

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DEL CURADO INTERNO, MEJORADO CON UN ADITIVO  
REDUCTOR DE LA CONTRACCIÓN EN LA DURABILIDAD DE CONCRETOS  
EXPUESTOS A CONDICIONES ACELERADAS DE DETERIORO**

**POR**

**ING. FRANCISCO JAVIER VÁZQUEZ RODRÍGUEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE  
CONSTRUCCIÓN**

**MAYO, 2013**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO E INVESTIGACIÓN**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DEL CURADO INTERNO, MEJORADO CON UN ADITIVO  
REDUCTOR DE LA CONTRACCIÓN EN LA DURABILIDAD DE CONCRETOS  
EXPUESTOS A CONDICIONES ACELERADAS DE DETERIORO**

**POR**

**ING. FRANCISCO JAVIER VÁZQUEZ RODRÍGUEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES  
DE CONSTRUCCIÓN**

**DIRECTOR DE TESIS  
DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA  
CO-DIRECTOR DE TESIS  
DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL  
REVISOR EXTERNO DE TESIS  
DRA. ANA MARÍA GUZMÁN HERNÁNDEZ**



# ÍNDICE

## ÍNDICE DE CONTENIDO

### CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción.	2
1.2 Planteamiento del problema.	3
1.3 Justificación.	4
1.4 Hipótesis.	6
1.5 Objetivos.	7

### CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 El Cemento.	9
2.1.1 Origen del cemento portland.	10
2.1.2 Fabricación del cemento portland.	12
2.1.3 Composición química del cemento.	13
2.1.4 Tipos de cementos.	14
2.1.5 Hidratación del cemento portland.	15
2.2 Concreto.	17
2.2.1 Concreto de alto comportamiento.	19
2.2.2 Importancia de los concretos de alto comportamiento.	21
2.3 Generalidades de los aditivos.	22
2.3.1 Aditivos reductores de agua de alto rango.	23
2.3.2 Aditivos reductores de la contracción.	23
2.4 Durabilidad del concreto.	24
2.4.1 Factores que afectan la durabilidad.	26
2.4.2 Efecto de la carbonatación en el concreto.	26

### CAPITULO III. ANTECEDENTES

3.1 Mecanismo de contracción.	30
3.2 Contracción química.	30
3.3 Contracción autógena.	31
3.4 Contracción por secado.	32
3.5 Efecto de la hidratación en el cemento sistema cerrado.	33
3.6 Introducción a las técnicas de durabilidad en CAC.	35
3.7 Tecnología VERDiCT (curado interno mejorado).	36
3.8 Curado interno del concreto.	38
3.9 Curado interno con polímero súper absorbente.	42
3.10 Curado interno con agregado ligero.	44
3.11 Efecto de la carbonatación en los CAC.	53
3.12 Cloruros en el CAC.	56



## **CAPITULO IV.**

### **CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA SU USO EN LOS CAC.**

4.1 Pruebas preliminares de materiales utilizados.	66
4.1.1 Compacidad de los agregados.	66
4.1.2 Puntos de saturación.	66
4.2 Los Agregados.	68
4.2.1 Agregado ligero pumicitico.	68
4.2.2 Desorción de los agregados.	69
4.3 El agregado Calizo.	71
4.4 Cementantes.	74
4.4.1 Cemento portland ordinario.	74
4.4.2 Ceniza volante.	75
4.5 Efecto del tamaño de las partículas.	76
4.6 Descripción de las propiedades en estado fresco.	77
4.6.1 ASTM C138-Peso unitario.	77
4.6.2 ASTM C143-Revenimiento.	78
4.6.3 ASTM C173- Contenido de aire.	79
4.7 Pruebas de durabilidad a las que se sometieron los concretos en estado endurecido	80
4.7.1 ASTM C 642 – Absorción, Densidad y vacíos en el Concreto Endurecido	80
4.7.2 Permeabilidad rápidas de iones cloruro.	81
4.7.3 Difusión a iones cloruro.	83
4.7.4 Carbonatación acelerada.	84
4.8 Microscopía electrónica de barrido.	87

## **CAPÍTULO V. EXPERIMENTACIÓN**

5.1 Diseño experimental.	89
5.1.1 Diseño de Mezclas.	89
5.2 Preparación de los espécimen	91
5.2.1 Agregado grueso.	91
5.3 Contenido de sólidos en aditivos.	92
5.4 Procedimiento de especímenes.	93
5.5 Proceso de fabricación de las mezclas.	94
5.6 Pruebas al concreto en estado fresco.	97
5.6.1 Masa específica y contenido de aire.	97
5.6.2 Contenido de aire por método volumétrico.	98

5.7 Experimentación en estado endurecido.	100
5.7.1 Resistencia a la compresión y modulo de elasticidad.	100
5.7.2 Módulo de elasticidad.	101
5.7.3 Porosidad abierta al agua.	102
5.7.4 Permeabilidad a los iones cloruro.	103
5.7.5 Difusión de iones cloruro.	104
5.8 Preparación para pruebas de microscopía.	108

## **CAPITULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

6.1 Proporcionamientos.	111
6.2 Propiedades mecánicas.	112
6.2.1 Resistencia a compresión.	112
6.2.2 Módulo de elasticidad.	117
6.3 Porosidad abierta al agua.	123
6.4 Permeabilidad a los iones cloruro.	127
6.5 Difusión de iones cloruro.	131
6.6 Carbonatación acelerada.	138
7. Conclusiones.	143
8. Recomendaciones.	146
Anexo 1:	
Caracterización microestructural de los concretos estudiados.	148
Curriculum Vitae	165

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Cemento Portland	9
Fig. 2 Clínker recién salido del horno	10
Fig. 3 Ciudad de Pozzouli (Nápoles - Italia) en la actualidad	11
Fig. 4 Coliseo y Panteón Romano	11
Fig. 5 Acta patente del Cemento Portland por Joseph Aspdin	12
Fig. 6 Planta productora de cemento	13
Fig. 7 Pasarela de Sherbrooke (Quebec, Canadá), Puente de la confederación (Islas puerto príncipe, Canadá).	21
Fig. 8 Burj Khalifa (Dubái) , Torres petronas (Kuala Lumpur, Malasia)	21
Fig. 9 Diferentes tipos de aditivos para concretos	22
Fig.10 Hidratación del cemento a diferentes relaciones (a/c)	33
Fig.11 Cementos con agua externa disponible	34
Fig.12 Morteros que utilizan la tecnología VERDiCT	37
Fig.13 Mecanismo de la desorción de los agregados ligeros	38
Fig.14 Grado de hidratación en las pastas cementantes	39
Fig.15 En los puntos oscuros se observa la desorción del AL	40
Fig.16 Partículas de polímero súper absorbente saturadas	42
Fig.17 Adición de PSA sobre la deformación de las pastas	43
Fig.18 Efecto de la adición de PSA en la humedad relativa	43
Fig.19 Imagen en SEM agregado ligero	44
Fig.20 Fracción de pasta dentro del agregado ligero	45
Fig.21 Grado de hidratación en pastas de cemento	46
Fig.22. Concreto con sustitución de cemento por ceniza volante	47
Fig.23 Comparación de temperatura de hidratación	47
Fig.24 Comparación entre las diferentes sustituciones de arena silica	48
Fig.25 Comparación de contenido de cementantes en variación	48
Fig.26 Comparación de permeabilidad al aire	49
Fig.27 Comparación de absorción de agua entre mezclas con AL	50
Fig.28 Comparación de la permeabilidad rápida a los iones cloruro	50
Fig.29 Arcilla expandida en pigmento	51
Fig.30 Contracción volumétrica autógena	51
Fig.31 Contracción autógena en variación	52
Fig.32 Módulo de elasticidad variando el porcentaje de CV	52
Fig.33 Contracción autógena con diferentes % de CV	53
Fig.34 Carbonatación del concreto a 128 días de edad	54
Fig.35 Cloruro de calcio en forma de pellet	56
Fig.36 Estructuras dañadas en zonas marinas	57
Fig.37 Equilibrios de los cloruros en el concreto	57
Fig.38 Estructuras industriales vulnerables al ataque químico	58
Fig.39 Ataque de cloruros en estructuras industriales	59
Fig.40 Losa de concreto dañada por corrosión en ambiente industrial	59
Fig.41 Estructuras con PSA y AL como agentes de $Cl^-$	61
Fig.42 Propiedades de los concretos y su resistividad a la penetración	61
Fig.43 Comparación la ITZ agregado normal y concretos con AL	62
Fig.44 Contenido de cloruros en correlación a la distancia	62
Fig.45 Concretos con diferentes adiciones de cementantes	63
Fig.46 Profundidad de penetración de cloruros en variación del voltaje	63
Fig.47 Profundidad de penetración de cloruros en variación del voltaje	64

Fig. 48 Puntode saturación	66
Fig. 49 Agregado ligero (Pumicita)	68
Fig. 50 Desorción del agregado ligero	70
Fig.51 Agregado calizo utilizado en las mezclas de concreto	71
Fig.52 Granulometría de los agregados finos	73
Fig.53 Granulometría de los agregados gruesos	73
Fig.54 Cemento Portland ordinario (CPO 40R)	74
Fig.55 Planta generadora de energía donde proviene la ceniza volante	75
Fig.56 Equipo MICROTAC S3500	76
Fig.57 medidor de aire con cuello elevado	79
Fig.58 principio de funcionamiento equipo permeabilidad	82
Fig.59 Metodología para el corte del espécimen	83
Fig.60 Frente de carbonatación típico en el concreto	84
Fig.61 Cámara de carbonatación acelerada	85
Fig.62 Microscopio Electrónico de Barrido	87
Fig.63 Separación y tamizado del agregado grueso	91
Fig.64 Procedimientos humedad de obra y peso volumétrico	91
Fig.65 Determinación de absorción y de los agregados	91
Fig.66 Procedimientos para obtener los contenidos de sólidos	92
Fig.67 Tipos de cilindros que se elaboraron para las distintas pruebas	93
Fig.68 Moldes metálicos para vaciar el concreto	94
Fig.69 Maquina revolvedora utilizada para producir el concreto	94
Fig.70 Mezclado del concreto de referencia	95
Fig.71 Transportación del concreto	95
Fig.72 Compactación del concreto durante la fabricación de los cilindros	96
Fig.73 Especímenes cilíndricos después del acabado final	96
Fig.74 Llenado y enrasado para determinar posteriormente su masa	97
Fig.75 revenimiento del concreto en estado fresco	98
Fig.76 Prueba de contenido de aire por el método volumétrico	99
Fig.77 Preparación para el cabeceo de los cilindros de concreto	100
Fig.78 Ensaye mecánico a compresión en maquina universal	100
Fig.79 Medición de lecturas de módulo elástico	101
Fig.80 Máquina de ensayes mecánicos a compresión	101
Fig.81 Secado al horno y sumersión del concreto en agua	102
Fig.82 Corte e identificación de las rodajas para su posterior uso	102
Fig.83 Preparación de los especímenes para la prueba de permeabilidad rápida a los iones cloruro.	103
Fig.84 Verificación de conexiones en las terminales correspondientes	103
Fig.85 Preparación de especímenes y solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$	104
Fig.86 Saturación de especímenes con agua destilada	104
Fig.87 Se sumergieron los especímenes en solución de NaCl	104

Fig.88 Desbaste de los fragmentos expuestos a los cloruros	105
Fig.89 Recolección de los polvos después del maquinado	105
Fig.90 Especímenes rociados con $\text{AgNO}_3$	106
Fig.91 Identificación de los frascos para titulación	106
Fig.92 Balanza analítica y equipo de agitación de soluciones	107
Fig.93 Titulador cloruros en los concretos a diferentes profundidades	107
Fig.94 Preparación de materiales para su observación en el MEB	108
Fig.95 Proceso de recubierto, capa conductora de grafito	108
Fig.96 Muestras sobre resina cristal para su análisis en MEB	109
Fig.97 Resistencia a la compresión edad de 180 días	112
Fig.98 Comparativa en resistencia a la compresión en las mezclas R y V.	113
Fig.99 Comparativa en resistencia a la compresión en las mezclas CI, CI+ARC, V.	114
Fig.100 Comparativa en resistencia a la compresión en las mezclas R, ARC y CV.	115
Fig.101 Comparativa en resistencia a la compresión en las mezclas V y V+CV.	116
Fig.102 Comparativa del módulo de elasticidad de los concretos a 28 y 90 días.	117
Fig.103 Módulo de elasticidad a los 28 días	118
Fig.104 Módulo de elasticidad a los 90 días	118
Fig.105 Comparativa de la mezcla de referencia con las mezclas donde se utilizó la tecnología VERDiCT	119
Fig.106 Comparativa de la mezcla de referencia	119
Fig.107 módulos de elasticidad en concretos con CI	120
Fig.108 Comparación de mezclas donde se utilizó el curado interno mejorado.	121
Fig.109 Absorción después de la inmersión.	123
Fig.110 Absorción después de la inmersión después de hervir los especímenes	124
Fig.111 Porcentaje de vacíos permeables en los concretos	125
Fig.112 Desarrollo de la permeabilidad a los iones cloruro	127
Fig.113 Difusión de los iones cloro a 90 días de edad.	131
Fig.114 Coeficiente de difusión de cloruros mezcla R	132
Fig.115 Coeficiente de difusión de cloruros mezcla CI	133
Fig.116 Coeficiente de difusión de cloruros mezcla ARC	133
Fig.117 Coeficiente de difusión de cloruros mezcla CI +ARC	134
Fig.118 Coeficiente de difusión de cloruros mezcla V	134
Fig.119 Coeficiente de difusión de cloruros mezcla CV	135
Fig.120 Coeficiente de difusión de cloruros mezcla V+CV	135
Fig. 121 Carbonatación acelerada mezclas R, CI, ARC y CI+ARC	138

Fig.122 Carbonatación acelerada mezclas V, CV, V + CV	139
Fig.123 Profundidad de carbonatación	140
Fig.124 Tamaño de partícula en micras de la ceniza volante	150
Fig.125 Tamaño de partícula en micras del CPO	150
Fig.126 Agregado ligero adherido a la pasta en el concreto	151
Fig.127 Zona interfacial entre el agregado ligero y la pasta del concreto	151
Fig.128 Agregado ligero a 0.5 mm- 1.8 x (tomada con estereoscopio)	152
Fig.129 Imagen en Microscopio Electrónico de Barrido, agregado ligero (pumicita) a 50 µm-400 x	152
Fig.130 Imagen en Microscopio electrónico de Barrido, agregado ligero (pumicita) a 10 µm-2,000 x dentro de un poro del AL	153
Fig.131 Imagen en Microscopio electrónico de Barrido, agregado ligero (pumicita) a 50 µm-400 x	153
Fig.132 Imagen en MEB, (R) a 28 días a 100 µm-100 x	154
Fig.133 Pumicita en mezcla de CI +ARC, 28 días a 100 µm-100 x	155
Fig.134 Imagen en Microscopio electrónico de Barrido, agregado ligero (Pumicita) CI +ARC 28d a 10 µm-2000 x	155
Fig.135 Imagen en Microscopio electrónico de Barrido, agregado ligero (Pumicita) VERDiCT 28d a 100 µm-100 x	156
Fig.136 Imagen en Microscopio electrónico de Barrido, agregado ligero (Pumicita) VERDiCT a 50 µm-500 x	157
Fig.137 Imagen en Microscopio electrónico de Barrido, agregado ligero (Pumicita) VERDiCT a 10 µm-1000 x	157
Fig.138 Imagen en Microscopio electrónico de Barrido, agregado ligero (Pumicita) VERDiCT + CV a 10 µm-1000 x	158
Fig.139 Imagen en Microscopio electrónico de Barrido, agregado ligero (Pumicita) VERDiCT + CV a 10 µm-1000 x	158
Fig.140 Imagen en Microscopio electrónico de Barrido, agregado ligero (Pumicita) V + CV a 10 µm-1000 x	159
Fig.141 Microanálisis por EDS del concreto de referencia	160
Fig. 142 EDS para concreto CI	161
Fig.143 EDS para concreto CI + ARC	161
Fig. 144 EDS para concreto VERDiCT	162
Fig.145 EDS para concreto V + CV imagen	163
Fig. 146 EDS para concreto V+ CV tabla	164

## **DEDICATORIA**

Antes de dedicar este trabajo y darle gracias a Dios (Sl.83:18) por cuidar a mi familia y darme todas las bendiciones para seguir con todos mis proyectos de vida.

