días, las concentraciones fueron mucho menores, lo que habla de una difusión muy lenta a pesar de la gran concentración en los primeros milímetros, que puede deberse a la influencia del ambiente agresivo y las condiciones de humedad dentro de las probetas y la acción de los aditivos.

A 11 mm de profundidad, a 28 días de exposición la mezcla IC muestra una mayor concentración de cloruros, debido a que a esta profundidad el agregado ligero liberó más agua dejando los poros semisaturados permitiendo el ingreso de los iones hacia adentro de la muestra, sin embargo se puede observar el uso del aditivo reductor de la retracción ayuda al curado interno disminuyendo considerablemente la concentración de cloruros, teniendo un valor muy similar al de la mezcla SRA. Para esta profundidad a esta misma edad, la mezcla que tuvo mejor comportamiento fue V por su efecto en la viscosidad del poro, pero en este caso la tecnología VERDiCT no ayuda mucho a la ceniza volante ya que tuvo valores mayores que la mezcla con solo ceniza volante (FA), muy probablemente porque el aditivo aún no hacía su trabajo de densificar el poro, caso contrario a 90 y 150 días, en la cual ya dicha tecnología muestra su influencia en la mezcla siendo mejor FA-V que FA.

A 19 y 27 mm, el comportamiento de los cloruros es muy similar que a 11 mm a las edades de 28, 90 y 150 días, lo que hace suponer que, en zonas más profundas de las muestras, conforme pasa el tiempo el aditivo de SRA y la tecnología VERDiCT comienzan a realizar su función de aumento de la viscosidad en el poro, densificándolo y mejorando sus cualidades ante el ataque de los iones cloruro, caso contrario a lo que sucede cercano a la superficie y a edades tempranas como 14 días de exposición en donde el agregado ligero aún tiene saturados los poros no permitiendo la fácil entrada del agente agresivo (figura 44).

Lo anterior nos lleva a pensar en la fuerte influencia del medio ambiente de exposición al interior de la planta, que incluye a la humedad relativa, la temperatura y a los productos finales de la empresa como el cloruro de calcio. Un ejemplo claro de esta influencia lo podemos observar en la figura 44, a 90 días de exposición en todas las profundidades, la concentración de cloruros es más baja en todas las mezclas que a 28 días de exposición, cuando se esperaría lo contrario, ya que a mayor tiempo de exposición, mayor cantidad de cloruros se depositan y se difunden.

Una explicación a este fenómeno puede estar en la humedad relativa. Si se observa la figura 40, se tiene un periodo de más de un mes en el cual el valor de dicha humedad relativa oscila entre el 50 y 60 % entre los 78 y 90 días, valores que normalmente favorecen la difusión, pues los poros del concreto se encuentran semisaturados. Esto si está sucediendo, pero en sentido contrario, ya que pasa de concentraciones altas de 27 mm (al centro de la probeta) a concentraciones más bajas a 19 y 11 mm de profundidad para luego subir nuevamente a 3 mm. La pregunta es, ¿por qué este comportamiento?

Haciendo un análisis a las probetas, durante este periodo de 90 días, hubo un acumulamiento de cloruro de calcio en la superficie del concreto de las muestras, tal y como se puede ver en las figura 45. El cloruro de calcio es un compuesto con propiedades higroscópicas, que puede absorber agua tanto del ambiente como del propio concreto, pudiéndose arrastrar con ella a los cloruros que se encuentran dentro del concreto, lo que explica la alta concentración del agente agresivo cercana a la superficie. En la figura 46 se muestran probetas en las que se observa la humedad en la superficie que bien puede ver del interior del concreto.

Posteriormente, a 150 días hay una recuperación de los cloruros que coincide con un periodo de humedad relativa entre 45 y 60%, que también es favorable para la difusión, pero ahora después de acumular una cantidad importante de cloruros en la superficie, éstos vuelven a entrar lo que se refleja en los perfiles.

Aunque esto sucede para todas las mezclas, las que mejor comportamiento tuvieron fueron a 19 y 27 mm (cercano a la barra de acero) fueron SRA y V, una vez más debido a la densificación del poro por el aumento en la viscosidad.



**Figura 45. Probetas en exposición en ambiente industrial, cubiertas con cloruro de calcio.**





**Figura 46. Probetas en exposición en ambiente industrial, mostrando humedad en la superficie del concreto.**

Para corroborar los datos anteriores, se utilizaron los datos de los perfiles de cloruros de cada mezcla para calcular la concentración superficial y el coeficiente de difusión mediante el ajuste del modelo de la segunda ley de Fick

(Ecuación 6.1) a dichos datos para 28 y 90 días de exposición, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tablas 30 y 31, y en las figuras 47 y 48.

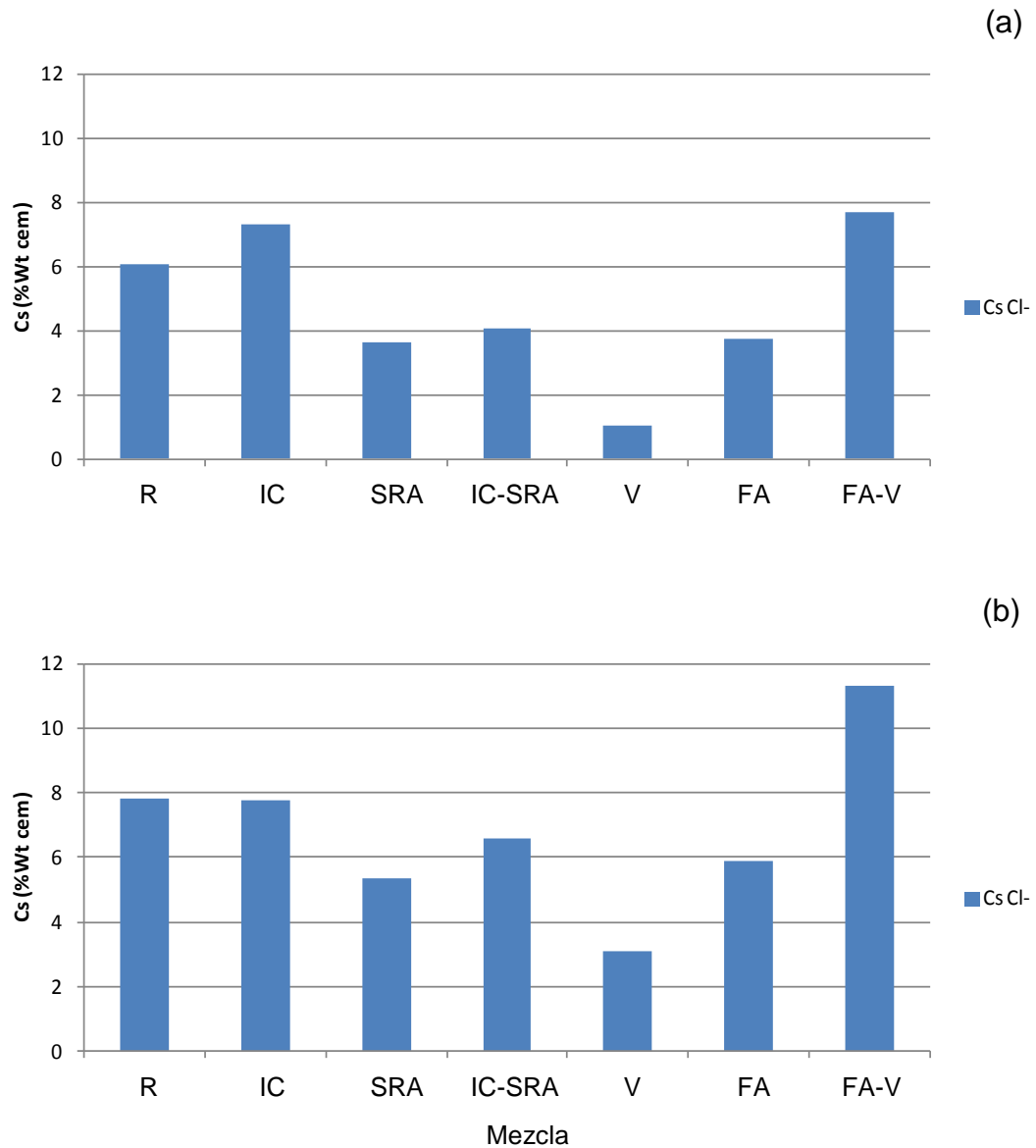
$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) * \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4tD}} \right) \right] \quad 6.1$$

**Tabla 30. Concentración superficial y coeficiente de difusión de las diferentes mezclas expuestas al ambiente industrial por 28 días.**

MEZCLA	R	IC	SRA	IC-SRA	V	FA	FA-V
Cs (%Wt cem)	6.071	7.301	3.611	4.056	1.043	3.734	7.666
D (m <sup>2</sup> /s)	1.039E-11	4.118E-11	9.056E-11	5.655E-11	1.927E-10	3.89E-11	1.404E-11

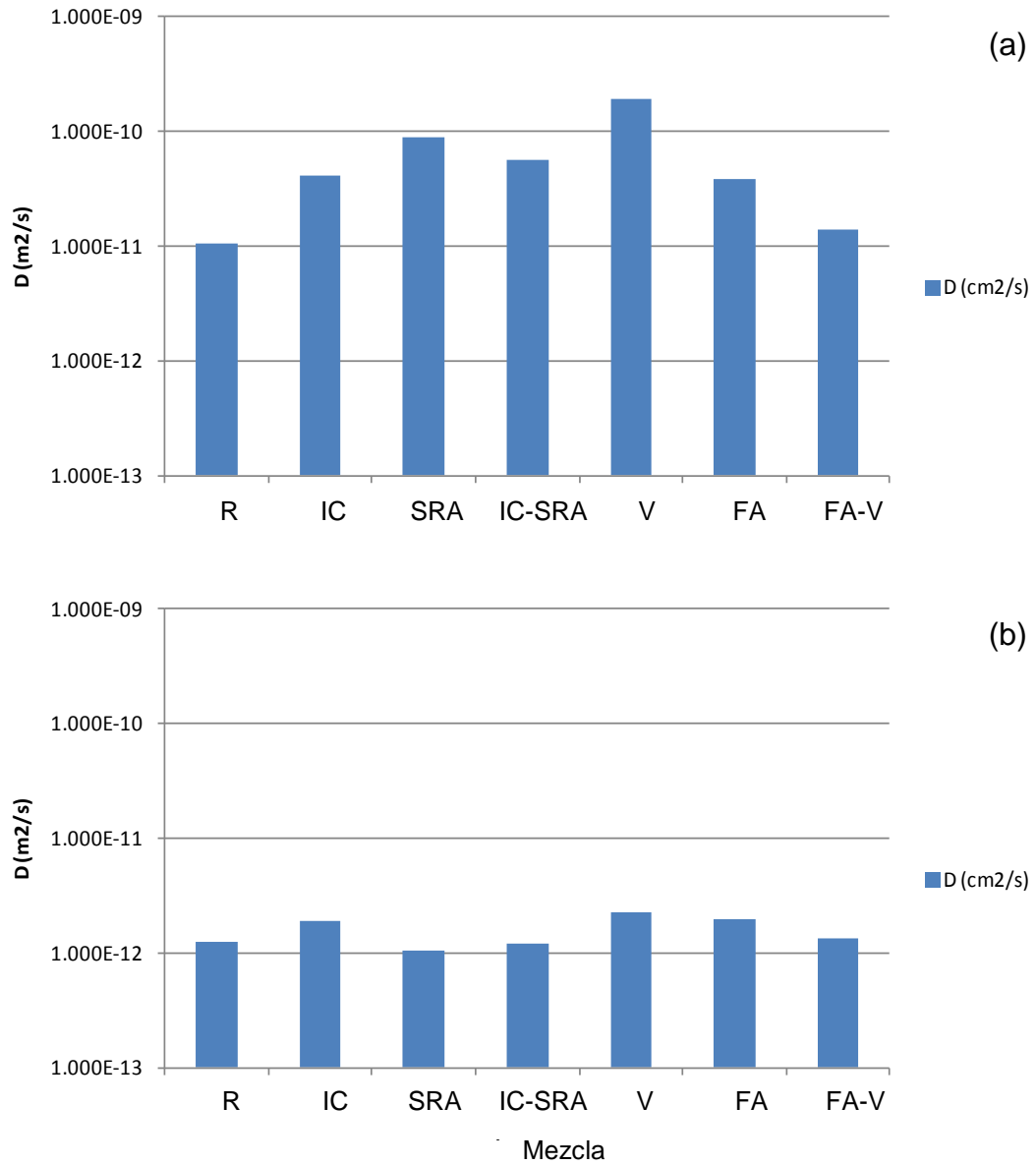
**Tabla 31, Concentración superficial y coeficiente de difusión de las diferentes mezclas expuestas al ambiente industrial por 90 días.**

MEZCLA	R	IC	SRA	IC-SRA	V	FA	FA-V
Cs (%Wt cem)	7.809	7.79	5.33	6.56	3.083	5.886	11.294
D (m <sup>2</sup> /s)	1.27E-12	1.908E-12	1.068E-12	1.208E-12	2.275E-12	1.993E-12	1.359E-12



**Figura 47. Concentración superficial de las diferentes mezclas obtenidas por la ecuación de la segunda ley de Fick a: (a) 28 días de exposición y (b) 90 días de exposición<sup>4</sup>.**

<sup>4</sup> En los gráficos y tablas anteriores se muestra el coeficiente de difusión con unidades %Wt cem, que en español significa: % por peso de cementante.



**Figura 48. Coeficiente de difusión de las diferentes mezclas obtenidas por la ecuación de la segunda ley de Fick a: (a) 28 días de exposición y (b) 90 días de exposición.**

En la figura 47 se puede observar como la concentración superficial a 90 días de exposición al ambiente industrial en todas las mezclas es mayor que a 28 días de exposición, lo que se corrobora con la discusión realizada para la concentración de cloruros a 3 mm de profundidad para esas edades y corrobora también la teoría de la higroscopía del cloruro de calcio que no solo absorbe la humedad y cloruros del exterior sino también del interior de las probetas de concreto.

Para el caso del coeficiente de difusión, puede observarse que éste es mayor a 28 días que 90 días y esto puede deberse a que para ésta edad ya la mayoría de los cloruros está en la superficie del concreto, mientras que a 28 días está en plena difusión hacia el acero de refuerzo. Un resultado interesante es que a 90 días el coeficiente de difusión es muy similar en todas las mezclas, no pudiéndose observar que una mezcla sea mejor que la otra y esto puede deberse precisamente a que ya no hay muchos cloruros en el interior de la probeta como para poder mostrar alguna ventaja de alguna mezcla en específico. En cambio a 28 días puede verse que la mezcla de referencia y la mezcla FA-V son las que mejor coeficiente de difusión presentan. Para FA-V el motivo de este comportamiento puede ser que no toda la ceniza volante ha reaccionado con la portlandita, quedando mucha de ella como filler en los poros, además de que probablemente el aditivo ya comenzó a aumentar la viscosidad del poro.

De este análisis se puede concluir que tanto el medio ambiente como el cloruro de calcio que forma parte del proceso de manufactura de la planta, son un factor muy importante que influye en gran manera al comportamiento de los cloruros dentro de las probetas, aunque algunas mezclas se comportan mejor que otras debido a la acción química y física de los ingredientes de cada una de ellas.

#### **6.3.4.- Mediciones electroquímicas**

En cuanto a las mediciones electroquímicas, estas se realizaron con especímenes colocados en dos zonas, una donde se fabrican carbonatos de sodio y otra donde se fabrican cloruros de calcio. Las figuras que se presentan a continuación, intentarán relacionarse con el contenido de cloruros y la HR del ambiente para ver cuál es la de mejor desempeño.

### 6.3.4.1.- Potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ )

Los potenciales de corrosión en todas las mezclas expuestas en el área de carbonatos inicialmente presentaron un comportamiento que mostraba un estado pasivo de las barras de acero de refuerzo, lo cual es lógico pues aún no hay difusión de agentes agresivo que cambien el estado inicial de las barras. A continuación se muestran las gráficas de potenciales de corrosión con respecto al tiempo, recordando que dichos potenciales solo nos indican probabilidad de corrosión por ser una medición cualitativa, más no la certeza de que realmente haya una corrosión activa.