### **A toda mi familia; en especial a mis señores padres:**

Sra. María Alicia Rodríguez de la Rosa (Madre quiero darte las gracias por todo lo que me has dado y por forjarme ese carácter recio de no decaer ante la adversidad).

Sr. Francisco Vázquez Guerrero (Papá tal ves siempre se te olvide que estudié y me inventes profesiones, pero esto también va por ti).

### **A mis hermanos:**

Edson Jovan Vázquez Rodríguez

Fabrizio Emiliano Vázquez Rodríguez

(Muchachos espero no ser siempre el hermano quisquilloso, pero tomen decisiones correctas en cada etapa de sus vidas).

### **A mi novia que siempre me ha apoyado en cualquier momento:**

Marlen Gallegos Jasso , quiero agradecerte por estar a mi lado siempre en cualquier momento en las buenas y en las malas, por siempre escuchar todas mis inquietudes científicas aunque ni me entiendas y sobre todo apoyarme en todos mis proyectos de vida.

## AGRADECIMIENTOS

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por las becas y por el apoyo otorgado a este proyecto de investigación.
  - A la Universidad Autónoma de Nuevo León.
  - A la **Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L.** por aceptarme en el programa de estudios de posgrado de la maestría en ciencias con orientación en materiales de construcción.
  - Al personal de la **FIME – U.A.N.L.** por su apoyo para la caracterización de los materiales.
  - A los **Doctores** miembros del cuerpo académico del programa de maestría que me ayudaron en mi formación académica en el área de materiales de construcción.
  - Al **Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez** por la gestión y apoyo en los trámites de titulación y del proceso de revisión de tesis.
  - A los **Doctores** miembros del cuerpo académico del programa de maestría que me ayudaron en mi formación académica en el área de materiales de construcción.
  - Al **Dr. Alejandro Duran Herrera** por plantear este proyecto de tesis y enriquecer mi formación en el área del concreto, compartiéndome sus valiosos conocimientos.
  - Al **Dr. José Manuel Mendoza Rangel**, por sus consejos, paciencia y apoyo en las revisiones respecto a esta tesis y durante todo el desarrollo de esta.
  - Al **Dr. Javier Rodrigo González López**, Quien me invito al programa de maestría en materiales de construcción de la FIC y por contar siempre con su desinteresado apoyo durante la última etapa de este proyecto.
  - A la **Dra. Ana María Guzmán Hernández** por aceptar la revisión de este trabajo y por valiosa amistad, generosidad y consejos en lo que respecta a mi formación académica.
  - Al **MC. Edgar Ulises de los Santos Rodríguez** por su apoyo durante el monitoreo y prueba de todo el proyecto VERDiCT.
  - A mis compañeros de la generación de maestría:
    - \*Ing. Myrna Sinaí Guevara Laureano
    - \*Ing. Cesar Aguilar Villarreal
    - \*Ing. Rogelio Soto Ibarra MC.
    - \*Ing. Erendira Yuritzí Javier Contreras
    - \*Arq. Bárbara Ayub Francis
    - \*Arq. Eric Enrique Sánchez Díaz
    - \*Ing. Dania Cardenas Nuño
  - Al personal de la **Biblioteca** ya que siempre me apoyaron para las cuestiones bibliográficas y de investigación:
    - \*Lic. María de Jesús Puente Hernández
    - \*Srita. Victoria Helena Conde Rivera
  - Al personal de la **Subdirección del Posgrado de la FIC- UANL**
    - \*Ing. Ramiro Torres Pérez
    - \*Srita. Jessyca Saucedo Flores
    - \*Srita. Myriam Isabel Guel Segundo
  - A la Ing. Sandra Elizabeth del Rio Muñoz, Directora de la Preparatoria No.16 UANL por todo el apoyo para la gestión de la titulación.
  - A mis amigos de la Preparatoria No. 16 de la UANL.
  - A todos mis amigos y compañeros, que de alguna manera me han apoyado siempre y durante esta etapa de mi formación profesional, muchas gracias.
-



“El futuro de una patria, tiene que ser necesariamente un futuro de hombres de ciencia, de hombres de pensamiento, porque precisamente es lo que se necesita sembrar, lo que más se necesita sembrar son oportunidades a la inteligencia”

**Fidel castro**



# **CAPÍTULO**

# **INTRODUCCIÓN**

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad se pueden observar edificaciones tales como vivienda, edificios y plantas industriales, en las que se cuenta con un diseño estructural que tiene solicitaciones mecánicas aptas para sus respectivas funciones; también la arquitectura actual ha formado parte de la presente urbanización de las grandes ciudades; para esto los materiales con que se construye estos tipos de edificaciones deben encontrarse en ambientes óptimos para una vida útil más duradera. En caso de no ser así, los problemas de durabilidad comenzarán a desempeñar un papel importante en los aspectos estéticos y estructurales. Existen diferentes tipos de ambientes que propician fenómenos que dañan los materiales de construcción, haciéndolos vulnerables a presentar problemas patológicos. Los más comúnmente observados corresponden al fenómeno de la carbonatación, que puede dañar al concreto reforzado, reaccionando con el  $\text{Ca(OH)}_2$  del concreto. Con este fenómeno, el  $\text{CO}_2$  podrá reaccionar y eliminar la capa pasiva del acero de refuerzo, propiciando la corrosión. Por otro lado, los ambientes marinos son lugares perjudiciales para el concreto reforzado, debido a que el agua de mar contiene iones cloruro que podrán reaccionar con el acero de refuerzo, formando cloruro férrico. En ambos ambientes ya sea urbano o marítimo existen agentes químicos que pueden afectar la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado y de las estructuras de acero. La calidad del concreto, su compactación y su curado están ligados directamente con el incremento de la vida útil. En este sentido, el curado interno mejorado con aditivos reductores de la contracción, como se propone en la tecnología VERDICT (viscosity enhancers reducing diffusion in concrete technology ) es una innovadora alternativa para mitigar los problemas de durabilidad. Esta tecnología se propone en este trabajo de investigación, para evaluar su efecto en concretos de alto comportamiento bajo condiciones aceleradas de deterioro, en el laboratorio.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los concretos reforzados expuestos a ambientes dañinos, tales como los ambientes marinos, donde la concentración de iones cloruro en el ambiente y la humedad deterioran las estructuras de concreto reforzado, en otros casos en la producción de materias primas alcalinas, en donde una gran cantidad de sales base cloro resultan como material de desecho, estos ambientes, en combinación con la presencia de carbonatación, provocan un deterioro sinérgico acelerado, debido a la combinación de los factores dañinos, tales como: la pérdida de alcalinidad y migración de iones cloruro. Las estructuras de concreto reforzado expuestas a ambientes industriales tales como la industria química que procesa materiales alcalinos, tienen una vida útil menor debido a la alta concentración de iones cloruro que se puede acumular rápidamente en su matriz cementante y dañar el refuerzo. La carbonatación se desarrolla debido a la alta concentración de  $\text{CO}_2$  en el ambiente y a la generación de gases de combustión derivados de los procesos de combustión o destilación de materiales; por ejemplo, en la producción de acero y la calcinación de la caliza en la producción de cementos. La combinación de estos dos fenómenos corrosivos y la calidad del concreto dictarán el avance del deterioro de las estructuras de concreto reforzado, por lo que se recomienda el uso de concretos de alto comportamiento (CAC) elaborados de una manera eficaz.

Los CAC utilizan relaciones agua/cemento ( $a/c$ ) bajas, por lo que es posible conseguir una matriz cementante altamente densificada; pero algunos problemas relacionados con la contracción del concreto se pueden presentar debilitando la matriz y permitiendo el fácil ingreso de iones agresivos cuando están presentes grietas por contracción. Algunos investigadores <sup>(1)</sup> han propuesto novedosas tecnologías para incrementar la vida útil del concreto a partir de uso de agregados ligeros (AL) como un medio de curado interno (CI).

El uso de la técnica de CI ha demostrado ser efectivo para reducir el fenómeno de la contracción autógena en los CAC; pero la búsqueda de un mejor desempeño propone utilizar aditivos reductores de la contracción (ARC). Estos aditivos son componentes de base polimérica (propilenglicol), cuya finalidad es incrementar la viscosidad de la solución de poro, como una forma de disminuir los coeficientes de migración iónicos, debido a que la efectividad del CI es una función del desorción del agua de curado interno; por ello se propone una medida para reducir el deterioro, saturar el AL con una solución acuosa con ARC, así como también adicionar ARC al agua de mezclado y analizar el efecto de estas condiciones sobre la durabilidad a lo que se le conoce como la tecnología VERDiCT.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN.**

En la actualidad, la industria de la construcción se ha dado a la tarea de reducir los costos y, sobre todo, jugar un papel importante en cuestiones de sustentabilidad; es por ello que determinar la vida útil de las estructuras es de vital importancia. Cabe mencionar que se debe tener un control detallado de los efectos que la relación (a/c) puede ocasionar en un concreto, ya que en la mayoría de las construcciones se tienen altas relaciones (a/c), lo que resulta en tener mayor porosidad, siendo así vulnerables al ingreso de agentes químicos agresivos ya sea expuestas en ambientes industriales o controlados de laboratorio. La vida útil de una estructura de concreto reforzado está en función de los fenómenos de transporte en la solución de poro y estos se pueden ver reducidos al minimizar la relación agua- cemento (a/c). Las técnicas utilizadas para producir CAC han tenido un gran auge en los últimos años, desde la utilización de materiales alternativos, como son: la ceniza volante, el humo de sílice y la escoria granulada de alto horno, entre otros; además del uso de agentes administradores del CI, como son: los polímeros súperabsorbentes (SAP), la arcilla expandida, la pumicita y otros agregados ligeros. Ahora un enfoque innovador comienza a utilizarse en la investigación en la rama de la construcción.

El principio científico se deriva de las ecuaciones de difusión que indican que las constantes de difusión deberán ser proporcionales a la razón de la viscosidad del agua o la solución que contiene el electrolito. Una dependencia inversa entre los coeficientes de difusión y la viscosidad en la solución está igualmente presentada por la ecuación de Stokes-Einstein:

$$D_o = \frac{k_B T}{6\pi\eta_0 r}$$

6nyor

onde:  $D_o$  es el coeficiente de difusión de un ion,  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $T$  es la temperatura,  $r$  es el radio de la partícula difundida, y  $\eta_0$  es la viscosidad de la solución. Esta relación sugiere que, conforme se incrementa la viscosidad de la solución, se reduce la difusión; lo que se puede entender que las partículas dispersas en la solución que contribuyen al incremento de la viscosidad sirven como barreras físicas al transporte de los iones. <sup>(1)</sup>

El papel que desempeña la solución de poro juega un rol importante con respecto al ingreso de la penetración de iones agresivos tales como los iones cloruro y la carbonatación. Cabe mencionar que estos dos fenómenos de transporte tienen una difusión diferente, por lo cual el ARC ayuda a minimizar el ingreso de estos agentes dañinos modificando la viscosidad y la solución de los poros capilares del concreto.

## **1.4 HIPÓTESIS**

El curado interno mejorado, administrado a concretos de alto comportamiento mediante un agregado ligero pumicítico saturado, en una solución acuosa que contenga un aditivo reductor de la contracción, conduce a mejorar indicadores de durabilidad asociados con propiedades de transporte de fluidos.

## **1.5 OBJETIVOS.**

### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL:**

Evaluar la efectividad del curado interno mejorado promovido mediante un agregado ligero pumicítico saturado con una solución de agua con aditivo reductor de la contracción en relación con la durabilidad de los concretos de alto comportamiento, expuestos en el laboratorio a condiciones aceleradas de deterioro.

### **1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Evaluar el módulo de elasticidad, a 28 y 90 días y la resistencia a la compresión a edades de 14, 28, 90 y 180 días respectivamente.
- Identificar los beneficios y las desventajas de la utilización del curado interno mejorado con agregado ligero pumicítico y aditivo reductor de la contracción.
- Determinar los indicadores de durabilidad tales como:
  - La porosidad abierta al agua.
  - La permeabilidad a los iones cloruro.
  - La difusión de los iones cloruro.
  - El avance del frente de carbonatación bajo condiciones aceleradas.
  - La caracterización microestructural de los concretos endurecidos a los 28 días de edad.