Área de carbonatos

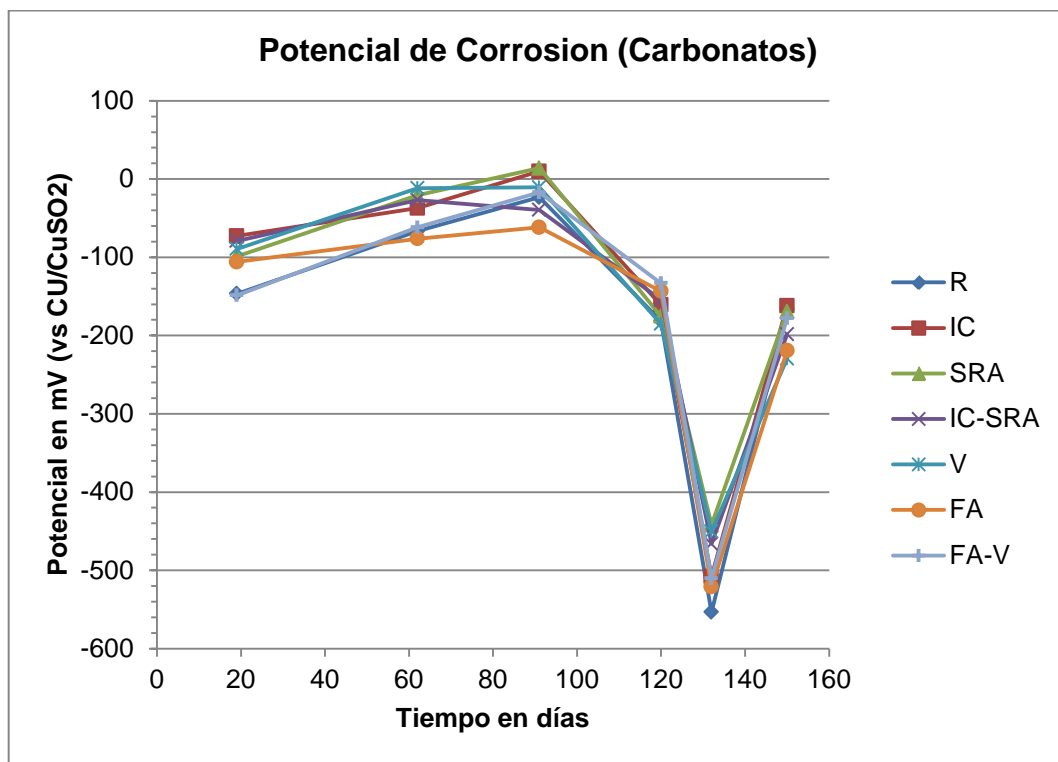


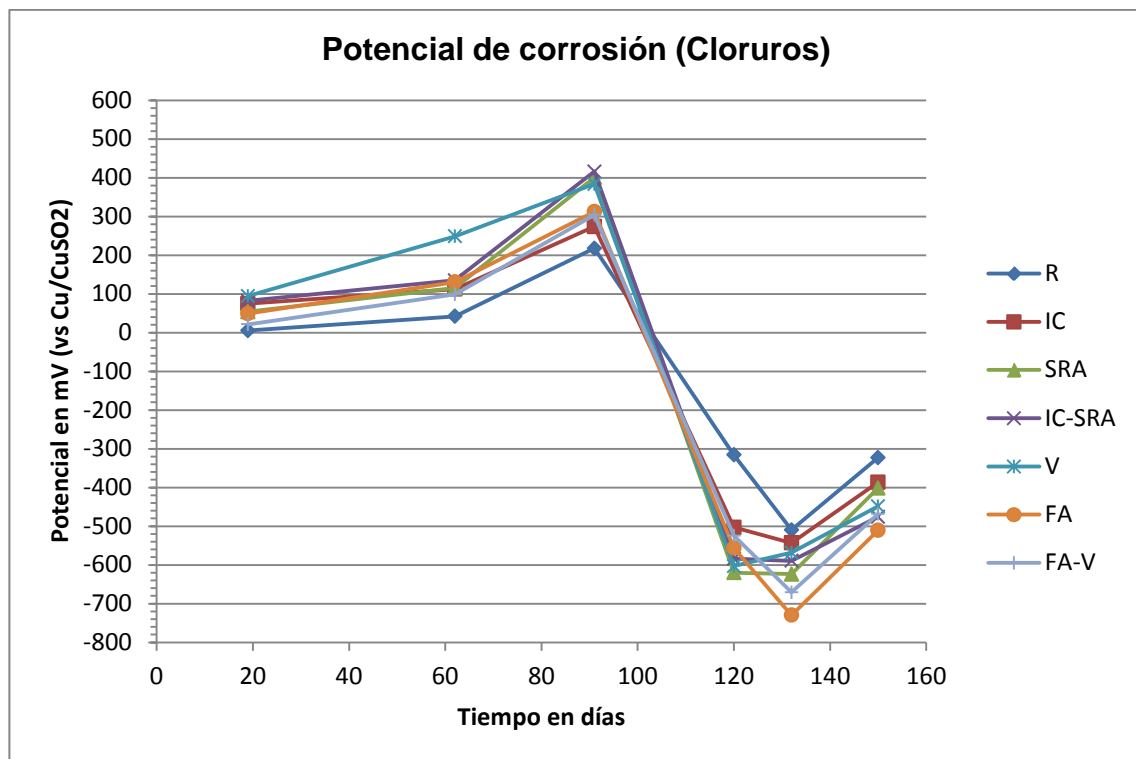
Figura 49. Potencial de corrosión en área de carbonatos.

En la figura 49 se puede observar que para el área de carbonatos, las mezclas con valores más negativos son R y FA, estas mezclas en cuanto a proporciones, solo se diferencian por la sustitución de cementante. Las que

presentaron valores más positivos fueron SRA, V e IC-SRA, que aunque no distan mucho de las demás si hay una correspondencia con lo que se discutió con el avance de carbonatación para estas mezclas, en donde el aditivo reductor de la retracción retarda el avance de la carbonatación.

El valor máximo positivo se presentó a los 90 días, para después presentarse un descenso con valores máximos negativos a los 132 días. Este comportamiento se puede relacionar con la HR máxima presentada a los 90 días y que en el descenso se hayan creado las condiciones óptimas presentadas en la figura 40. Las pequeñas variaciones entre mezcla y mezcla dependen de la calidad de la interface de cada acero-concreto y de las propiedades que los ingredientes de cada mezcla confieren al concreto.

### Área de cloruros



**Figura 50. Potencial de corrosión en área de cloruros.**

En la figura 50, se muestra el registro de las mediciones de potencial en el área de cloruros. A diferencia de los potenciales del área de carbonatos, estas

mediciones fueron más positivas antes de los 90 días y más negativos en edades posteriores.

Entre el lapso de 90 a 120 días se presentaron los valores que indican una actividad de corrosión, lo que coincide después de un incremento en la HR ya que a la edad de 28 días de exposición ya se tenían contenidos de cloruros que pueden ocasionar la despasivación del acero.

Si se comparan los potenciales a 150 días con respecto al contenido de cloruros mostrado en la figura 5, se puede observar que el potencial menos negativo (mezcla R) coincide con un contenido de cloruros menor y el potencial más negativo, presenta la mayor concentración de cloruros.

Lo mismo no sucede con las otras mezclas, que presentan distinto orden como IC que al tener una de las concentraciones más altas, su potencial es menos negativo. FA-V y V tienen un comportamiento, teniendo valores un poco menos negativos que R aunque como se ha dicho antes, el potencial representa una probabilidad de que se presente o no la corrosión.

#### **6.3.4.2.- Densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ )**

Las densidades de corriente de corrosión dan la pauta para comparar cuál de las muestras se corroen con mayor intensidad, resultado de una despasivación y en este caso relacionados con el contenido de cloruros.

La densidad de corriente de corrosión depende de la especie iónica, cantidad de la misma, HR del ambiente interno (en este caso concreto que a su vez es influenciada por la HR del ambiente), y la disponibilidad de oxígeno (27).

#### Densidad de corriente de corrosión

La densidad de corriente de corrosión puntual no dicen el comportamiento de cada mezcla a diferencia de las mediciones de potencial de corrosión (cualitativas), ya que estas son cuantitativas.

La condición para considerar la despasivación del acero de refuerzo, es cuando la velocidad de corrosión sobre pasa la zona de 0.1 a 0.2  $\mu\text{Amp}/\text{cm}^2$  (51). En las

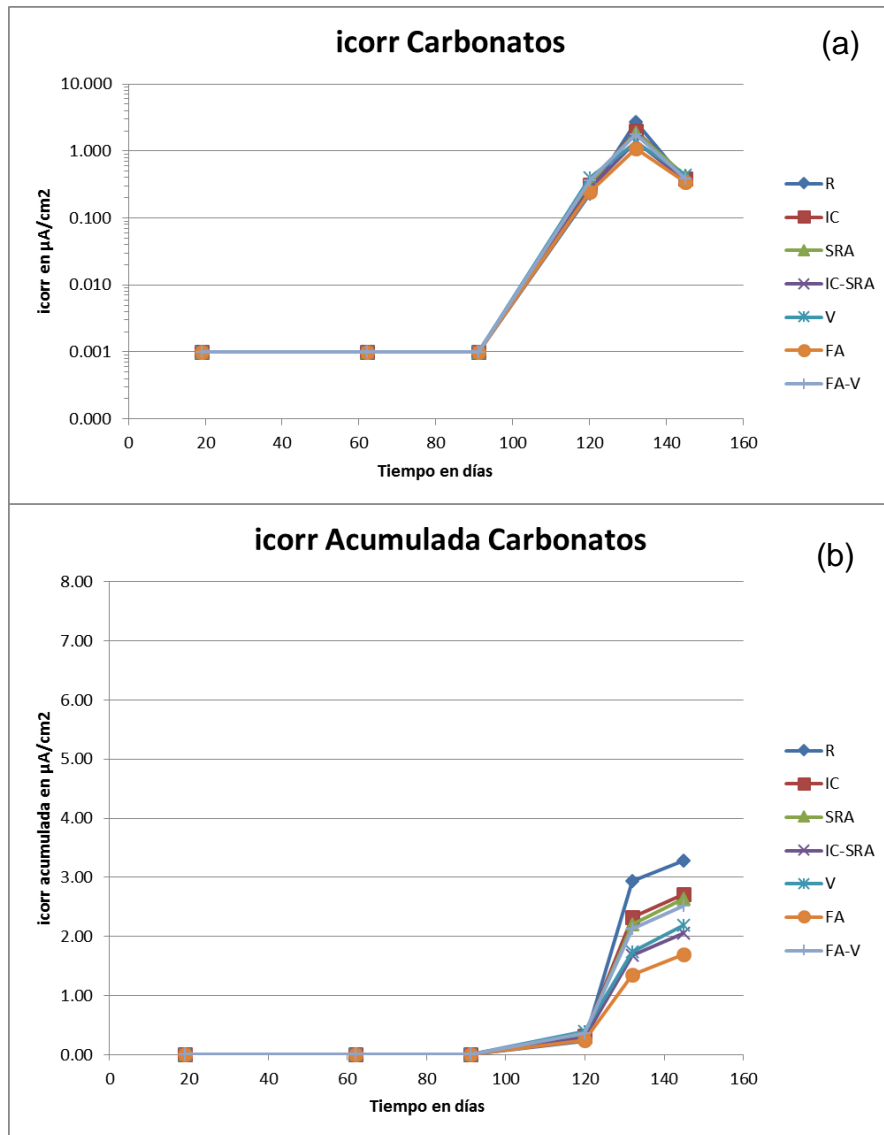


gráficas se muestra con líneas punteadas la zona que distingue entre el estado pasivo y el estado activo.