## **CAPÍTULO 2**

# **MARCO TEÓRICO**

## 2.1 EL CEMENTO

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan por reacción química con el agua. Durante la reacción llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra llamada pasta. Cuando se adicionan con la pasta de cemento, el agua y los agregados tales como: arena, grava, piedra triturada u otro material granular, la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto, que es el material de construcción más versátil y usado en el mundo (fig.1).<sup>(2)</sup>



Fig. 1 Cemento portland

El cemento Portland se obtiene calentando una mezcla de piedra caliza y arcilla u otros materiales a granel, de composición similar y reactividad suficiente. En última instancia a una temperatura de aproximadamente 1450°C. La fusión parcial se produce y los grumos de clínker también se producen.<sup>(2)</sup>

El clínker se mezcla con un pequeño por ciento de yeso fino para hacer que el cemento se pueda hidratar. El yeso controla la velocidad de hidratación del conjunto y puede ser parcialmente sustituido por otras formas de sulfato de calcio.<sup>(2)</sup>

Algunas especificaciones permiten la adición de otros materiales en la etapa de molienda. El clínker tiene típicamente una composición de 67% de CaO, 22% de SiO<sub>2</sub>, 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% de FeO y 3% de otros componentes, y normalmente contiene cuatro fases principales, denominadas alita, belita, alúmina y ferrita. También contiene otras fases tales como sulfatos alcalinos y óxidos de calcio, que están normalmente presentes en cantidades menores (ver fig.2)<sup>(3)</sup>



Fig. 2 Clínker recién salido del horno

### **2.1.1 ORIGEN DEL CEMENTO PORTLAND**

El empleo de materiales cementantes es muy antiguo. Los egipcios, ya utilizaban yeso impuro calcinado. Los griegos y los romanos, utilizaban cal calcinada y, posteriormente, aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas, este fue el primer concreto de la historia. Un mortero de cal no endurece bajo el agua, por lo tanto, en construcciones sumergidas bajo el agua. La sílice activa y la alúmina se encuentran en las cenizas y en las tejas se combinaban con la cal para producir lo que se conoce como cemento puzolánico, nombre proveniente de un poblado llamado pozzuoli (fig. 3), cerca del Vesubio, donde se encontró por primera vez ceniza volcánica.<sup>(4)</sup>



Fig. 3 ciudad de Pozzuoli (Nápoles - Italia), en la actualidad

En la Edad Media hubo una disminución general en la calidad y el uso del cemento y solo en el siglo XVIII se observó un progreso en el conocimiento de los cementos. <sup>(4)</sup>

En 1756, John Smeaton fue comisionado para reconstruir el faro de Eddystone en la costa de Inglaterra, y encontró que el mejor mortero era el que se producía cuando se mezclaba puzolana con caliza que contenía una considerable cantidad de material arcilloso. <sup>(4)</sup>

Al reconocer la importancia que tenía la arcilla, Smeaton fue el primero en comprender las propiedades químicas de la cal hidráulica que resulta de la quema de cal y arcilla. Algunas estructuras romanas en las cuales la mampostería se unió con morteros, tales como el Coliseo romano y el pont Du Gard, cerca de Nîmes, y estructuras de concreto, como el Panteón, en Roma, han sobrevivido en esta época, con su material cementante aún duro y firme. (Ver fig.4) <sup>(4)</sup>



Fig. 4 El Coliseo y El Panteón en Roma

El cemento pórtland fue patentado en 1824, por un fabricante de ladrillos y constructor de Leeds, Inglaterra, llamado Joseph Aspdin. El cemento que él produjo resultaba de calentar una mezcla de arcilla finamente dividida y caliza dura, en un horno, hasta que el CO<sub>2</sub> fuera liberado; esta temperatura era mucho más baja que la requerida para la clinkerización. El prototipo del cemento moderno producido en 1845, por Isaac Jonson. (fig.5) <sup>(4)</sup>

Originalmente a este material se le dio el nombre de cemento pórtland debido a la similitud en color y calidad del cemento endurecido con la roca de pórtland una piedra caliza extraída en Dorset Inglaterra.

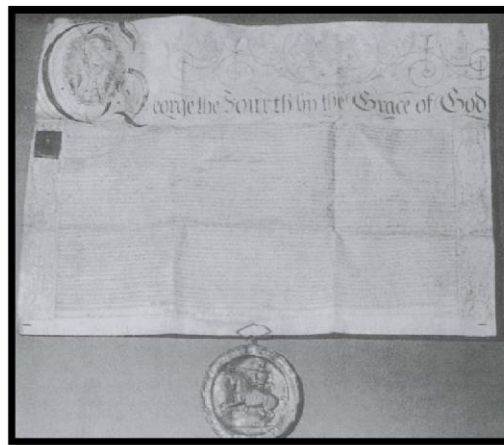


Fig. 5 Acta de la patente del cemento pórtland, por Joseph Aspdin<sup>(4)</sup>

### 2.1.2 FABRICACIÓN DEL CEMENTO PÓRTLAND

El proceso de fabricación del cemento pórtland consiste esencialmente en la molienda y el mezclado en ciertas proporciones, de la materia prima que posteriormente se quema en hornos rotatorios industriales, a una temperatura aproximada de 1400 C. A esta temperatura, el material se sinteriza y se fusiona parcialmente en partículas redondas conocidas como clínker; entonces el clínker es enfriado y molido a polvo fino con algo de yeso (sulfato de calcio). El producto resultante es el cemento Pórtland comercial, tan ampliamente usado alrededor de mundo. (Ver. fig. 6)<sup>(4)</sup>

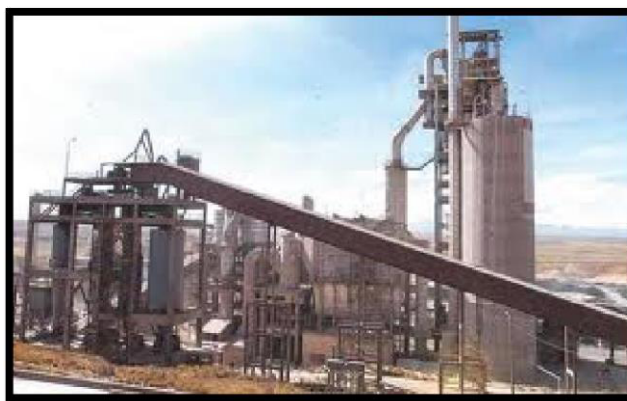


Fig. 6 Planta productora de cemento

### 2.1.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO

Los materiales empleados como materia prima en la fabricación del cemento Pórtland consisten principalmente de: caliza, sílice, alúmina y óxido de hierro. Durante la calcinación, estos óxidos interactúan dentro del horno para formar una serie de productos complejos. Para el cemento pórtland, el resultado de los análisis químicos de rutina se reportan en óxidos de los compuestos presentes. Una determinación directa de la composición de los compuestos es complicada.

Para expresar los óxidos individuales y los compuestos del clínter habitualmente se utilizan las siguientes abreviaciones. (Ver tabla No. 1.)<sup>(5)</sup>

Tabla No.1 Composición química del cemento pórtland<sup>(5)</sup>

Óxido	Abreviación	Compuesto	Abreviación
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
$\text{SiO}_2$	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	A	$3\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

En la actualidad se fabrican diferentes tipos de cementos pórtland para satisfacer varios requisitos físicos y químicos en aplicaciones específicas. Las especificaciones están dadas de acuerdo con la ASTM C-150 y ASTM C-1157. Esta norma para cemento portland designa 8 tipos de cementos, usando los números romanos como se puede observar en la tabla (ver tabla No. 2)

Tabla No.2 Tipos de cementos

Tipo I	Normal.
Tipo IA	Normal con aire incluido.
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos.
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido.
Tipo III	Alta resistencia inicial(alta resistencia temprana).
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido.
Tipo IV	Bajo calor de hidratación.
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos.

A continuación se describen brevemente los más utilizados.

## 2.1.4 TIPOS DE CEMENTOS

### Tipo I

El cemento tipo I es un cemento para uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias. Sus empleos en concreto incluyen pavimentos, pisos, edificios de concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado y precolado. <sup>(2)</sup>

### Tipo II

El cemento tipo II se usa donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos. Se le puede utilizar en estructuras normales o en miembros expuestos a suelos o agua subterránea, donde la concentración de sulfatos sea más alta que la normal, pero no severa. El cemento tipo II tiene propiedades de moderada resistencia a los sulfatos, porque contiene no más del 8% de aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A). <sup>(2)</sup>

### **Tipo III**

El cemento tipo III ofrece resistencia a edades tempranas, normalmente una semana o menos. Este cemento es química y físicamente similar al cemento tipo I, a excepción de que sus partículas se muelen más finamente. Se usa cuando es necesario remover las cimbras lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente. En clima frío, su empleo permite una reducción en el tiempo de curado. <sup>(2)</sup>

A pesar de que se puede usar un alto contenido de cemento tipo I para el desarrollo temprano de la resistencia, el cemento tipo III puede ofrecer esta propiedad más fácilmente y más económicamente. <sup>(2)</sup>

### **2.1.5 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PÓRTLAND**

En la fabricación del clinker de cemento portland, durante la calcinación, el calcio combina con otros componentes de la mezcla cruda para formar cuatro compuestos principales que corresponden el 90% de la masa del cemento.

Durante la molienda se añaden yeso (4% hasta 6%) u otra fuente de sulfato de calcio y otros auxiliadores de molienda. Los químicos del cemento usan las siguientes abreviaturas químicas para describir los compuestos:<sup>(2)</sup>

A=  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , C =  $\text{CaO}$ , F =  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , H =  $\text{H}_2\text{O}$ , M =  $\text{MgO}$ ,

S =  $\text{SiO}_2$  y S^=  $\text{SO}_3$ .



Se usa el término “fase” preferiblemente al término “compuesto”, para describir los componentes del clinker. Siguen los cuatro compuestos principales en el cemento portland, sus fórmulas químicas aproximadas y sus abreviaturas:<sup>(2)</sup>

Silicato tricálcico  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$

Silicato dicálcico  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$

Aluminato tricálcico  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$

Ferroaluminatotetracálcico  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$ .

Siguen las formas de sulfato de calcio, sus fórmulas químicas y sus abreviaturas: Sulfato de calcio anhidro (anhidrita)  $\text{CaSO}_4 = \text{CaO}\cdot\text{SO}_3 = \text{CS}^\wedge$

Sulfato de calcio dihidratado (yeso)<sup>(2)</sup>

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO}\cdot\text{SO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{C S}^\wedge \text{H}_2$  Hemidrato de sulfato de calcio

$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} = \text{CaO}\cdot\text{SO}_3\cdot 1/2\text{H}_2\text{O} = \text{C S}^\wedge \text{H}1/2$

El yeso, sulfato de calcio dihidratado, es la fuente de sulfato más empleada en el cemento.<sup>(2)</sup>

El  $\text{C}_3\text{S}$  y el  $\text{C}_2\text{S}$ , en el clinker se conocen como alita y belita, respectivamente. La alita constituye del 50% al 70% del clinker, mientras que la belita es responsable sólo del 15% al 30%. Los compuestos de aluminato constituyen aproximadamente del 5% al 10% del clinker y los compuestos de ferrita, del 5% al 15%.<sup>(2)</sup>

En presencia de agua, estos compuestos se hidratan (se combinan químicamente con el agua) para formar nuevos compuestos, que son la infraestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto. Los silicatos de calcio,  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ , se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (arcaicamente llamado gel de tobermorita).<sup>(2)</sup>

El cemento pórtland hidratado contiene del 15% al 25% de hidróxido de calcio ( $\text{CaOH}$ ) y aproximadamente un 50% de silicato de calcio hidratado, en masa.

La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al silicato de calcio hidratado. El  $C_3A$  reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar aluminato tetracálcico hidratado. El  $C_4AF$  reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado. El  $C_3A$ , sulfato (yeso, anhidrita u otra fuente de sulfato) y el agua se combinan para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado), monosulfato de calcio y otros compuestos afines.<sup>(2)</sup>

## 2.2 EL CONCRETO

El material de construcción más extensamente usado es el concreto, que se produce generalmente mezclando cemento portland con arena, piedra triturada y agua. El hombre no consume otro material con excepción del agua en las mismas cantidades.<sup>(5)</sup> Es un material comúnmente usado en la construcción, es un compuesto particulado en el que tanto las partículas como la matriz son materiales cerámicos. En el concreto, la arena y un agregado se unen en una matriz de cemento pórtland.<sup>(2)</sup>

Una reacción de cementación entre el agua y los minerales de cemento genera una matriz resistente que fija los agregados en su sitio, proporcionando al concreto una buena resistencia a la compresión.<sup>(5)</sup> Otra definición es que el concreto es un material compuesto que consiste esencialmente en un medio conglomerante, dentro del cual se encuentran embebidas partículas o fragmentos de agregados.

En el concreto de cemento hidráulico, el medio conglomerante está formado por una mezcla de concreto hidráulico y agua.<sup>(5)</sup>

El concreto tiene las siguientes propiedades:

- Trabajabilidad.
- Consistencia.
- Durabilidad.
- Impermeabilidad.
- Cambio de volumen.
- Resistencia.

**Trabajabilidad.** Es la facilidad con que pueden mezclarse los ingredientes de la mezcla aunada a la capacidad de ésta para manejarse, transportarse y colocarse con poca pérdida de homogeneidad. Se mide por la consistencia o fluidez con la obtención del revenimiento. (Norma mexicana NMX-C-156 ONNCCE). Una mezcla bien proporcionada y trabajable perderá el revenimiento lentamente; en cambio, un mezcla deficiente se desmoronará, despedazará y segregará. <sup>(5)</sup>

**Consistencia.** Se refiere al carácter de la mezcla respecto a su fluidez, tanto en estado seco como fluido. <sup>(5)</sup>

**Durabilidad.** Es la capacidad de resistencia a la intemperie, a la congelación y a la descongelación, a la acción de agentes químicos y al desgaste. <sup>(5)</sup>

**Impermeabilidad.** Ésta se logra reduciendo la cantidad de agua en la mezcla. El exceso de agua deja vacíos y cavidades después de la evaporación y si estos están interconectados, el agua puede penetrar o atravesar el concreto. La inclusión de aire y el curado óptimo y eficiente aumentan la impermeabilidad. <sup>(5)</sup>

**Cambios de volumen.** La expansión debida a las reacciones químicas de los ingredientes del concreto puede ocasionar el alabeo y la contracción durante el secado, así como la aparición de grietas. <sup>(5)</sup>

**Resistencia.** Ésta determina mediante una muestra en forma de cilindro, sometida a esfuerzos de compresión. Como el concreto aumenta la resistencia conforme pasa el tiempo, la resistencia a la compresión a los 28 días es la medida más común de esta propiedad. Desde el punto de vista normativo, se toman como referencia los siguientes códigos del ACI C192 (Investigaciones de prueba y de laboratorio), C31 (investigación con especímenes de campo), C39 (Procedimientos de prueba) C42, (Pruebas con núcleos de concreto obtenidos por perforación). <sup>(5)</sup> Para optimizar los costos, la cantidad de cemento debe mantenerse al mínimo. Esto se logra seleccionando el agregado grueso del tamaño máximo posible, para tener menos huecos y, por lo tanto, necesita menos pasta de cemento para llenarlos. La relación (a/c) debe ser lo más baja posible para producir

un concreto trabajable que garantice la resistencia a la compresión, durabilidad e impermeabilidad especificadas y cuya contracción no sea excesiva.<sup>(6)</sup>

La relación (a/c) determina las características y propiedades del concreto endurecido, especialmente su resistencia. Los valores más bajos de esta relación indican las resistencias más altas.<sup>(6)</sup>

### **2.2.1 CONCRETOS DE ALTO COMPORTAMIENTO (CAC)**

El concreto de cemento Portland se utiliza desde 1850, y hasta 1970 la atención se enfocó en fabricar concretos de alta resistencia a la compresión; fue entonces cuando, a raíz de esta particularidad y con la ayuda de los aditivos superplastificantes, se pudo disminuir la relación (a/c), en lugar de utilizarlos exclusivamente como fluidificantes para concretos convencionales.<sup>(8)</sup>

También, con el afán de duplicar las resistencias a la compresión, surgieron en la década de 1980 los concretos de alto comportamiento CAC, conocidos también como concretos de alto desempeño. El nombre de concretos de alto desempeño se propuso debido a que, además de su baja relación (a/c) también tienen otras características mejoradas, tales como: consistencia más alta, módulo elástico más alto, mayor resistencia al esfuerzo de flexión, permeabilidad más baja, mejor resistencia a la abrasión y mayor durabilidad.<sup>(9)</sup>

El CAC es aquél que cumple especificaciones especiales de desempeño y requerimientos de uniformidad que no siempre pueden alcanzarse de manera rutinaria al utilizar componentes, prácticas de mezclado, colocación y curados tradicionales<sup>(7)</sup>. En general, se puede decir que estos concretos se desarrollan para conseguir ciertas características en aplicaciones y ambientes particulares y que tienen una (a/c) menor que 0.42, que se acerca al valor teórico sugerido por Powers, para asegurar una hidratación completa de cemento pórtland<sup>(8)</sup>. El uso de relaciones (a/c) bajas conlleva problemas de contracción autógena que impactan directamente en el agrietamiento del concreto.<sup>(9)</sup>

El concreto de alto desempeño se clasifica en cinco clases, pero esta clasificación no es tan arbitraria como parece a simple vista; mas bien se deriva de una combinación de la experiencia y los últimos avances de la industria, la escala de alta resistencia ha sido dividida en cinco clases, que corresponden a un aumento de 25 MPa en cada caso, tal como se ilustra en la siguiente tabla 3. <sup>(9)</sup>

La clase I, representa al concreto de alto desempeño que posee una resistencia a la compresión de entre 50 y 75 MPa. La clase II, entre 75 y 100 MPa, la clase III entre 100 y 125 MPa; la clase IV entre 125 y 150 MPa; y la clase V por encima de los 150 MPa. <sup>(9)</sup>

Tabla No.3. Diferentes tipos de concretos de alto desempeño<sup>(9)</sup>

Resistencia a la compresión (MPa)	50	75	100	125	150
Clase de concreto de alto desempeño	I	II	III	IV	V

Los concretos de alto comportamiento están íntimamente relacionados con la superficie interna del poro. La selección de los materiales, en particular, los cementantes y el agregado grueso, son de gran importancia.