#### Densidad de corriente de corrosión acumulada

La densidad de corriente de corrosión acumulada se muestra en las siguientes figuras con el objetivo de ver una diferencia más marcada entre las mezclas. Este tipo de gráfico da un orden a las mezclas de manera que podemos de mejor manera especificar cuál es mejor en cuanto al ataque por cloruros, ya que conforme pasa el tiempo, las mezclas con mayor actividad se separan más tendiendo a valores cada mes más altos.

## Área de carbonatos



**Figura 51. Densidad de corriente de corrosión puntual (a) y acumulada (b) para las mezclas expuestas muestras expuestas en el área de carbonatos.**

Al igual que los valores de potencial de corrosión en esta zona de exposición, se obtuvo un comportamiento similar para las densidades de corriente de corrosión para todas las mezclas, solo que en este caso, a valores más

positivos se tiene un mayor grado de corrosión. En la figura 51 (a) se muestra la despasivación del acero después de los 110 días.

La mezcla con mayor densidad de corriente fue R seguida por IC a 132 días aunque los valores de densidad de corriente de corrosión no resultaron tan dispersos como en el área de cloruros. Podemos observar que posterior a los 132 días, se muestra un descenso en la densidad de corriente, esto puede atribuirse a la disminución de la HR y al estar el concreto en condiciones más secas, como en este caso se disminuyó.

En la figura 51 (b) se observa que para el área de carbonatos la mezcla que presenta un mejor comportamiento es CV que puede deberse a la baja humedad consecuencia de la reacción puzolánica de la ceniza volante, posteriormente le sigue IC-SRA y V cuyo comportamiento es prácticamente igual, aquí se puede observar el efecto del aumento de la viscosidad que, a pesar de estar en corrosión activa, se tiene una intensidad menor esto puede deberse al efecto del aditivo en la solución del poro, la mezcla con mayor desventaja para estas condiciones es R, en este caso V y FA-V tienen un mejor desempeño que R, lo que indica una ventaja del uso de la tecnología VERDiCT.

Con los resultados hasta ahora obtenidos tanto de potencial de corrosión como de densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), no se puede llegar a una conclusión concreta, pues los datos no muestran una diferencia significativa entre las mezclas, si bien se puede vislumbrar que las mezclas con el aditivo reductor de la retracción y la tecnología VERDiCT tienden a presentar mejor comportamiento electroquímico y por lo tanto se puede ver una tendencia a incrementar la durabilidad de las mezclas para las condiciones de este ambiente.

### Área de cloruros

En cuanto al área de cloruros, haciendo mención a la concentración de este agente agresivo a los 27 mm de profundidad (figura 43 y 44), entre 90 y 150 días la mezcla con más concentración es FA, lo mismo es para su velocidad de corrosión. IC a pesar de tener una mayor concentración de cloruros, su velocidad de corrosión es menor, esto puede estar relacionado a como se modifica la HR dentro del concreto, ya que en el periodo anterior se tuvieron HR más altas en el ambiente lo que pudo haber generado un aumento de dicha humedad en el interior del concreto, además de que IC puede tener retención

de agua por más tiempo a causa del agregado ligero y con esto un descenso en la disponibilidad de oxígeno.

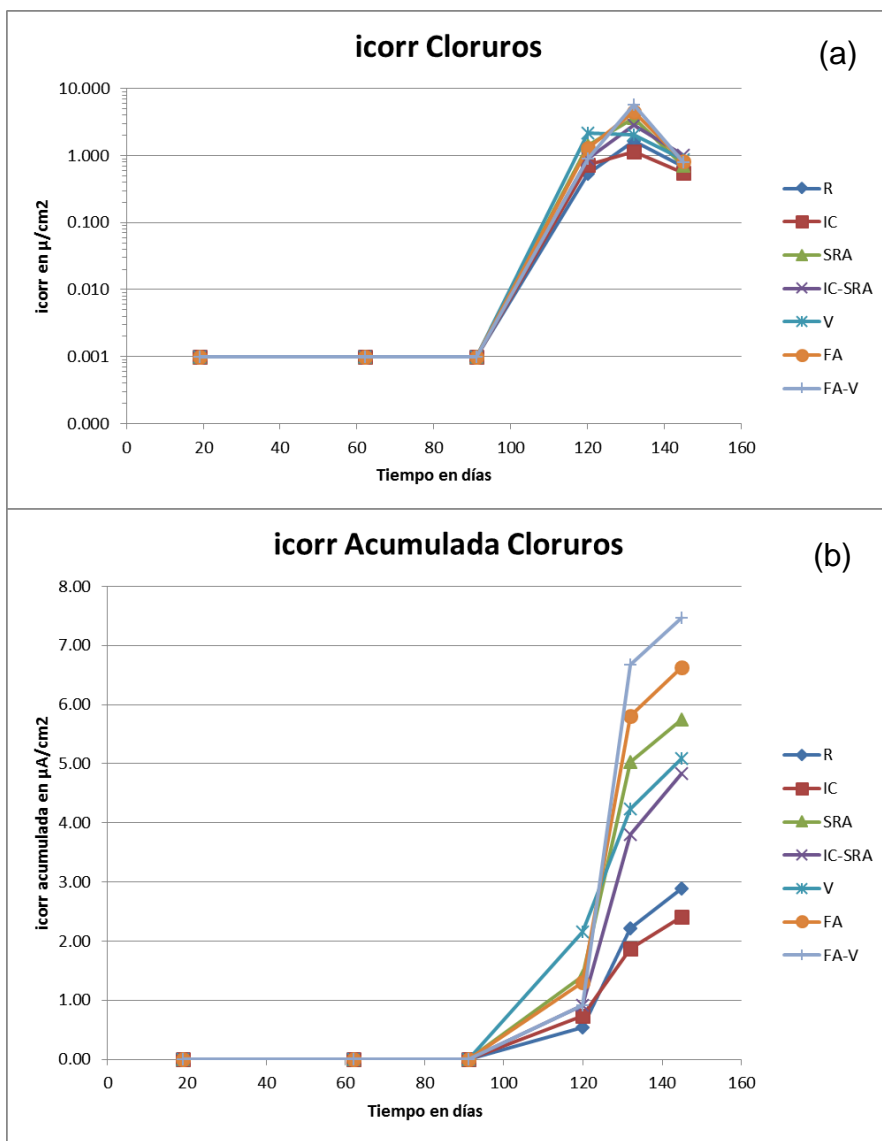
En cuanto a V, fue la de mayor velocidad de corrosión a 120 días, pero en días posteriores disminuyó su intensidad (132 días).

En la figura 52, la mezcla IC aparece con menor densidad de corriente de corrosión a pesar que se observó una mayor cantidad de cloruros en la superficie y en la profundidad al nivel de refuerzo. Esto puede deberse a que la susceptibilidad a la HR de esta mezcla es mayor ya que las condiciones de saturación dentro de los agregados se modifican con mayor rapidez que otras mezclas y en este caso se debe a que las condiciones óptimas de humedad duran menos tiempo por el efecto de una menor viscosidad en la solución de poro.

FA tiene una velocidad acumulada mayor, correspondiente a la concentración de cloruros a distintas edades.

FA-V requiere de menor cantidad de cloruros para presentar densidades de corrosión mayores, esto puede deberse también a un menor pH a causa de reacción puzolánica ya que a pesar de tener menor concentración a distintas edades muestra una velocidad acumulada mayor y otra variable es la humedad modificada por el agregado

V tiene mejor comportamiento que FA-V y SRA por lo tecnología VERDiCT tiene un mejor desempeño que el adicionar el aditivo en el agua de mezclado solamente y se ve también el efecto de las sustituciones cementicias. El orden en que se presenta V tiene buena relación con la concentración de cloruros que muestra a distintas edades ya que se colocó en un término medio.