Algunas aplicaciones del concreto de alto comportamiento se muestran en las figuras 7 y 8.



Fig. 7 a) Pasarela de Sherbrooke (Quebec, Canadá) b) Puente de la confederación (Islas Puerto Príncipe, Canadá).

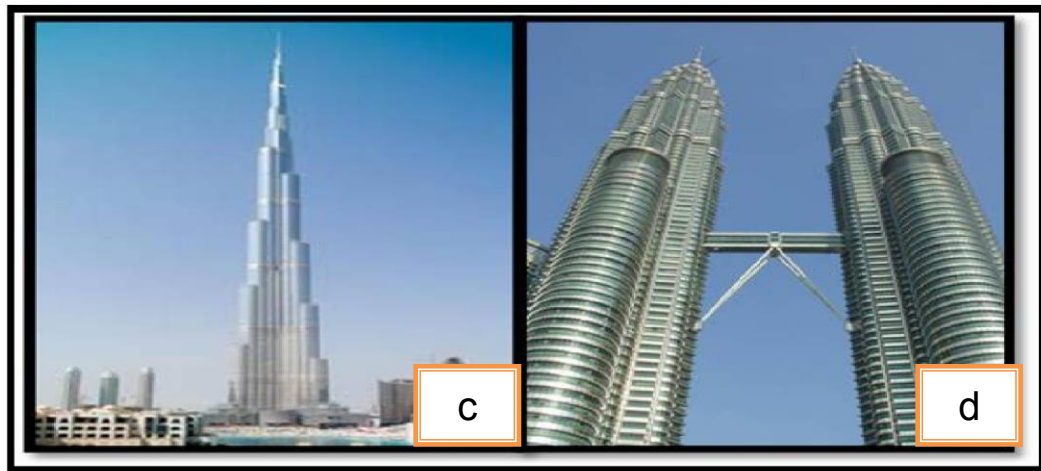


Fig. 8 c) Burj Khalifa (Dubái) d) Torres petronas (Kuala Lumpur, Malasia)<sup>9</sup>

## 2.2.2 IMPORTANCIA DE LOS CAC

El incremento reciente en el uso de los concretos con relaciones ( $a/c$ ) bajas ha generado un nuevo interés sobre el estudio de la contracción autógena. La contracción autógena se evidenció por primera vez en 1930;<sup>(10)</sup> pero en ese tiempo era despreciable en los concretos que se utilizaban, en comparación con la contracción por secado, ya que los concretos utilizados en aquel tiempo tenían relaciones ( $a/c$ ) altas ( $\geq 0.5$ ).

El desarrollo de contracción autógena no controlada puede ser catastrófico, desde el punto de vista de la durabilidad, porque se desarrolla tan pronto la reacción de hidratación comienza y se desarrolla cuando el concreto es muy débil frente a los esfuerzos de tensión que ésta induce.

Si el concreto no se cura, esto puede resultar en un severo agrietamiento temprano que puede llevar a un posterior deterioro de la estructura; es decir, si la mezcla no está diseñada para cumplir las condiciones de servicio en las que pueda desempeñar su función estructural, y si no se maneja o se cura de manera apropiada, el resultado puede ser un fracaso parcial o total <sup>(11)</sup>.

Con base en experiencias de campo y de laboratorio, se ha probado que los CAC son muy sensibles al agrietamiento temprano, que se puede mitigar tomando precauciones. Como se mencionó anteriormente, un apropiado curado es crucial para el desempeño del concreto y deberá ser considerado como la clave para alcanzar un CAC durable. <sup>(11)</sup>

### 2.3 GENERALIDADES SOBRE LOS ADITIVOS

El ACI 116R <sup>(12)</sup> define el término de aditivo como un material distinto del agua, el agregado, el cemento hidráulico y la fibra de refuerzo que se utilice como ingrediente en la mezcla de cementantes que modifican la mezcla en estado fresco, secado o propiedades de endurecimiento y éste se adhiere durante la barchada o durante el mezclado. <sup>(12)</sup>



Fig. 9 Diferentes tipos de aditivos para los concretos.

Para conocer las funciones de un aditivo, en el ACI 212-3R <sup>(13)</sup> se determina la razón de usar aditivos y se describen las siguientes funciones que desempeñan:

- Incrementan la trabajabilidad sin aumentar el contenido de agua o disminuye el contenido de agua con la misma trabajabilidad.

- Retardar o acelerar el tiempo inicial de secado.
- Reducen o previenen la contracción.
- Modifican la velocidad de sangrado
- Reducen la segregación.
- Aceleran el desarrollo de la resistencia a edades tempranas

Entre otras características, se encuentra la de mejorar la trabajabilidad en el mezclado, sin tener que adicionar más agua y otros aditivos importantes en la disminución de los agrietamientos debidos a la autodesecación. Esto corresponde a aditivos reductores de la contracción. (ARC) <sup>(13)</sup>

### **2.3.1 ADITIVOS REDUCTORES DE AGUA DE ALTO RANGO (SUPERFLUIDIFICANTES)**

Los aditivos reductores de agua de alto rango pueden utilizarse para reducir sustancialmente el contenido de agua de los morteros y los concretos, manteniendo al mismo tiempo una consistencia determinada, sin producir efectos indeseables sobre el tiempo de fraguado. También se pueden usar para incrementar en gran medida el revenimiento, sin necesidad de aumentar el contenido de agua de la mezcla original. Algunos de estos tipos de aditivos se pueden agregar varias veces, para darle al concreto las características deseadas y poder recuperar el revenimiento que se ha perdido. Estos aditivos se pueden comportar de manera diferente dependiendo del tipo de cemento y con ciertas combinaciones pueden ocurrir efectos indeseables que varían desde un efecto retardante excesivo hasta un endurecimiento prematuro, dependiendo de la dosis, del tipo químico del aditivo y de la composición misma del cemento <sup>(14)</sup>.

### **2.3.2 ADITIVO REDUCTOR DE LA CONTRACCIÓN**

Este aditivo funciona reduciendo la tensión capilar del agua de los poros, que es lo que causa la contracción y tiene la característica de reducir significativamente la contracción por secado (hasta 80% en 28 días y 50% después del año, en una concentración del 2% por peso de cemento),



reduce las tensiones inducidas por secado de la superficie en una dimensión en losas y en pisos de concretos; reduce la deformación por compresión y reduce la carbonatación. Como beneficio, reduce el agrietamiento y micro agrietamiento en la contracción por secado, mejorando la estética, la impermeabilidad al agua y la durabilidad. También reduce la deformación en la contracción por secado y minimiza el pandeo. <sup>(15)</sup>

## **2.4 DURABILIDAD DEL CONCRETO.**

En la actualidad existen factores que deterioran los materiales en general; como ejemplo se tiene la contaminación ambiental a la que, debido a su potencial daño, se le considera de relevante importancia en el diseño de mezclas de concreto en los procesos constructivos en que se busca aumentar la durabilidad de las edificaciones.

El Comité ACI 201, en 1991, definió la durabilidad como: la capacidad de un concreto de cemento hidráulico para resistir la acción de la erosión, el ataque químico, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Los concretos en servicio y bajo los efectos de un ambiente determinado se considerarán durables si son estables en la forma, la calidad y el servicio. Una manera de incrementar la durabilidad del concreto reforzado se presenta utilizando adecuados contenidos de aire, buenos procedimientos de compactación, altos niveles de uniformidad, relaciones (a/c) bajas y buenos procedimientos en los períodos de curado. <sup>(9)</sup>

Existen diferentes agentes dañinos que atacan al concreto tales como: sulfatos, cloruros y carbonatos, los cuales deterioran la pasta del concreto y que se consideran como los principales activadores de la corrosión en el acero de refuerzo. Esto aunado a la humedad presente en diferentes ambientes.

Por lo antes dicho, se deben considerar algunos aspectos de durabilidad, para su prolongar la vida útil de las estructuras. <sup>(9)</sup>

Desde que Aspdin patentara el cemento pórtland en 1824, hasta la actualidad, la evolución de los tipos de cemento, los métodos de fabricación y sus aplicaciones han ido creciendo. De este modo a medida que se estudiaba una nueva aplicación del cemento, además de las consideraciones mecánicas, había que tener en cuenta su durabilidad potencial en función del entorno, es decir la capacidad de dicho material a mantener sus propiedades a lo largo del tiempo sin que afecte su seguridad, funcionalidad y estabilidad para el cual se había diseñado. <sup>(9)</sup>

Este interés creciente está conduciendo al desarrollo de modelos de vida útil aplicados al concreto con el fin de poder evaluar desde la etapa de diseño la vida esperada en función tanto de la calidad del concreto como del entorno en el que estará situada la estructura. <sup>(9)</sup>

En el caso de la durabilidad del concreto en masa hay que recordar que se puede experimentar alteraciones como consecuencia de la acción de agentes agresivos internos o externos los cuales se caracterizan por producir efectos nocivos que se manifiestan en forma de erosiones, fisura, expansiones, etc. <sup>(9)</sup>

En el concreto reforzado, la durabilidad dependerá tanto de las características del concreto y del acero como de la interrelación entre ambos. <sup>(9)</sup>

Así mismo, la estructura porosa resultante y la fase acuosa contenida en los poros del concreto influirán de forma decisiva sobre la accesibilidad de agentes agresivos externos hasta el refuerzo, ya que el contenido de fase líquida en los poros influye en la velocidad de la difusión de los iones que a la vez dicha fase acuosa actúa como medio electrolítico en los procesos de corrosión del acero. <sup>(17)</sup>

### **2.4.1 FACTORES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD**

Dentro de los factores que pueden dañar al concreto reforzado pueden ser físicos, químicos, o biológicos, entre los físicos se encuentran la erosión, abrasión, impacto, hielo – deshielo y las cargas; entre los químicos las aguas puras, marinas, acidas y sulfaticas; entre las biológicos los microorganismos, algas moluscos. Estos a su vez pueden coexistir y actuar de forma simultanea teniendo entonces que considerar efectos simultáneos.

Dependiendo de la microestructura del concreto se pueden estimar las propiedades tales como; porosidad y permeabilidad, ya que estas conllevan al mecanismo de transportes agresivos los cuales deterioran al concreto y corroen el refuerzo, para que se lleven a cabo estos fenómenos de difusión que son los que afectan al concreto y al refuerzo se tiene que saber a que tipo de ambiente externo se encuentra la estructura, diferentes parámetros se deben considerar temperatura, humedad relativa, concentración de agentes agresivos y presión.

Con esto se podrá estimar cual será el periodo de vida útil debido a los efectos resultantes después de la exposición a los agentes dañinos tales como funcionalidad, seguridad y aspecto de las condiciones superficiales de la estructura de concreto.<sup>(17)</sup>

### **2.4.2 EFECTO DE LA CARBONATACIÓN EN EL CONCRETO**

Para determinar el avance de la carbonatación, los especímenes de concreto pueden estar expuestos a ambientes naturales pero este proceso es demasiado lento, debido a esta situación se realizan pruebas acelerando el proceso, usando atmósferas de relativamente alta concentración de CO<sub>2</sub>, sin embargo no existe una validación general sobre como extrapolar las condiciones de la prueba a un real desempeño, para realizar esta validación se requiere correlacionar la profundidad de carbonatación de las pruebas realizadas en ambiente natural con la profundidad en condiciones aceleradas.<sup>(17)</sup>

La validación de la problemática de la carbonatación, se basa en que el proceso de carbonatación depende del número de parámetros tales como la composición química del cemento, las proporciones de la mezcla, el tiempo de exposición y particularmente del contenido de óxido de calcio (CaO) y la concentración de CO<sub>2</sub> presentes en el ambiente. <sup>(17)</sup>



# **CAPÍTULO 3**

# **ANTECEDENTES**

Dentro de los principales problemas del concreto de alto comportamiento (CAC) reside en las contracciones, la contracción del concreto se debe al movimiento o pérdida de agua. Esta pérdida de agua por evaporación (contracción por secado) o reacciones internas (contracción química y autógena) genera esfuerzos de tensión que ocasionan un bloqueo de la red de poros capilares, que se traduce en un cambio de volumen. Estos cambios son expansiones y contracciones, cuando los elementos del concreto están restringidos, la expansión origina esfuerzos de compresión y la contracción origina esfuerzos de tensión. El concreto es débil ante estos últimos y produce agrietamientos cuando el esfuerzo sobrepasa su resistencia a la tensión. <sup>(18)</sup>

En particular, estas variaciones volumétricas representan menos del 10% de la variación volumétrica asociada con la retracción por secado <sup>(18)</sup> Con relaciones (a/c) bajas utilizadas para producir concretos de alta resistencia ó CAC se ha encontrado que en ausencia de agua de curado pudiera desarrollarse contracción autógena igual o mayor que la contracción por secado de los concretos convencionales y si no se controla, el concreto puede tener serios problemas de agrietamiento. <sup>(18)</sup>