**Figura 52. Densidad de corriente de corrosión puntual (a) y acumulada (b) para las mezclas expuestas muestras expuestas en el área de cloruros.**

Al igual que en el área de cloruros, se presentó una disminución en la densidad de corriente después de los 132 días. Esto puede relacionarse con el descenso en la HR en la cual en días anteriores se tuvo un pico y la disminución de esta hace que se pierda movilidad y difusión de los cloruros, como podemos ver a 150 días; esto se puede relacionar con la disminución de concentración de cloruros que se muestra en la figura 43. Con el descenso de la HR del ambiente hay una “extracción” de cloruros como se presentó a los 90 días, aunque cabe mencionar que en este ciclo la modificación de concentración de cloruros se debe más a la HR del ambiente a diferencia de la concentración a 90 días, cuyo

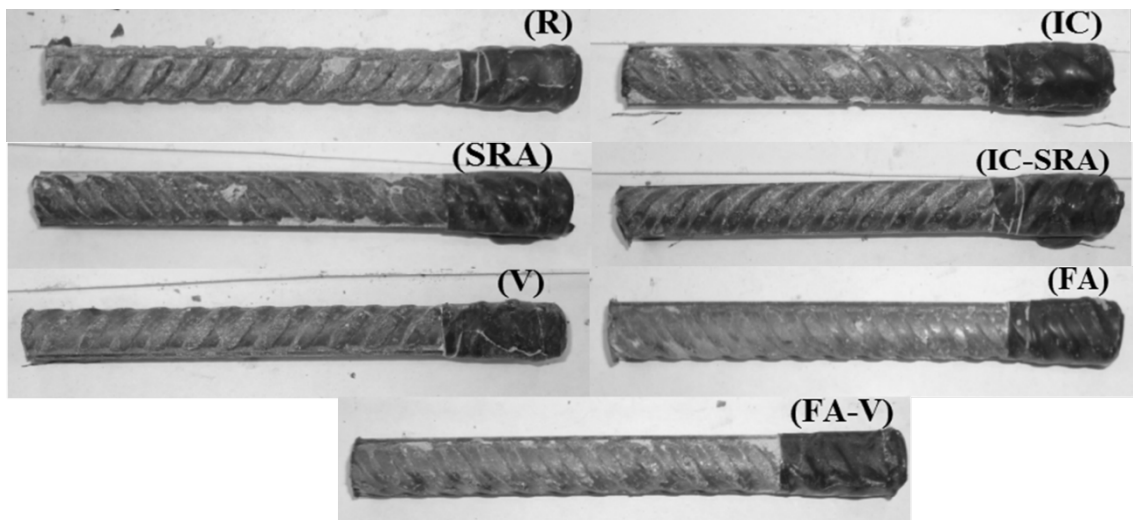
descenso fue ocasionado principalmente por el cloruro de calcio acumulado en la superficie pero en ambos casos se modifica la difusión de cloruros.

En general las mezclas tienen un comportamiento similar, por lo que en esta área aún se considera que los resultados obtenidos no pueden darnos conclusiones certeras, aunque se puede observar una tendencia de que para ambientes cloruros, la tecnología VERDiCT (con el uso de solo CPO) puede brindar mayor durabilidad que el uso de sustituciones suplementarias, cuyo uso va en aumento en la actualidad.

### 6.3.5.- Inspección visual

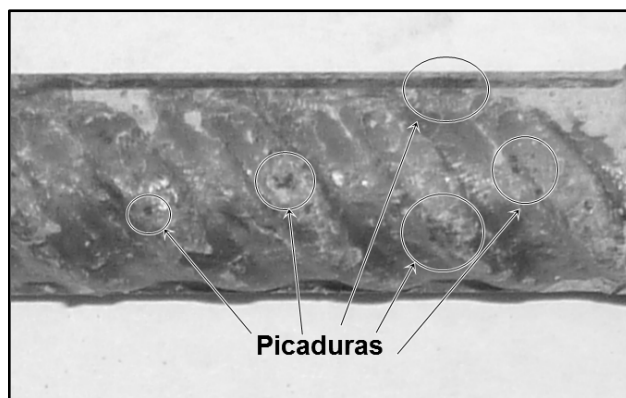
A 180 días de exposición se extrajeron muestras del ambiente para realizar una inspección del estado de acero de refuerzo.

Esta inspección consistió en cortar las muestras para extraer el acero de refuerzo y observar si hay presencia de corrosión. En la figura 53 se muestran imágenes del acero extraído de cada mezcla.



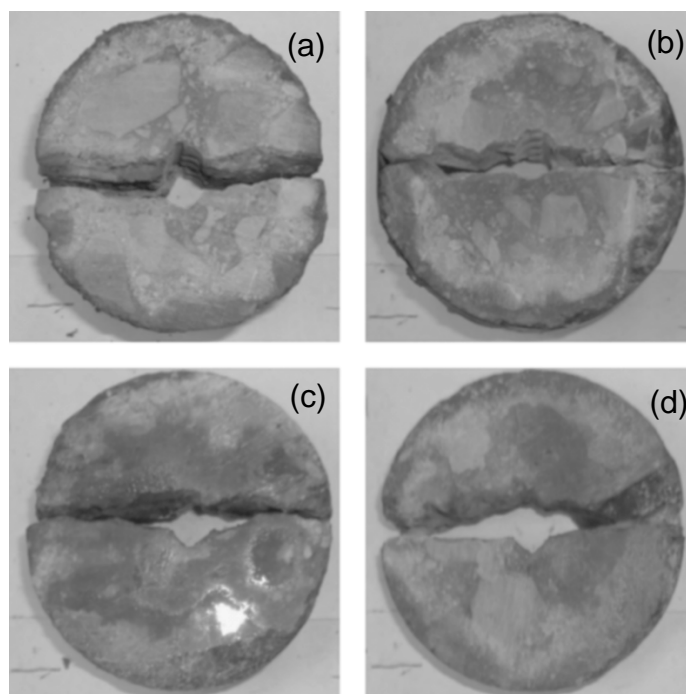
**Figura 53. Inspección del acero de refuerzo extraído a 180 días de exposición.**

Como se observa, el acero de refuerzo, no presenta señales de corrosión a simple vista, aunque el mecanismo de corrosión por cloruros se presenta como picadura, que se pudieron observar con una inspección más minuciosa, en la siguiente figura 54, se muestra un acercamiento al refuerzo de FA-V, donde se observan picaduras.



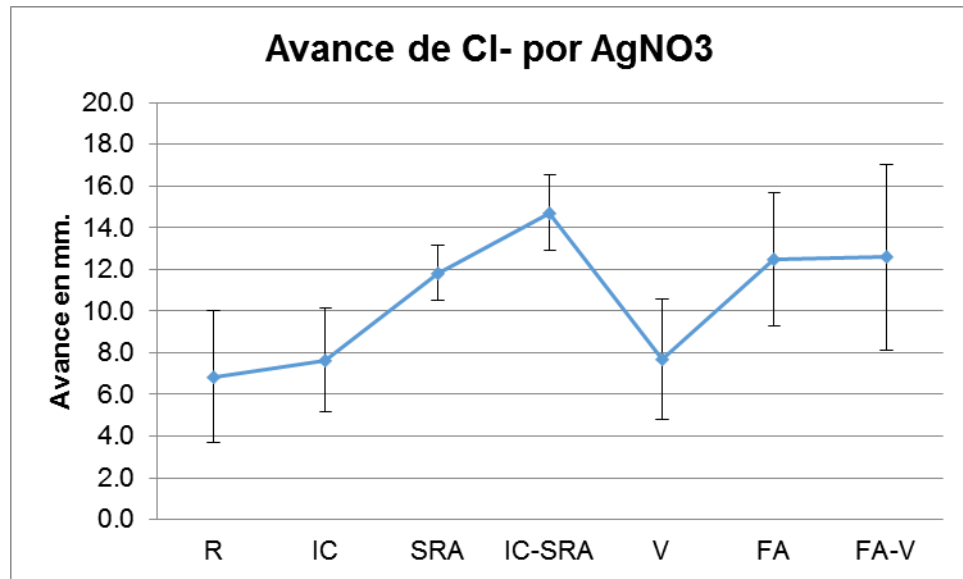
**Figura 54. Picaduras en acero de refuerzo de FA-V a 180 días de exposición.**

Otra parte de la inspección consistió en extraer rodajas para aplicar una solución de  $\text{AgNO}_3$  1N para identificar el avance de los cloruros. En la figura 55 se muestran algunas mezclas donde se utilizó el método colorimétrico y donde se muestra un cambio de coloración para contenido de cloruros menores a 0.3% por peso de cementante aproximadamente, cabe especificar que el umbral del cambio de coloración puede variar de acuerdo a las condiciones de exposición y materiales utilizados en cada mezcla (80).