La parte del concreto que es más susceptible al agrietamiento es la pasta del cemento; ciertos agregados porosos pueden sufrir contracciones; sin embargo, esta magnitud es pequeña en comparación con la que sufre la pasta y no es relevante para el concreto convencional. La pasta de cemento sufre contracción a medida que se va secando debido a la tensión superficial del agua en poros parcialmente llenos produciendo tensiones hacia adentro de las paredes de los espacios porosos. <sup>(19)</sup>

El concreto responde a estas fuerzas internas contrayéndose. La fuerza de todos los poros es la causa principal de la contracción. Así, la contracción que experimenta la pasta de cemento es función principal de su relación (a/c) y del tiempo de endurecimiento, pero puede también estar afectada por el tipo de cemento, su finura y algún otro elemento que altere la distribución de tamaño de los poros.<sup>(19)</sup>

### **3.1 MECANISMOS DE CONTRACCIÓN**

Los cambios de volumen en el concreto constituyen un fenómeno inevitable, como consecuencia de la pérdida de humedad en los materiales que constituyen al concreto al estar en su entorno de servicio o debido a la autodesecación de la pasta. El concreto no sólo experimenta contracciones de tipo químico, autógeno, plástico, térmico o por carbonatación; sino que, además, está susceptible a que se desarrollen expansiones por exceso de humedad, misma que al secarse paulatinamente inducirá contracciones. En los siguientes puntos se da una breve descripción sobre algunos mecanismos de contracción que pueden presentarse en el concreto, como consecuencia de los cambios volumétricos.<sup>(20)</sup>

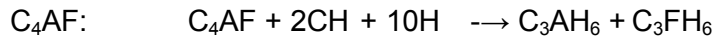
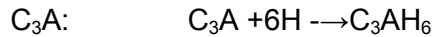
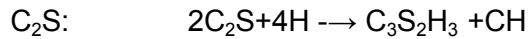
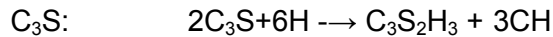
### **3.2 CONTRACCIÓN QUÍMICA**

El término contracción química se utiliza para describir el fenómeno en el que el volumen de los productos hidratados por la reacción química entre el cemento y el agua es menor, que el volumen total del cemento y agua sin hidratar.<sup>(20)</sup>

La hidratación del cemento resulta en una contracción volumétrica absoluta como lo concluyó Le chatelier, en 1904, y que de acuerdo con las condiciones de curado, esta contracción volumétrica absoluta resulta en un incremento o disminución del volumen aparente.<sup>(21)</sup>

Este tipo de contracción se relaciona con la química del cemento (principalmente con los compuestos potenciales) y con el desarrollo de la presión capilar interna dentro de la pasta de cemento.<sup>(21)</sup>

Los compuestos potenciales del cemento y su reacción al entrar en contacto con el agua son los siguientes:



La contracción química de la pasta de cemento no se ve afectada por la relación (a/c).<sup>(21)</sup>

La relación (a/c) y la fineza del cemento pueden afectar sólo la velocidad de la contracción química. Cuando el grado de hidratación del cemento es casi el 100%, tanto el valor de la contracción como el propio grado de hidratación se verán involucrados por la composición química del cemento. También se encontró que una contracción química más baja puede asociarse con valores bajos de  $C_3S$ ,  $C_3A$  y álcalis presentes en el cemento.<sup>(22)</sup>

### 3.3 CONTRACCIÓN AUTÓGENA

Cualquier concreto que no se cura durante las primeras edades de endurecimiento, independientemente de su relación (a/c), desarrollará contracción autógena. La contracción autógena es consecuencia de la contracción química que se presenta durante la hidratación del cemento<sup>(23)</sup>. Dicha contracción es referida como la reducción macroscópica del volumen que es un cambio dimensional visible de la pasta de cemento, mortero o concreto, causada por la hidratación del cemento. Esta contracción se etiqueta como la deformación autógena, contracción por autodesecación o cambio de volumen autógeno.<sup>(23)</sup> y no ocurre en presencia del agua de curado; pero cuando el agua no se encuentra disponible, el cemento consume agua de los poros, causando auto-desección de la pasta y una reducción uniforme del volumen.<sup>(23)</sup>



Con relaciones (a/c) bajas utilizadas para producir concretos de alta resistencia o CAC, se ha encontrado que en ausencia de agua de curado puede desarrollarse contracción autógena igual o mayor que la contracción por secado de los concretos convencionales y si esto no se controla, el concreto puede tener serios problemas de agrietamiento. <sup>(24)</sup>

El concreto responde a estas fuerzas internas contrayéndose. La fuerza de todos los poros es la causa principal de la contracción. Así, la contracción que experimenta la pasta de cemento esta en función principal de la relación (a/c) y del tiempo de endurecimiento, pero puede también ser afectada por el tipo de cemento, su finura y algún otro elemento que altere la distribución de tamaño de los poros. <sup>(24)</sup>

### **3.4 CONTRACCIÓN POR SECADO.**

El concreto después de haber fraguado ya en estado endurecido sigue expuesto a perder más agua por efecto de la evaporación y por consumo debido a la hidratación del material cementante. Esta reducción de agua que progresa paulatinamente con el tiempo, es motivo para que el concreto pueda contraerse gradualmente a medida que endurece. A esta contracción se le conoce como contracción por secado. La contracción por secado es una deformación lineal dependiente del tiempo, a temperatura constante, que se mide sobre una probeta no cargada que se deja secar.

La situación más común resultante de la desecación en edades tempranas es la aparición de grietas superficiales.<sup>(25)</sup> Cuando se trata del secado del concreto, los poros más grandes son los primeros en perder el agua interna, esto fue demostrado por Koenders en 1997.<sup>(25)</sup>

Además, el secado ocurre de manera no uniforme, desde la superficie hacia el núcleo del concreto y el agrietamiento creará tanto esfuerzos de tensión internos y próximos a la superficie, como esfuerzos de compresión en el núcleo. La contracción diferencial puede provocar alabeos y grietas superficiales <sup>(24)</sup>. Esta contracción puede transcurrir durante años, antes de llegar a la retracción última, porque la pérdida de humedad del concreto endurecido se controla por difusión. Con el flujo del agua de sangrado hacia la superficie del concreto, la interacción entre los poros y el agua interna, se ve influenciada por el movimiento de humedad. Durante el secado del concreto fresco, la tasa de evaporación puede exceder la cantidad de agua de sangrado. La pérdida del agua interna causa entonces la contracción por secado. <sup>(25)</sup>

### 3.5 EFECTO DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO EN UN SISTEMA CERRADO

Powers, Jensen y Hansen, <sup>(26)</sup> representaron esquemáticamente los resultados de sus trabajos sobre el desarrollo de la hidratación. Estos esquemas muestran claramente que la hidratación completa no puede alcanzarse en un sistema cerrado, que es un sistema donde no hay intercambio de humedad con el exterior a menos que la relación agua cemento sea igual o menor que 0.42 la cual será un sistema que contiene más agua de la necesaria para hidratar por completo al cemento. (fig.10 y 11)

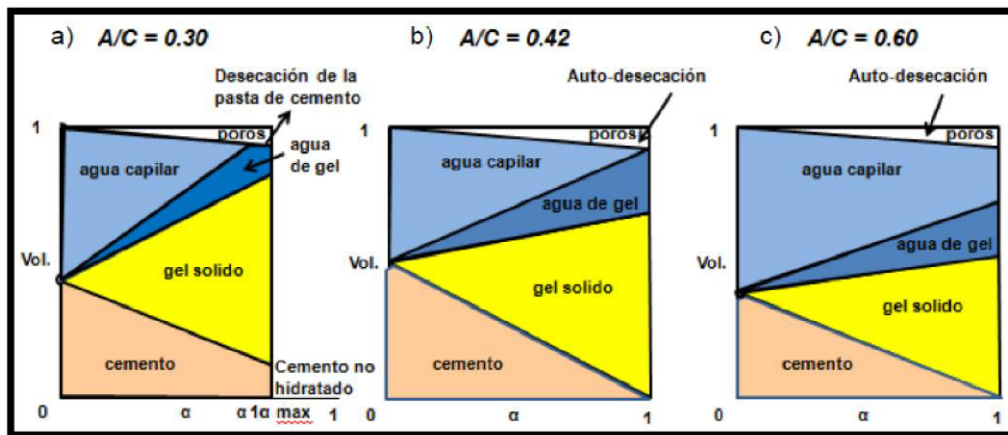


Fig. 10 Hidratación del cemento a diferentes relaciones (a/c) <sup>(26)</sup>

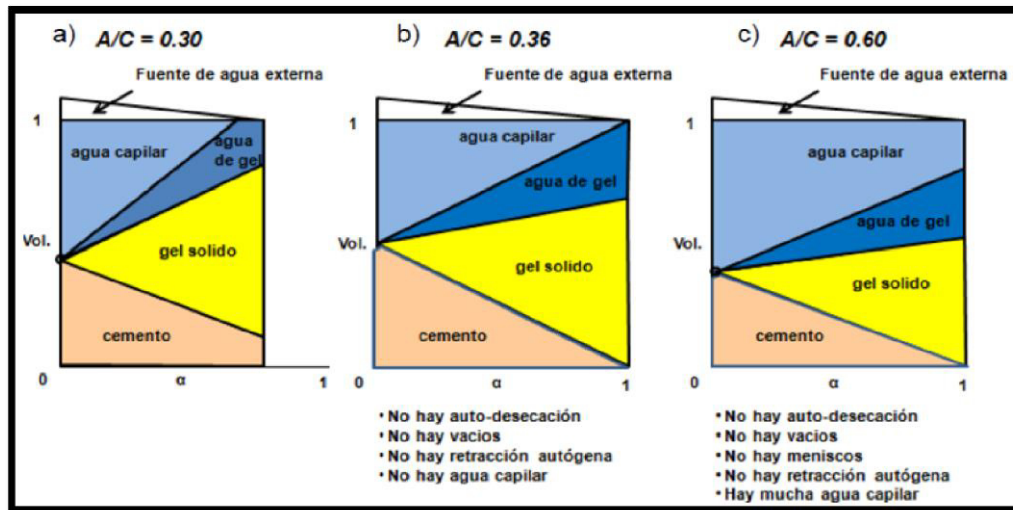


Fig.11 Cementos con agua externa disponible <sup>(26)</sup>

Además se demostró que cuando una fuente de agua externa se encuentra disponible durante la hidratación del cemento pórtland es posible tener una pasta de cemento sin poros cuando la relación ( $a/c$ ) es menor o igual que 0.36 según Hansen y Jensen <sup>(26)</sup>.

Durante la reacción de hidratación, el agua fluye por la red de capilares finos, dentro de los cuales, los meniscos que se forman generan grandes esfuerzos de tensión en un medio en el que la resistencia a estos esfuerzos es prácticamente nula. Estos esfuerzos son los responsables de la contracción volumétrica aparente y cuando se detiene la reacción de hidratación, la contracción autógena comienza, debido a la falta de disponibilidad de agua en este sistema cerrado, ya que el agua en el exterior no alcanza el interior del concreto. El efecto desfavorable de la escasez de agua, combinado con el calor de hidratación y la autodesecación, afectan las propiedades mecánicas y la durabilidad; disminuyendo la resistencia a la compresión, aumentando la porosidad; resultando, en consecuencia, en un concreto más susceptible al agrietamiento. Esto es característico en concretos con relaciones ( $a/c$ ) bajas, menores que 0.42, el agua de curado o neblina en los primeros días no es perceptible para mejorar las propiedades en CAC, por ello la importancia de un curado satisfactorio. <sup>(26)</sup>

### **3.6 INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE INCREMENTO DE LA DURABILIDAD EN CAC.**

Dentro de las nuevas técnicas para incrementar la durabilidad de las estructuras de concreto se encuentran los diferentes métodos, tales como: el curado interno, el acero de refuerzo galvanizado, el uso de fibras sintéticas y naturales en el concreto, el uso de aditivos superplastificantes y reductores de contracción minimizando el consumo de agua, cementantes alternativos y membranas de curado; esto para lograr un concreto lo más denso e impermeable posible y prolongar la vida útil del refuerzo. En este trabajo se utilizó la técnica del curado interno en CAC, mediante el uso de AL presaturados en agua, ASF, ARC y para el curado interno mejorado se utilizó el AL presaturado con una solución acuosa compuesta por una mezcla de agua más ARC; lo que actualmente se le conoce como la tecnología **VERDiCT** (viscosity enhancers reducing diffusion in concrete technology).<sup>(1)</sup>

Esta tecnología tiene como objetivo suministrar el agua de reacción faltante, para procurar una hidratación completa y minimizar los efectos de la autodesecación y la consecuente contracción autógena.

### 3.7 TECNOLOGÍA VERDiCT (CURADO INTERNO MEJORADO)

El uso de aditivos para mejorar el desempeño tiene varias ventajas, como; el aumento en la durabilidad, la inhibición de agentes que promueven la corrosión del acero de refuerzo, reducción de la contracción. Estos en algunos casos perjudican las propiedades en estado fresco.<sup>(27)</sup> Dale P. Bentz propuso el uso del agregado ligero, no sólo como una fuente de agua interna, sino también como medio para administrar mezclas de aditivos dentro del concreto sin que resulten afectadas las propiedades en estado fresco, como es el caso de los ARC.<sup>(27)</sup>

La tecnología VERDiCT consiste en el uso de soluciones con mayor viscosidad a la del agua, introducidas como medio de curado interno, para incrementar la durabilidad del concreto.

Esta tecnología se ha implementado en diferentes condiciones, en las cuales se usó la solución sobre la superficie de la muestra. En esta misma solución de ARC fue presaturado el agregado ligero AL, mostrando menor concentración de cloruros en comparación con la que solo utilizó agregado ligero AL. Se hizo una comparación con morteros de referencia, los cuales mostraron mayor contenido de iones cloruros presentes en la muestra, debido a la autodesecación de la pasta. En los morteros con relaciones (a/c) bajas se observó que el ingreso de algunos agentes agresivos, tales como los iones cloruro podían ser medidos mediante la técnica del Nitrato de Plata ( $\text{AgNO}_3$ ) a 28 y 56 días (fig.12).<sup>(27)</sup>

La fórmula de Stoke – Einstein<sup>(1)</sup>

$$D_0 = \frac{k_B T}{6\eta y_0 r} \quad (1)$$

Donde  $D_0$  es el coeficiente de difusión propio de un ion,  $k_B$  es la constante de Boltzman ,  $T$  es la temperatura,  $r$  es el radio de la partícula que se difunde y  $\eta$  es la viscosidad de la partícula que se difunde.

Por consiguiente se propone en este trabajo una sinergia entre la técnica del curado interno y la Tecnología VERDiCT usando aditivos reductores de la contracción para su uso en concretos.<sup>(1)</sup>

Esta relación sugiere que la difusión puede disminuir mediante el incremento en la viscosidad de la solución. Las mismas moléculas son las que interactúan con el agua para incrementar la viscosidad de la solución y ésta puede servir como barrera física para reducir la velocidad de difusión de los iones. <sup>(1)</sup> En la figura 12 se observa la penetración de los iones cloruro, la zona perimetral de color claro indica la penetración de cloruros, aspecto directamente relacionado con la difusión de estos iones. La muestra (a) contiene la tecnología VERDiCT y fue la que registró menor penetración.

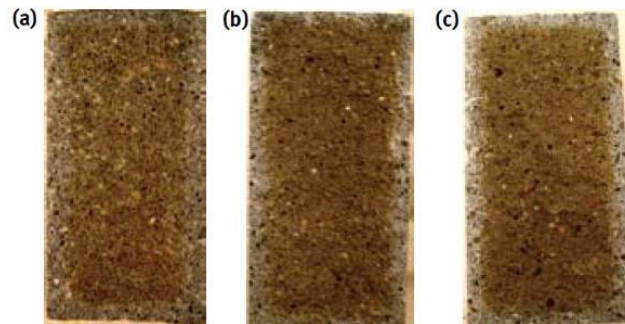


Fig. 12 Morteros que utilizan la tecnología VERDiCT

El aditivo se utiliza para disminuir la tasa de difusión de los iones que pueden ingresar al concreto tales como cloruros y sulfatos. No obstante, un aumento en la viscosidad de la solución del poro también reducirá el ingreso de otros agentes como el  $\text{CO}_2$  del medio ambiente. Mientras que un aumento de la viscosidad no cambia el coeficiente de permeabilidad de la microestructura del concreto, la tasa de flujo de un fluido dentro del concreto debido a un gradiente de presión, y éste será inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. <sup>(1)</sup>

### 3.8 CURADO INTERNO DEL CONCRETO

La mayoría de los concretos de alta resistencia y alto desempeño tienen bajas relaciones (a/c), contienen insuficiente agua de mezcla para mantener los poros capilares de llenos de agua necesaria para la hidratación del cemento y las reacciones puzolánicas. Por esta razón es preferible agua de curado interno sobre el sellado externo ya que este último es incapaz de evitar la autodesecación. <sup>(28)</sup>

El curado interno es diferente al curado externo. Este término implica la introducir en la mezcla de concreto un componente que sirva como agente promotor administrador de curado. Este agente puede ser un ingrediente introducido dentro de los componentes de la mezcla como lo muestra la figura 13. <sup>(28)</sup>

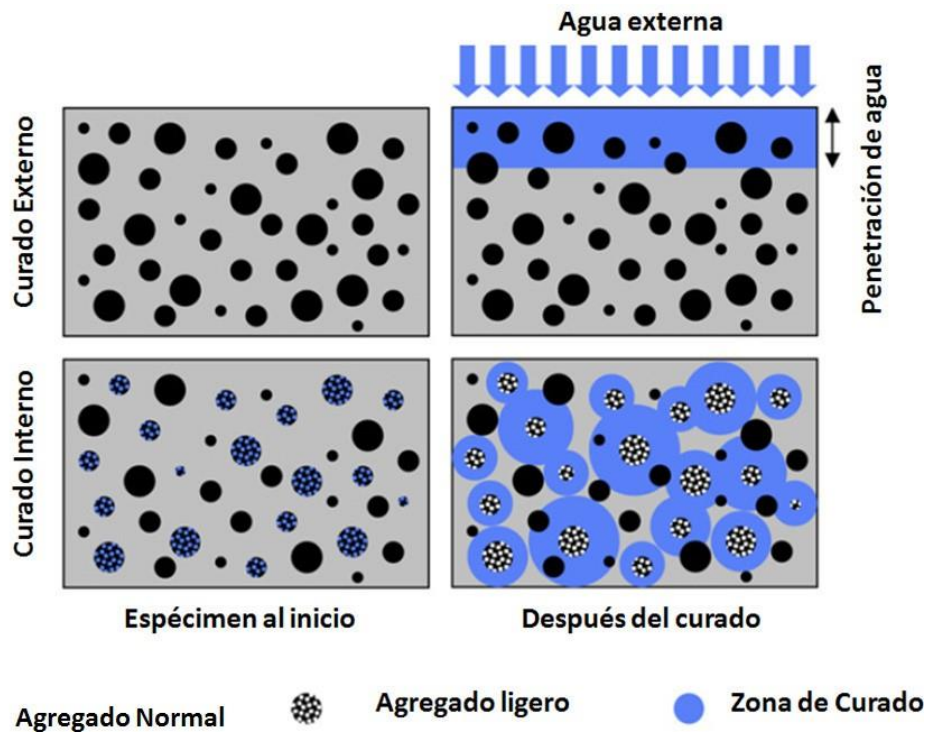


Fig.13 Mecanismo de la desorción de los agregados ligeros

Tanto el curado interno como el curado externo se pueden clasificar en dos categorías:

- Agua de curado interno, llamada “agua de interna” se adhiere al concreto cuando el agregado o polímero promotor de curado realiza un depósito de agua y libera gradualmente el agua.
- Sellado interno: cuando el agente de curado interno está destinado a retardar o evitar la pérdida de agua en el concreto endurecido. Ejemplo el uso de las PSA. <sup>(29)</sup>

Es importante determinar el movimiento del agua dentro de la pasta cementante, por lo cual se ha estudiado la absorción y la desorción del agregado ligero pumicitico de manera similar al procedimiento descrito en ASTM C 1498. Donde se logro examinar si los poros del agregado ligero lograron desorber el agua durante la hidratación para demostrar dicho fenómeno se caracterizaron los especímenes de mortero mediante micrografías, originalmente se propuso congelar el agua de la muestra pero debido a que la capilaridad del agua esta en función de su estado físico, se tomó la decisión de suministrar el agregado ligero saturado para mantener atrapada el agua dentro de los poros capilares del cemento en la hidratación de la pasta durante los primeros 3 días de hidratación, como se muestra en las figuras 14 y 15. <sup>(30)</sup>

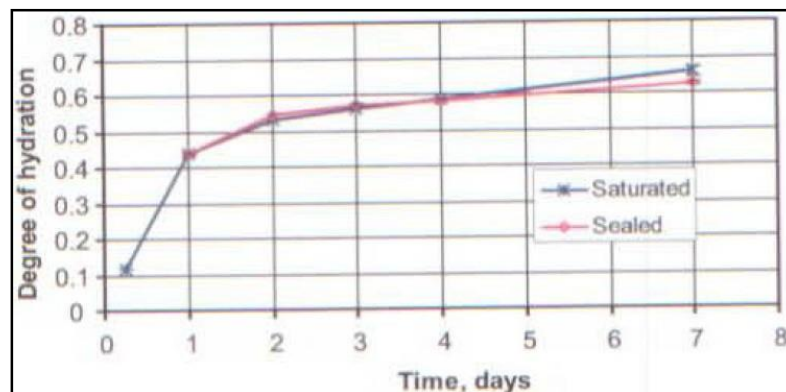


Fig. 14 Grado de hidratación en las pastas cementantes, curadas con agregado saturado, en correlación con morteros curados por el método de sellado. <sup>(30)</sup>



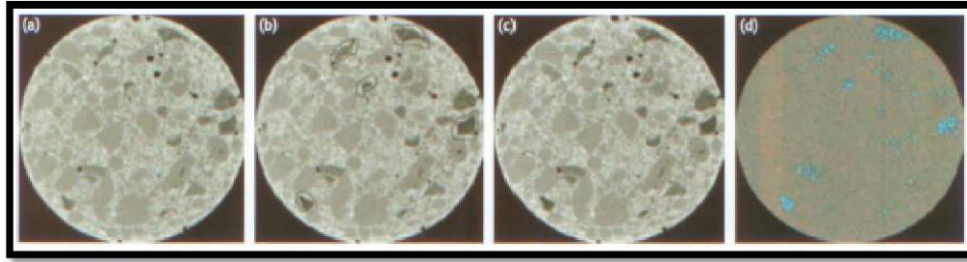


Fig. 15 En los puntos oscuros se observa la desorción del AL en la pasta de cemento en el mortero.

En la figura 15, se pueden observar las muestras de mortero curadas internamente con agregado ligero saturado; donde se observa el cambio gradual de color claro a más oscuro en las áreas de mayor desorción. <sup>(30)</sup>

La contracción autógena no siempre es causada por influencias externas, siempre y cuando en la medición se pierda temperatura. Esto ocurre porque el volumen del producto del cemento hidratado es mayor que el volumen del cemento y el agua antes de la hidratación. <sup>(31)</sup>

Durante el endurecimiento, la contracción autógena es acompañada por la autodesecación y el secado interno en el concreto mientras el cemento continúa hidratándose consume agua de los poros. Este proceso ocurre durante varios días o semanas con mayor frecuencia ocurre el primer día y el segundo día después del endurecimiento. <sup>(31)</sup>

Para mitigar esto, el agente de curado interno, en este caso, se utilizó la pumicita, usado como AL. Esta es una parte del curado interno mejorado que se dispersa en toda la mezcla de concreto. Lo cual ayuda a superar el problema de la baja permeabilidad en relaciones  $(a/c)$  bajas. De esta forma el suministro de agua interna puede ser un método efectivo para reducir la contracción autógena, ya que reduce directamente la autodesecación. <sup>(31)</sup>

El concepto de la autodesecación puede contrarrestarse mediante el uso de AL presaturados; esto se conoció durante la década de los 90's por diferentes investigadores. <sup>(31)</sup>

Algunos investigadores han demostrado que la resistencia del CAC sin contracción autógena se puede obtener utilizando este método de curado, el uso de pumicita para el curado interno, recientemente se ha evaluado y se ha demostrado que la pumicita retiene el agua en los poros para después desorberla durante el proceso de mezclado. <sup>(31)</sup>

Dentro de las nuevas técnicas para el curado del concreto están los nuevos métodos para las relaciones (a/c) bajas. Un importante aspecto del curado está dado para ver si promueve o no la hidratación, para minimizar la contracción y el agrietamiento a edades tempranas. Usualmente al cemento se le incluyen aditivos minerales, aditivos químicos, fibras y precursores de curado interno mejorado. <sup>(29)</sup>

### 3.9 CURADO INTERNO CON POLÍMEROS SÚPERABSORBENTES (PSA)

Los polímeros súperabsorbentes son materiales poliméricos capaces de absorber y retener una cantidad significativa de solución acuosa dentro de su estructura sin disolverse, las partículas superabsorbentes principalmente son usadas para absorber agua y soluciones que la contengan, en la figura 16 se observan las PSA saturadas. <sup>(32)</sup>

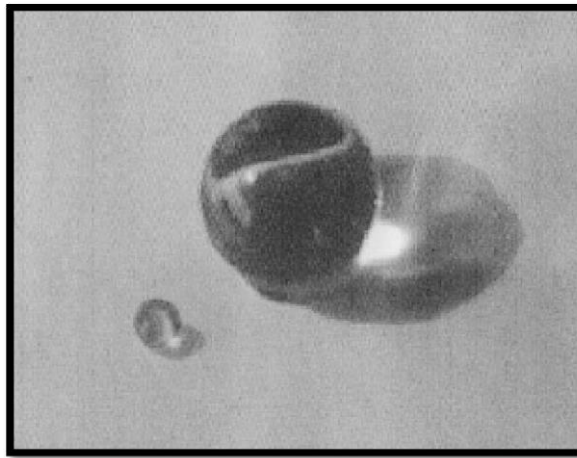


Fig. 16 Partículas de polímero súperabsorbente saturadas

Debido a su gran capacidad de absorción, los polímeros se han adherido como promotores administradores de agua para curado interno en el concreto. Con la adición de PSA se ha logrado mantener una humedad relativa óptima en pastas de cemento, ya que ésta minimiza los tipos de contracciones.

El problema del uso de los polímeros son los cambios en los tiempos de fraguado, debido a que aumentan los tiempos y este factor se debe considerar de acuerdo con el elemento de concreto que se va fabricar. Otro punto a considerar debe ser la reología y la buena separación de las partículas de PSA durante el mezclado; debido a la interacción con los agregados, ya que los PSA se pueden romper y no hacer una buena función como administradores del agua de CI obteniendo un mal desempeño de este tipo de agregados poliméricos. <sup>(32)</sup>

En las figuras 17 y 18 se muestra la deformación por el efecto de la adición de las PSA y el efecto de la humedad relativa con el uso de las PSA. (fig.17 y fig. 18).<sup>(32)</sup>

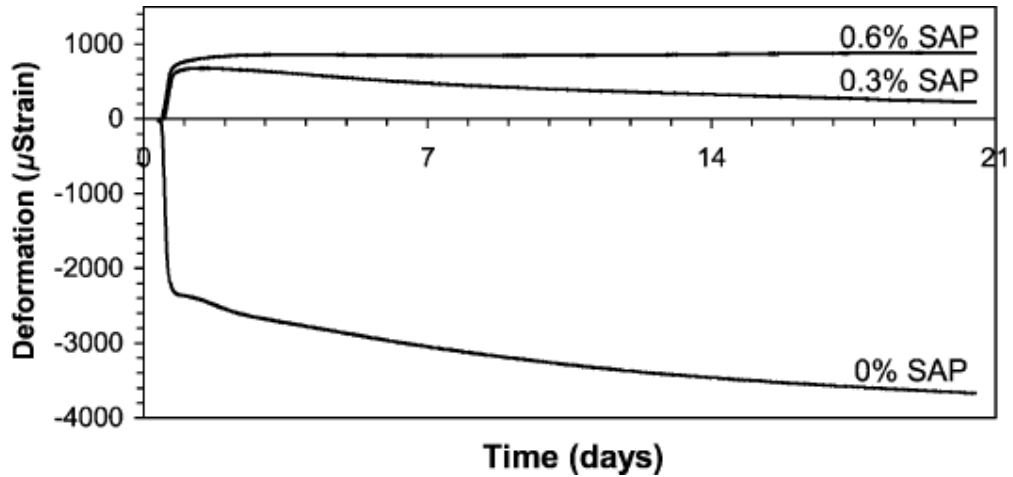


Fig. 17 Efecto de la adición de PSA sobre la deformación de las pastas de cemento (% por peso de cemento).<sup>(32)</sup>

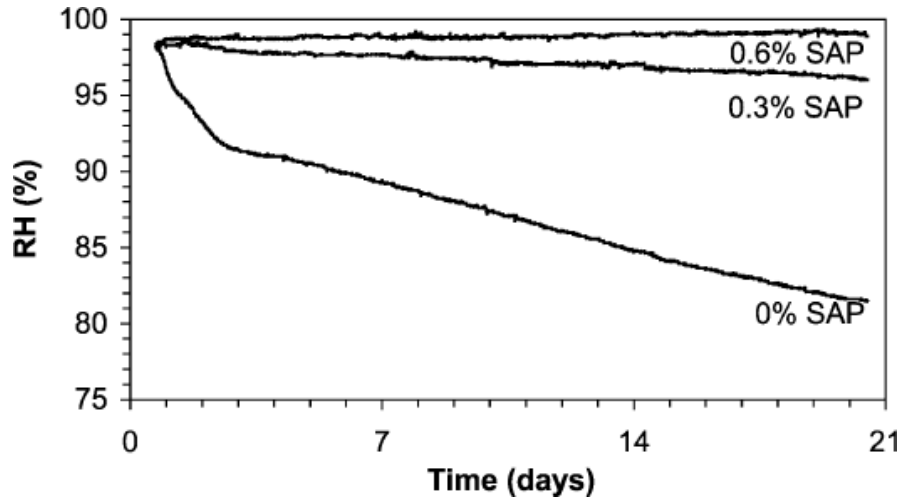


Fig. 18 Efecto de la adición de PSA en la humedad relativa de las pastas de cemento (% por peso de cemento).<sup>(32)</sup>

En las figuras 17 y 18 muestran los beneficios del uso de las PSA en sustituciones del 0.3% y 0.6%, de las cuales se observa un aumento en la HR y una disminución en la deformación, con lo que se puede concluir que

las PSA pueden ser un promotor de agua de CI para su uso potencial en los concretos con CI mejorado utilizado en la tecnología VERDiCT.