**Figura 55. Prueba del  $\text{AgNO}_3$  en mezclas (a) IC, (b) IC-SRA, (c) V y (d) FA-V.**

En la figura 56 se puede observar el avance de cloruros de acuerdo al método colorimétrico aplicado a 180 días de exposición, donde podemos observar que el avance para V es muy similar a R e IC, las muestras que mayor avance tienen son SRA, IC-SRA, FA y FA-V. Como se observó en los perfiles de cloruros FA-V es una de las muestras que mostró una mayor concentración, de ahí que puede tener una mayor difusión.



**Figura 56. Avance de cloruros por medio del método de colorimétrico.**

De aquí podemos observar que la tecnología VERDiCT presenta un mejor desempeño que su homóloga con adiciones y se refuerza su ventaja con respecto a las mezclas de concreto normal con adiciones como es el caso de FA.



## 7.- Conclusiones

1. En general, todas las mezclas mostraron un comportamiento similar o más bien paralelo a lo largo del tiempo de experimentación lo que indica que las adiciones cementantes, el uso de aditivos reductores de retracción, o el uso de agregado ligero en sustitución de 20% en volumen como se hizo en este trabajo no genera variaciones importantes.
2. Un punto importante es el procedimiento de mezclado cuando se utiliza agregado ligero como vehículo para aditivos o curado interno, es que se debe tener especial cuidado para evitar la ruptura de las partículas de agregado para que no liberen agua o en este caso la solución antes de que se coloque el concreto, ya que se puede modificar la relación a/mc afectando así la resistencia del concreto, con lo que no se lograría el objetivo de este método.
3. En cuanto a la resistencia a compresión, se presentaron resistencias menores que van del 5 hasta el 18% aproximadamente con respecto a la referencia dependiendo del método utilizado y si se utiliza o no algún cementante.
4. Solo el sustituir agregado ligero tiene una reducción del 6% de resistencia a 180 días y una reducción de peso de 4% aproximadamente en estado fresco que puede compensar la disminución de resistencia con una disminución en el diseño de elementos estructurales.
5. El uso de SRA y curado interno (IC) modifican la velocidad de desarrollo de resistencia. Esto depende de la dosificación y el método de adición.
6. El uso del curado interno demostró seguir ganando resistencia a edades de 180 días a una velocidad lenta mientras que la de referencia a partir de los 90 días se mantuvo prácticamente constante, por lo que se espera que al menos en la mezcla IC se pueda disminuir la diferencia de resistencia con respecto a R a mayores edades o hasta igualarse.
7. El uso de SRA e IC modifican el módulo de elasticidad observándose una reducción en el módulo para las mezclas en general de 28 a 90 días, mientras que las mezclas con la tecnología VERDiCT presentaron un incremento, esto debido a las condiciones de humedad proporcionadas por el método.
8. El uso de la tecnología VERDiCT presentó un coeficiente de difusión similar a R siendo estas mezclas las de mejor coeficiente a 28 días, donde a pesar del uso de agregado ligero con alta porosidad se demuestra que no afecta la permeabilidad del concreto.

9. El método VERDiCT utilizado en la mezcla V, presentó mayor cantidad de cloruros al nivel de refuerzo, en varias edades con respecto R, al igual que FA-V pero la velocidad de corrosión fue más alta para FA-V esto indica que el uso de CV puede generar una condición de mayor susceptibilidad del acero a la corrosión.
10. La cantidad de cloruros está relacionada con la velocidad de corrosión, pero en el caso de IC a pesar de ser más alta, su velocidad a cumulada fue similar a la mezcla R.
11. En el caso de FA-V e IC se presentó un mayor concentración a los 3 mm a partir de los 28 días, lo que se dedujo es que el agregado ligero pueda funcionar como depósito para los agentes que ingresan al concreto, dificultando su avance y su extracción.
12. El fenómeno de carbonatación aunque a edades tempranas avanzó más rápido en las mezclas FA-V, y V que en R, en el caso de V a edades posteriores, se presento un avance muy similar por lo que se refuerza la idea de que el agregado ligero no afecta los fenómenos de difusión como lo es la carbonatación a un punto que se pueda considerar como grave para dejar del lado el uso de agregado ligero como agente de curado interno, aunque esto es visible en V debido a que la solución beneficia la reducción del avance, pero en IC el avance es mayor, por lo que al utilizar agregado ligero como agente de curado interno, es recomendable presaturarlo en una solución de mayor viscosidad a la del agua.
13. En el área de carbonatos, el fenómeno fue inverso a la de cloruros, presentando una ventaja de la mezclas V y FA-V con respecto a R que presentaron velocidades de corrosión menores. Por lo que el ambiente de exposición juega un papel importante para la selección y uso de estos materiales en estructuras.
14. La actividad de corrosión está estrechamente relacionada con el contenido de iones (como los iones cloro) del concreto, pero también la solución en la que se encuentran cuya calidad está determinada por la relación a/mc, materiales cementantes, aditivos, etc. modifica el movimiento de los iones y la actividad que se presenta en la superficie del acero, el uso de aditivos modificadores de viscosidad, puede disminuir el ingreso de agentes agresivos, pero aun falta más información al respecto de cómo estas soluciones con viscosidad modificada y su composición afecta el desarrollo de la corrosión.
15. A lo largo de este trabajo se han mencionado algunas ventajas, desventajas y recomendaciones del uso de IC, SRA y el método de uso, estas recomendaciones se han hecho conforme a las tendencias que se observaron de los distintos métodos utilizados para la evaluación de cada mezcla por lo que aún no es posible establecer cual mezcla es

mejor en cuanto a durabilidad, por lo que se continuará con la evaluación a edades mayores para tener un mejor criterio y de esta manera certeza de la efectividad de la tecnología VERDiCT.

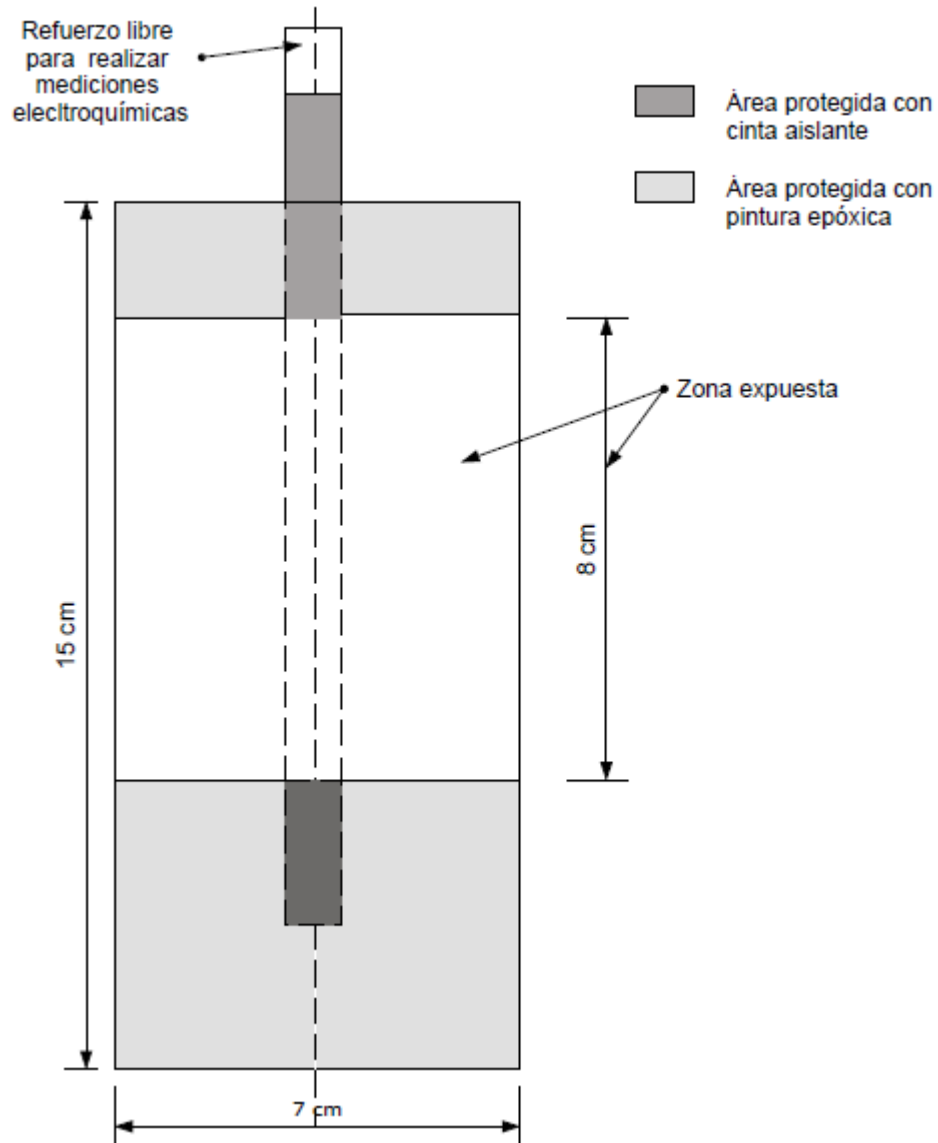
16. Es conveniente hacer una evaluación no solo sobre la difusión de especies iónicas en distintas soluciones, sino también investigar sobre el comportamiento de estas soluciones en el proceso de corrosión y como afectan en la interface acero-concreto, para observar si el movimiento de iones que se presenta en el fenómeno de corrosión es más rápido o lento, además de poder relacionarlo con la resistencia eléctrica de cada tipo de mezcla. Esto se puede lograr con especímenes similares, en los cuales se lleven a cabo pruebas de velocidad de corrosión y potencial que describen indirectamente esta característica.
17. Se recomienda para investigaciones posteriores realizar pruebas a largo plazo para verificar el comportamiento de estas mezclas ante ambientes tanto industriales como marinos ya que el comportamiento a edades tempranas está influenciado por los fenómenos hidratación del concreto, como el uso de cementantes suplementarios que al disminuir la HR interna del concreto pueden ocasionar el ingreso de cloruros por absorción.
18. En general se pueden observar micro ciclos ambientales que generan un efecto sobre el concreto y los perfiles de cloruros, ya que a los 90 días se presentó un aumento de HR y disminución del contenido de cloruros, aunque hay que enfatizar que no todas las mezclas responden con la misma intensidad a estos cambios ambientales. La mezcla con mayor susceptibilidad en este caso es IC cuyos incrementos y disminuciones de concentración de cloruros fueron más bruscos.  
De esta manera se ve como el ambiente juega un papel importante en el comportamiento de los concretos, en este caso concretos de alto desempeño, por los que las conclusiones aquí expuestas son válidas para ambientes industriales similares y el uso de estos concretos en algún otro ambiente requiere de previa investigación.