### 3.10 CURADO INTERNO CON AGREGADO LIGERO (AL)

La porosidad de la pumicita facilita el proceso de curado interno, debido a su alta porosidad y estructura gruesa porosa y permite la absorción de fluidos cuando se sumerge bajo soluciones acuosas, además este agregado puede desorber la solución dentro del concreto, provocando una alta humedad relativa. Como se observó en los PSA, en el AL el agua puede alojarse fácilmente en los poros capilares del agregado. El tamaño de poro para el almacenamiento de agua de curado interno es aproximadamente de 100 nm.<sup>(33)</sup>

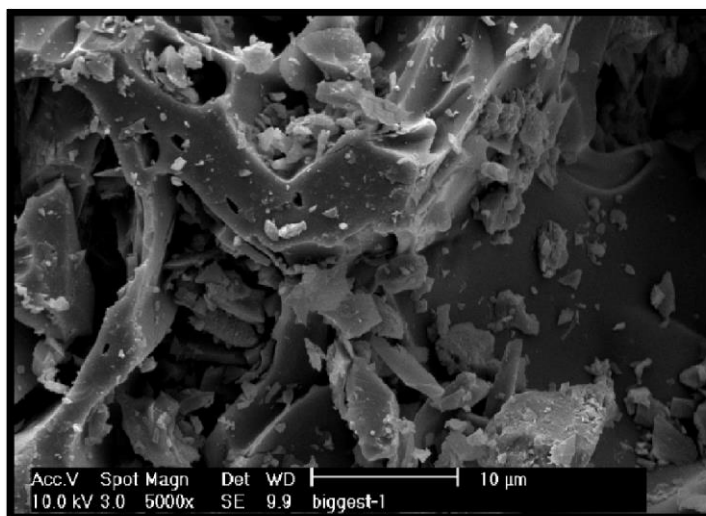


Fig 19. imagen en SEM agregado ligero (pumicita).<sup>(33)</sup>

En los poros más pequeños es donde el agua se mantiene estrechamente ligada y no está disponible para las reacciones de hidratación del cemento, dado que una parte del agua absorbida por el AL en los poros más pequeños no será liberada a la pasta de cemento en el endurecimiento. Una cantidad suministrada de agua será suficiente para contrarrestar la autodesecación y ésta debe ser absorbida por el AL.<sup>(33)</sup> Un tema importante surgido de este estudio es elegir el tipo de AL saturado debido a la estructura porosa para el proceso de curado interno; diferentes fracciones de pumicita muestran diferentes propiedades de porosidad y absorción; como, por ejemplo, el tamaño y la geometría del poro, ya que éstas juegan un papel importante en la capacidad de absorción y desorción del AL.<sup>(33)</sup>

Las fracciones más pequeñas tienen menor absorción, pero de acuerdo con los isotermas de desorción, se libera un mayor porcentaje de agua absorbida en los rangos de humedad relativa. Cabe mencionar que el proceso de CI es largo y complicado ya que depende del grado de saturación del agregado; éste podría obstaculizar su aplicación en el curado del concreto. Por ejemplo si no está completamente saturado el AL, éste puede absorber el agua de mezclado. Para aplicaciones más prácticas, el AL absorbe más rápido el agua cuando se encuentra sumergido bajo el agua para su saturación y su posterior uso en la mezcla y promover el CI mejorado. <sup>(33)</sup>

Ciertas investigaciones se han enfocado en la distancia del agua desde el AL y el volumen de pasta, protegido por efecto del CI, como se muestra en la figura 20. <sup>(33)</sup>

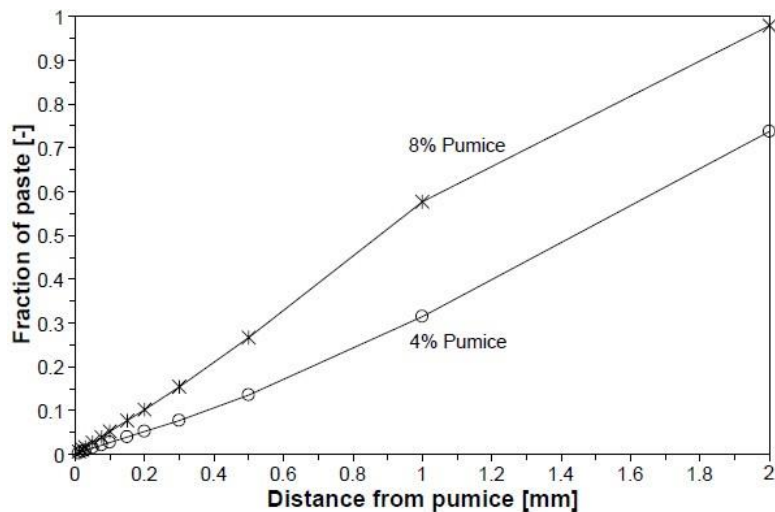


Fig. 20 Fracción de pasta dentro de una cierta distancia del agregado ligero calculado con un modelo para dos sustituciones distintas en los morteros. <sup>(33)</sup>

A continuación, se muestra en la figura 21 el grado de hidratación en las pastas donde se demuestra el beneficio del uso del AL para obtener un mejor desempeño en la hidratación en la pasta de cemento con y sin AL. <sup>(33)</sup>

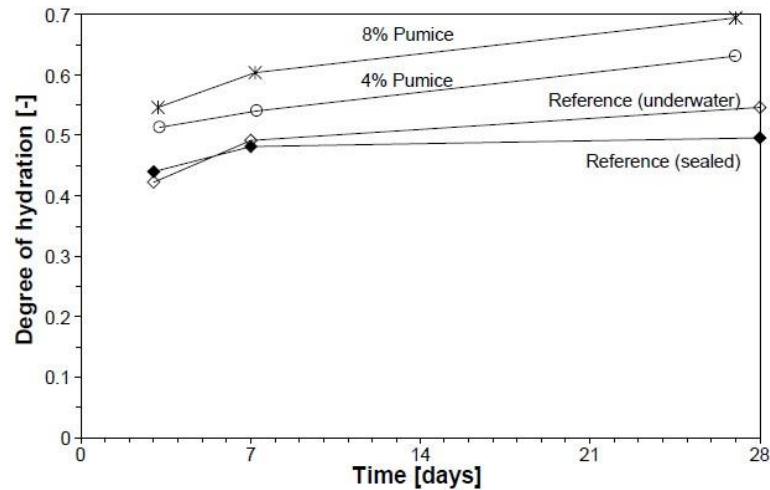


Fig.21 Grado de hidratación en pastas de cemento con y sin agregado ligero. (33)

Estudios recientes han demostrado que para eliminar la contracción autógena utilizando AL, se han tenido que usar grandes cantidades de agregado pumicitico. Esto causa una disminución en la resistencia mecánica a compresión, aunque se han realizado estudios para utilizar la menor cantidad de AL y propiedades de su tamaño para ver el efecto que tendrá en la matriz cementante. (34)

Para observar el comportamiento mecánico del concreto con AL como administrador del agua de CI, se han diseñado concretos con alta elasticidad debido a una menor rigidez por el uso del agregado ligero. La literatura reporta varios métodos de curado interno: uno consiste en reemplazar contenido de cemento por pumicita. Actualmente no se dispone de información del efecto del CI con agregado presaturado en el rendimiento de los compuestos químicos de la pasta cementante. Se ha reportado el estudio con una relación (a/c) de 0.27, donde se agregó AL presaturado para CI. El efecto de este AL presaturado de remplazo mostró una reducción significativa en la contracción autógena durante los primeros 28 días de edad. Se observó que a mayor contenido de cemento, mayor calor de hidratación. Donde se encontraron diferentes porcentajes de porosidad en el agregado, por ejemplo: 23.7% y 29.1%, tal como se muestra en las figuras 22 y 23. (34)



Fig. 22. Concreto con sustitución de cemento por ceniza volante y pumicita en sustitución de arena sílica. <sup>(34)</sup>

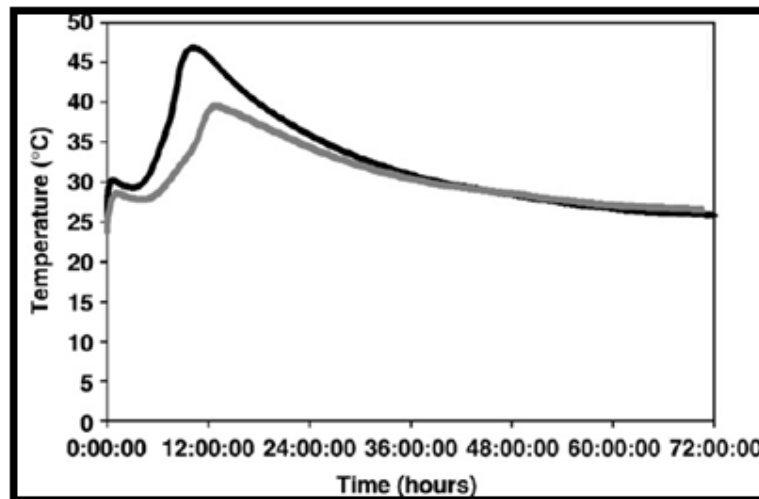


Fig. 23 Comparación de temperatura de hidratación en pastas con sustitución de agregado ligero. <sup>(34)</sup>

La curva más alta es la que se encuentra a mayor temperatura, en correlación en la línea curva inferior, que utilizó una menor cantidad de cemento y pumicita como agregado fino en determinado tiempo.

El efecto de utilizar el agregado ligero presaturado disminuye la contracción autógena, como se muestra en las figuras 24 y 25. Se puede observar la deformación autógena durante los primeros 28 días, en la figura 24. <sup>(34)</sup>



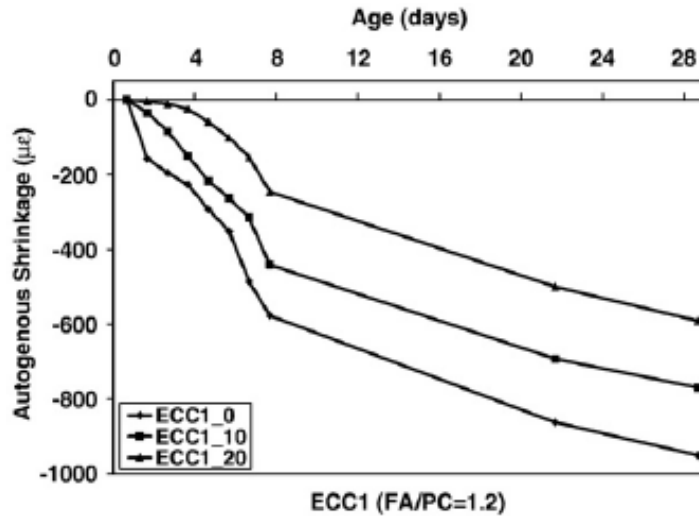


Fig. 24 Comparación entre las diferentes sustituciones de arena sílica por agregado ligero pumicítico. <sup>(34)</sup>

Se puede observar que las que tienen menor contracción son las que contienen mayor contenido de agregado ligero. (fig.24). <sup>(34)</sup>

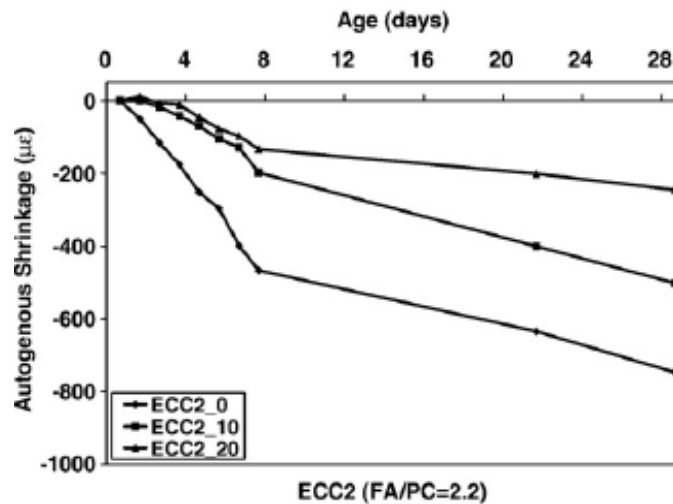


Fig. 25 Comparación de contenido de cementantes, en variación de la contracción autógena. <sup>(34)</sup>

A mayor contenido de ceniza volante, menos deformaciones internas dentro de la pasta cementante, como lo muestra la figura.25.