## Anexo A. Características y dimensiones de las probetas utilizadas en el desarrollo de la investigación.

a).- Probeta con refuerzo para medir potenciales de corrosión.

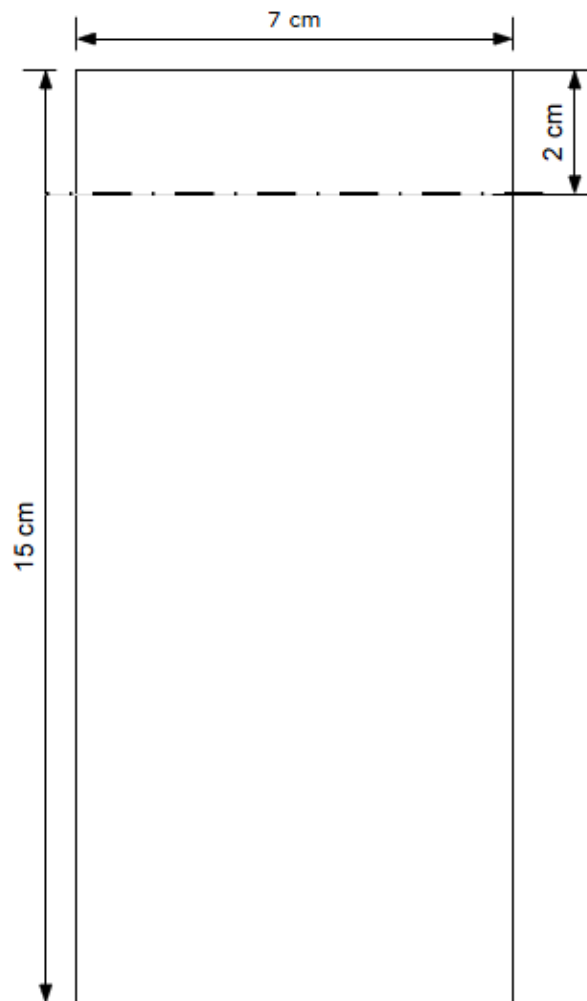
Esta muestra fue elaborada utilizando una varilla de refuerzo de 3/8 para llevar a cabo las mediciones electroquímicas.

La varilla mide 16 cm de longitud, de los cuales se dejaron 2 cm en la parte superior libres para la conexión, los siguientes cuatro se aislaron con cinta plástica como medio de protección, los siguientes 8 cm se dejaron libres, esta sección es la zona de exposición y los 2 cm restantes se aislaron. A continuación se muestra un diagrama:



b).- Cilindro para pruebas de carbonatación y cloruros

Esta muestra se utilizaron como testigos para las mediciones de carbonatación y para extraer los perfiles de cloruros. Al llegar cada edad, dependiendo de la prueba, se cortaban rodajas de aproximadamente 2 cm. La cuales se empacaban inmediatamente para evitar que se dañaran por efecto del ambiente.



c) Cilindro para pruebas mecánicas

Estos cilindros fueron de mayor dimensión pero similares a los utilizados para las pruebas de carbonatación y cloruros. Estos se utilizaron para realizar las pruebas mecánicas de resistencia a compresión y módulos de elasticidad sus dimensiones fueron de 10 cm de diámetro por 20 de alto.

## Bibliografía

1. **INEGI.** *Estadísticas del medio ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey.* Monterrey, N.L. 2001.
2. **ONNCE.** *C-414 Industria de la construcción - Cementos hidráulicos - Especificaciones y métodos de prueba.* Distrito Federal, México.
3. **Aïtcin, Pierre-Claude.** *Binders for durable and sustainable concrete. Modern concrete technology 16.* Taylor & Francis, 2008.
4. **ASTM C-125.** *Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates.* ASTM International, 2004.
5. **ASTM C-618.** *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.* ASTM International, 2004.
6. **ACI 318S-08.** *Requisitos para concreto estructural y comentario.* IMCyC, 2008.
7. **PCA.** *Diseño y control de mezclas de concreto.* PCA, 2004.
8. **ACI Committee 212.** *Chemical admixtures for concrete.* Education bulletin E4-03. 2003.
9. **C., Aïtcin P.** *High performance concrete. Modern concrete technology 5.* *Modern concrete technology 5.* E & FN Spon, 1998.
10. **Ghafoori, Nader y Diawara, Hamidou.** *Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete.* Elsevier, 2010. Vol. 24, p. 946-955.
11. **Coussy, O.; Dangla, P.; Lassabatère, T.; Baroghel-Bouny, V.** *The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials.* Concrete Science and Engineering, 2004. Vol. 37, p. 15-20.
12. **NRMCA.** *CIP 5 - Plastic shrinkage cracking.* Concrete in Practice. National Ready Mix Concrete Association.
13. **Neville, Adam M.** *Tecnología del concreto.* IMCyC, 1999. p. 219-247.
14. **Committee 308R.** *Guide to curing concrete.* American Concrete Institute, 2001.
15. **ACI Concrete terminology.** American Concrete Institute, 2010.

16. **Jensen, Ole Mejhede y Lura , Pietro.** *Techniques and materials for internal water curing of concrete.* Rilem, 2006. Vol. 39, p. 817-825.
17. **ACI Committee 212.** ACI 212.3R-04. *Chemical admixtures for concrete.* American Concrete Institute.
18. **ACI committee E-701.** ACI education bulletin E403. *Chemical admixtures for concrete.* American Concrete Institute.
19. **Rixom, Roger y Mailganam, Noel.** *Chemical admixtruers for concrete.* 3a ed. E & FN Spon, 1999.
20. **Bates, R. C.** *Use of shotcrete for underground structural suport.* ASCE and ACI, 1975. SP-45, p. 130-142.
21. **Tomita, R.** Concrete lybrary of JSCE. 1992. Vol. 6, 19, p. 233-245.
22. **Berke , N. S.; Dallaire, M. P.; Hicks, M. C.; Kerkar, A.** *Proceedings ACI International conference on high performance concrete.* Singapore, 1994. págs. 326-333.
23. **Hobbs, D. W.** *Alcali silica reaction in concrete.* Londres: Thomas Telford Ltd., 1988.
24. **Verink, Ellis D.** *Corrosion testing made easy.* [ed.] B. C. Syrett . *The basics* : Nace International, 1994. 3.
25. **Scully , J. C.** *The fundamentals of corrosion.* 3. Oxford : Pergamon Press, 1990.
26. **Castro , Pedro; Alcocer, Ivan.** *Infraestructura de concretro armado: deterioro y opciones de preservación:* IMCyC, 2001.
27. **Andrade, C.** *Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras.* Madrid, España, 1988.
28. **Garcés Terradillos, Pedro, Climent Lloorca , Miguel Ángel y Zornoza Gómez, Emilio.** *Corrosion de armaduras en estructuras de hormigón armado :* ECU, 2008.
29. **Sergi, G.** Ph D Thesis. *Corrosion of steels in concrete: cement matrix variables.* Birmingham : University of Aston, 1986.
30. **Alonso, C. y Andrade, C.** *Lifetime of rebars in carbonated concrete, in progress in understanding and prevention of corrosion.* [ed.] J. M. Costa y A. D. Mercer . Institute of Materials London, 1994.



31. **Thompson, Neil G. y Payer, Joe H.** *Corrosion testing made easy: DC Electrochemical test methods*. [ed.] Barry C. Syrett.: NACE International, 1998. 6.
32. **ASTM C-876.** *Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete* : ASTM International. 2004.
33. **Henkensiefken, Ryan; Briatka , Peter; Bentz, Dale; Nantung , Tommy; Weiss, Jason.** *Plastic shrinkage cracking in internally cured mixtures made with pre-wetted lightweight aggregate*. 2010. 32, p. 49-54.
34. **Jensen, Mejlhede Ole y Hansen, Per Freiesleben.** *Water entrained cement-based materials II. Experimental observations* : Pergamon, 2002. p. 973-978.
35. **Valdez-Tamez, P. L.; Durán-Herrera, A.; Fajardo-San Miguel, G.; Juárez-Alvarado, C.A.** *Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Pórtland y ceniza volante*. Ingeniería, investigación y tecnología : UNAM, 2009. Vol. X, 1, p. 31-41.
36. **Philleo , R.** *Concrete science and reality. Materials science of concrete II* . [ed.] J. P. Skafny y S. Mindess.: American Ceramic Society, 1991, págs. 1-8.
37. **Hansen, Torben C.** *Physical structure of hardened cement paste. A classical approach* : Bordas-Gauthier-Villars, 1986. Vol. 19, 114, p. 423-436.
38. **Jensen, Mejlhede Ole y Hansen , Freiesleben Per.** *Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background* : Pergamon, 2001. Vol. 31, p. 647-654.
39. **Zhutovsky, S., Kovler , K. y Bentur, A.** *Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high performance concretes to eliminate autogenous shrinkage* : Rilem, 2002. Vol. 35, p. 97-101.
40. **Bentz, Dale P., Lura, Pietro y Roberts, John W.** *Mixtures proportioning for internal curing* : American Concrete Institute, February de 2005. p. 35-40.
41. **Lura , Pietro; Bentz, Dale P.; Lange , David A.; Kovler, Konstantin; Bentur , Arnon.** *Pumice aggregates for internal water curing*. Evanston, IL : RILEM, 2004. p. 137-151.
42. **Cusson, D. y Hoogeveen, T.** *Preventing autogenous shrinkage of high performance concrete structures by internal curing*. [ed.] Konsta-Gdoutos : Springer, 2006. p. 83-89.

43. **Ackay , Burcu y Tasdemir, Mehmet Ali.** *Internal curing of mortars by lightweight aggregates and its effects on hydration.* Canadian journal of civil engineering, Canada : NRC, 2008. 35, p. 1276-1284.
44. **Espinoza-Hijazin, Gaston y Lopez , Mauricio.** *Extending internal curing to concrete mixtures with w/c higher than 0.42.* Construction and building materials : Elsevier, 2011. Vol. 25, p. 1236-1242.
45. **Bentz, Dale P.** *Internal curing of high-performance blended cement mortars.* ACI Materials journal. [Technical paper] : American Concrete Institute, 2007. 104-M46, p. 408-414.
46. **Durán-Herrera, A.; Juárez, C. A.; Valdez, P.; Bentz, D. P.** *Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes.* Cement and concrete composites : Elsevier, 2010 (submitted).
47. **Li, Meili; Qian, Jueshi; Xu, Shanshan; Jia, Xingwen; Fan, Yunyan.** *Assessment of curing efficiency and effect of moist curing on performance of fly ash concrete.* Journal of Wuan University of Technology Materials. Scientific Ed.: RILEM, 2011. 26, p. 360-365.
48. **Sulapha , P.; Wong, S. F.; Wee, T. H.; Swaddiwudhipong, S.** *Carbonation of concrete containing mineral admixtures.* Journal of materials in civil engineering : American Society of Civil Engineers, march/april de 2003. p. 134-143.
49. **Francois, R. y Maso , J. C.** *Effect of damage in reinforced concrete on carbonation or chloride penetration.* Cement and concrete research : Pergamon, 1988. Vol. 18, p. 961-970.
50. **Nagataki, Shigeyoshi; Otsuki, Nobuaki; Wee, Tiong-Huan; Nakashita , Kenji.** *Condensation of chloride ion in hardened cement matrix materials and on embedded steel bars.* ACI Materials journal : American Concrete Institute, July-agoust 1993. p. 323-332.
51. **Alonso, C.; Andrade, C.; Castellote, M.; Castro, P.** *Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar.* Cement and Concrete Research : Elsevier, 2000. 30, p. 1047-1055.
52. **Thomas , Michael.** *Chloride thresholds in marine concrete.* Cement and Concrete Research : Elsevier, 1996. Vol. 26, p. 513-519.
53. **Hobbs, D. W.** *Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete.* Cement and Concrete Research : Elsevier, 1999. 29, p. 1995-1998.

54. **Brown, J. H. y Beeby, A. W.** *Exposure site carbonation depth measurements*. BCA Report for Building Research Establishment, UK : Building Research Establishment, 1992.
55. **Castro, P., De Rincon, O. T. y Pazini, E. J.** *Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments*. Cement and Concrete Research: Elsevier, 2001. Vol. 31, p. 529-537.
56. **Castellote, M., Andrade, C. y Alonso, C.** *Accedlerated simultaneous determination of the chloride depassivation threshold and of the non-stationary diffusion coefficient values*. Corrosion Science : Elsevier, 2002. Vol. 44, p. 2409-2424.
57. **Liu, Xuemei, Chia, Kok Seng y Zhang , Min-Hong.** *Water absortion, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete*. Construction and Building Materials : Elsevier, 2011. 25, p. 335-343.
58. **Balogh, Anne .** *New admixture cobat concrete shrinkage*. Concrete Construction. July, 1996.
59. **He, Z.; Li, J. Z.; Chen, M. Z.; Liang, W. Q.** *Properties of shrinkage-reducing admixtures-modified pastes and mortar*. Materials and Structures : RILEM, 2006. 39, p. 445-453.
60. **Bentz, Dale P.** *Influence of shrinkage-reducing admixtures on early properties of cement pastes*. Journal of Autogenous Concrete Technology : Japan Concrete Institute, 2006. Vol. 4, 3, p. 423-429.
61. **Bentz, Dale P.** *Curing with shrinkage-reducing admixtures*. Concrete International : American Concrete Institute, october de 2005. p. 55-60.
62. **Bentz, Dale P.** *Capitalizing on self-desiccation for autogenous distribution of chemical admixtures. Proceedings of the 4th International Seminar on Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology*. [ed.] B. Persson, Dale Bentz y L. O. Nilsson. 2005. p. 189-196.
63. **Bentz, Dale P.; Peltz, Max A.; Snyder, Kenneth A.; Davis, Jeddrey M.** *VERDiCT: Viscosity enhancers reducing diffusion in concrete technology. A new approach to decreasing transport*. Concrete International : American Concrete Institute, 2009. p. 31-36.
64. **Bentz, D. P.; Snyder, K. A.; Cass, L. C.; Peltz , L. A.** *Doubling the service life of concrete structures I. Reducing ion mobility using nanoscale viscosity*

*modifiers*. Cement and Concrete Composites. Sept de 2008. Vol. 30, 8, p. 674-678.

65. **ASTM C-188**. *Standard test method for density of hidraulic cement* : ASTM INternational, 2004.

66. **ASTM C-311**. *Standard test method for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete* : ASTM INternational, 2004.

67. **ASTM C-29**. *Standard test method for bulk density ("unit weight") and void in aggregate* : ASTM International, 2004.

68. **ASTM C-127**. *Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate* : ASTM International, 2004.

69. **ASTM C-136**. *Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates* : ASTM International, 2004.

70. **ASTM C-33**. *Standard specification for concrete aggregates* : ASTM International, 2004.

71. **ASTM C-1498**. *Standard test method for hygroscopic sorption isotherms of building materials* : ASTM International, 2004.

72. **Verink, Ellis D. y Syrett, B. C.** *The Basis. Corrosion testing made easy* : Nace International, 1994. 3.

73. **ASTM C-143**. *Slump of hydraulic-cement concrete* : ASTM International, 2004.

74. **ASTM C-173**. *Standard test method for air content of freshly mixed concrete by volumetric method* : ASTM International, 2004.

75. **ASTM C-39**. *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens* : ASTM International, 2004.

76. **ACI 318S-08**. *Requisitos para concreto estructural y comentarios* : IMCyC, 2008.

77. **ASTM C-469**. *Standard test method for static modulus of elasticity and poisson´s ratio of concrete in compression* : ASTM International, 2004.

78. **Broomfield , John P.** *Corrosion of steel on concrete. Understanding, investigation and repair* : E & FN Spon, 1997.

79. **ASTM C-876.** *Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete* : ASTM International, 2004.

80. **Baroghel-Bouny, Véronique; Belin, Patrick; Maultzsch, Matthias; Henry, Dominique.** *AgNO<sub>3</sub> spray tests: Advantages, weakness, and various applications to quantify chloride ingress into concrete. Part 1: Non-steady state diffusion tests and exposure to natural conditions.* *Materials and Structures* : RILEM, 2007. 40, p. 759-781.