Para evaluar la durabilidad, se ha estudiado el efecto de AL en pruebas de resistencia a la penetración de iones cloruro, permeabilidad al aire y absorción de agua. Donde se investigaron mezclas con relaciones (a/c) de 0.21 y 0.33, se realizó un estudio con agregado de arena ligera expandida y se demostró que ésta disminuía la penetración a los iones cloruro y la absorción de agua disminuía por el uso de agregado ligero para curado interno. <sup>(35)</sup>

Es muy importante el efecto del CI en las propiedades de durabilidad de un CAC elaborado con diferentes relaciones (a/c), ya que la relación (a/c) es el primer factor que afecta la durabilidad. <sup>(35)</sup> Ciertos resultados del efecto del CI con respecto a la durabilidad de CAC se reportan con relaciones (a/c) de 0.3 y 0.4. En la figura 26 se observa una comparación para la prueba de la permeabilidad al aire. <sup>(36)</sup>

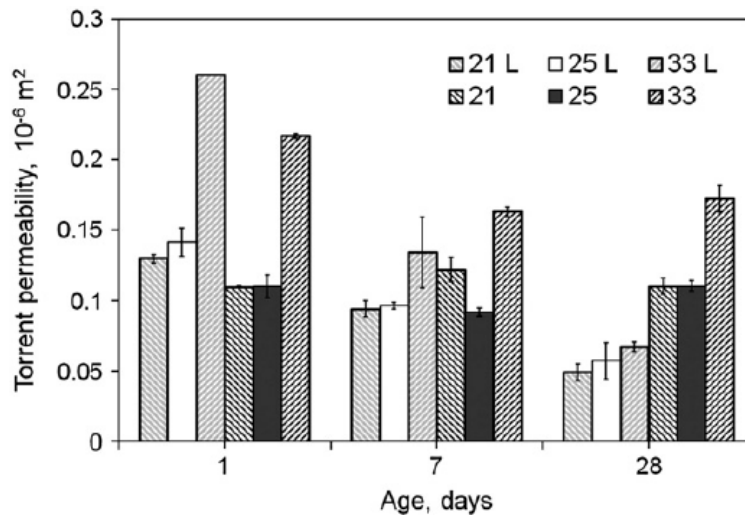


Fig.26 Comparación de permeabilidad al aire entre las mezclas con AL y referencias. <sup>(35)</sup>

Donde las barras que tienden a disminuir con respecto a la edad de los concretos son las que utilizaron las variaciones de AL en la mezcla, observándose una disminución muy marcada en la permeabilidad al agua. <sup>(35)</sup>

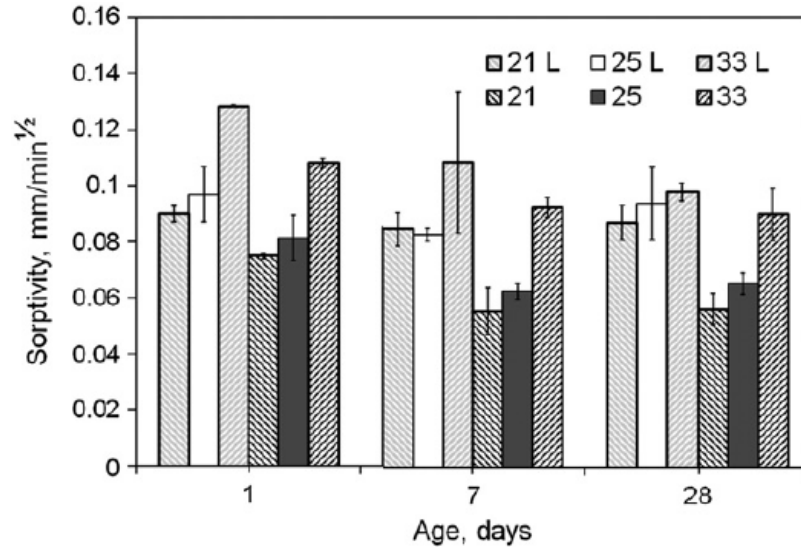


Fig.27 Comparación de absorción de agua entre mezclas con AL y Referencias. <sup>(35)</sup>

En la figura 27 se muestra un incremento de absorción en el primer día de edad. Algunos autores mencionan que se logró aumentar un 20%, conforme fue pasando la edad y disminuyó la absorción en las mezclas con agregado ligero AL, se observa en las primeras 3 barras de cada edad para mejor interpretación de la figura. <sup>(35)</sup>

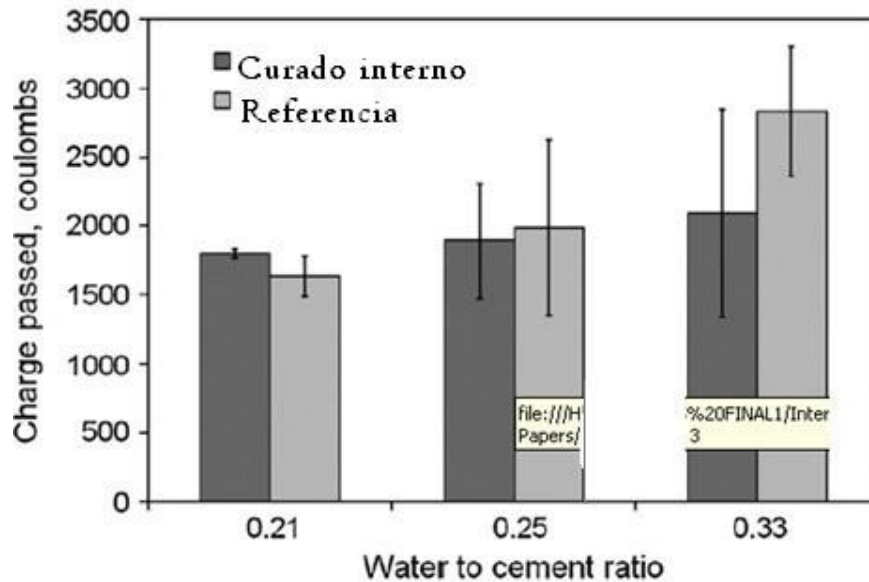


Fig.28 Comparación de la permeabilidad rápida a los iones cloruro. <sup>(35)</sup>

El factor de espaciamiento también ha sido estudiado, debido a que tiene gran influencia en el CI y en la desorción del agua del agregado ligero. Se utilizó AL con la intención de disminuir la contracción autógena, para perder la menor cantidad de humedad relativa posible y se midió el tamaño de AL, donde se concluyó que la contracción autógena está en función de la proximidad de los agregados ligeros con la pasta dentro del concreto. <sup>(37)</sup>

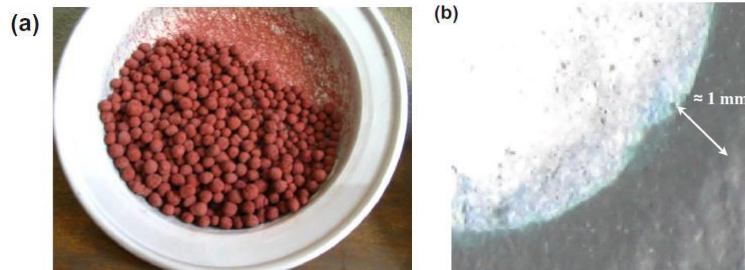


Fig. 29 Arcilla expandida en pigmento, mezclada en el concreto y la relación con la desorción en la pumicita 1 mm a los 1, 3,7 días de edad con una rel. (a/c) 0.28. <sup>(37)</sup>

Para calcular la distribución espacial del AL en la pasta, se recomienda consultar la norma ASTM C 457 “Microscopical Determination of Parameters of the Air – Void System in Hardened Concrete”. <sup>(37)</sup> El tamaño del AL en volumen fue de 2-4 mm y de 4-8 mm en un remplazo de 10%, 20% y 30%. Se llegó a la conclusión de que la contracción autógena estará en función del grado de espaciamiento entre el AL y la pasta, ya que ésta depende del acomodamiento de los agregados ligeros dentro del concreto, como se muestra en la figura 30. <sup>(37)</sup>

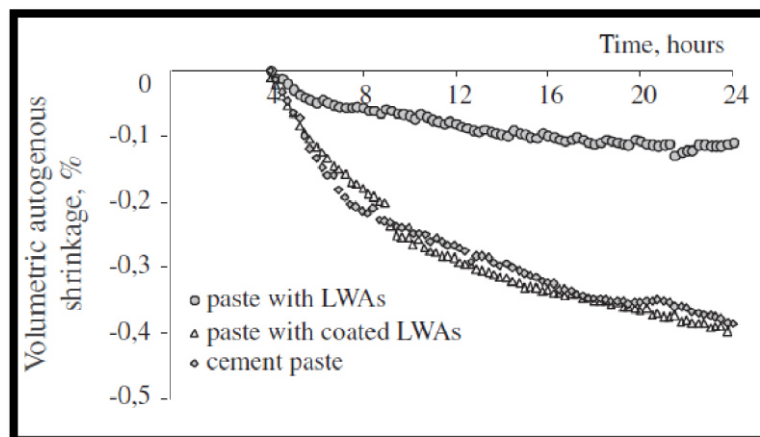


Fig.30 Contracción volumétrica autógena. Se muestra una menor contracción donde se utilizó AL. <sup>(37)</sup>

En los CAC que utiliza CI se han añadido altos consumos de ceniza volante CV donde se ha demostrado que la variación en el contenido de CV tendrá efectos en las propiedades del módulo elástico, la contracción autógena y la humedad relativa. En la figuras 31 y 32 se describen los resultados que se obtuvieron con las variaciones de CV. <sup>(38)</sup>

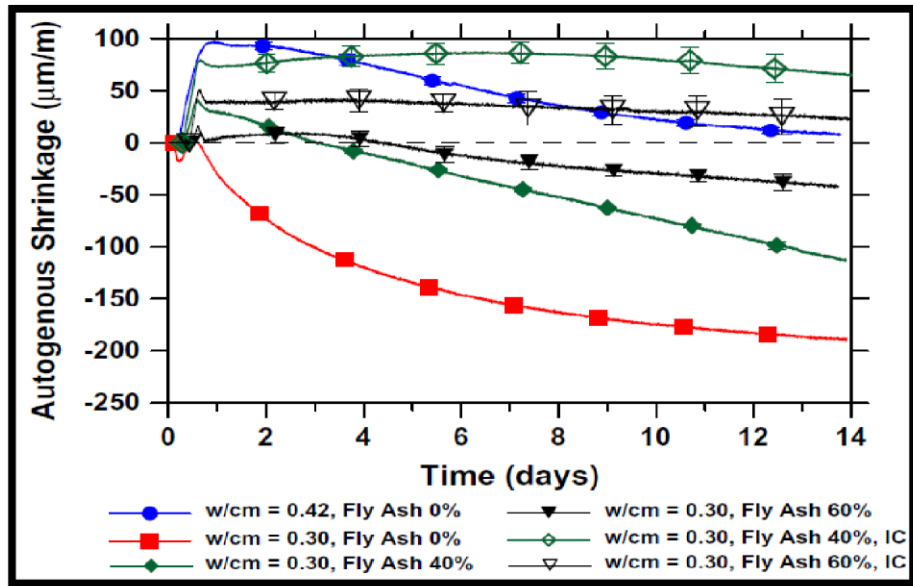


Fig.31 Contracción autógena en variación al contenido de ceniza volante <sup>(38)</sup>

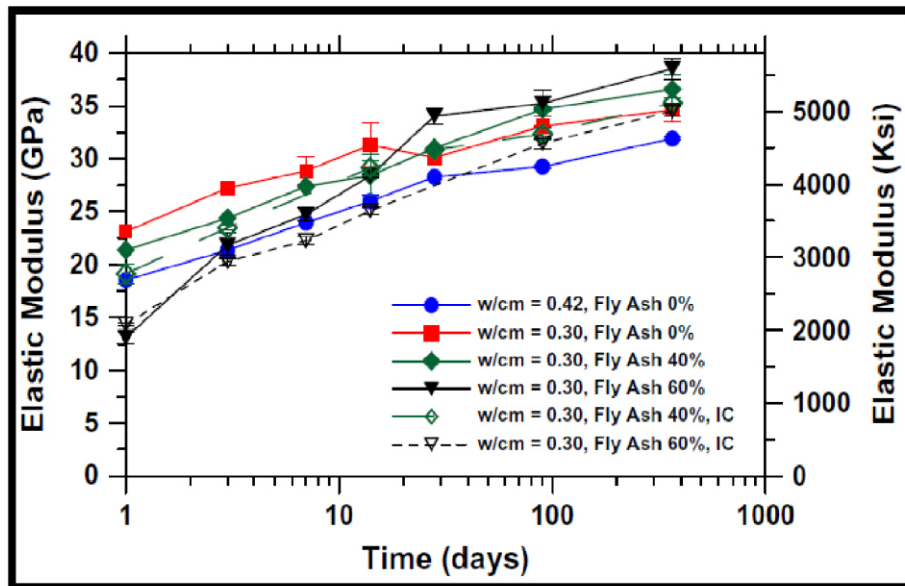


Fig.32 Módulo de elasticidad, variando el porcentaje de ceniza volante <sup>(38)</sup>

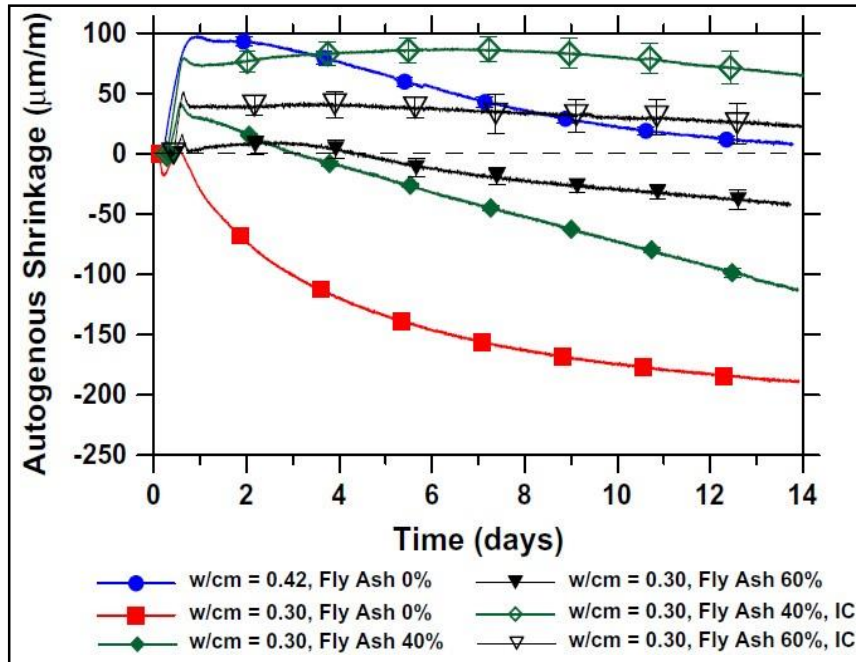


Fig.33 Contracción autógena con diferentes porcentajes de ceniza volante<sup>(38)</sup>

### 3.11 EFECTO DE LA CARBONATACIÓN EN LOS CAC

El ingreso del CO<sub>2</sub> del ambiente a través de la red de poros en el concreto y el rápido avance que se presenta, depende de la estructura y el tamaño; esto aunado con la interconexión de los poros. Todo esto está ligado a las relaciones (a/c) y a la cantidad en que se adhieran los cementantes alternativos, ya que éstos también influyen en la disminución del frente de carbonatación en CAC.<sup>(39)</sup>

El frente de carbonatación tiende a ser mayor con una sustitución de material cementante mayor en los concretos, pero disminuye con el tiempo de curado y la edad del concreto debido a los fenómenos de hidratación de la pasta.<sup>(40)</sup>

El  $\text{CO}_2$  se disuelve, como todos los gases, en el agua para formar un ácido. A diferencia de otros ácidos, el ácido carbónico no ataca la pasta de cemento pero neutraliza los álcalis en el agua de la solución de poro, formando carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Se muestran las reacciones durante este proceso:



En los poros del concreto existe hidróxido de calcio que puede ser disuelto en los poros del agua, lo que mantiene un pH en el nivel de 12 a 13, siempre y cuando no se lleven a cabo reacciones de carbonatación. <sup>(41)</sup> Se ha investigado sobre el efecto del  $\text{CO}_2$  en concretos reforzados adicionados con cementantes alternativos, teniendo como conclusión que el uso de humo de sílice en bajas proporciones no reduce la corrosión en el acero de refuerzo. Con relaciones (a/c) de 0.30 a 0.80 con sustituciones de humo de sílice al 20% se notó diferencia en la velocidad de la corrosión del acero de refuerzo, el consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  juega un papel importante y depende de la concentración y del efecto del humo de sílice, como lo muestra la figura 34. <sup>(42)</sup>

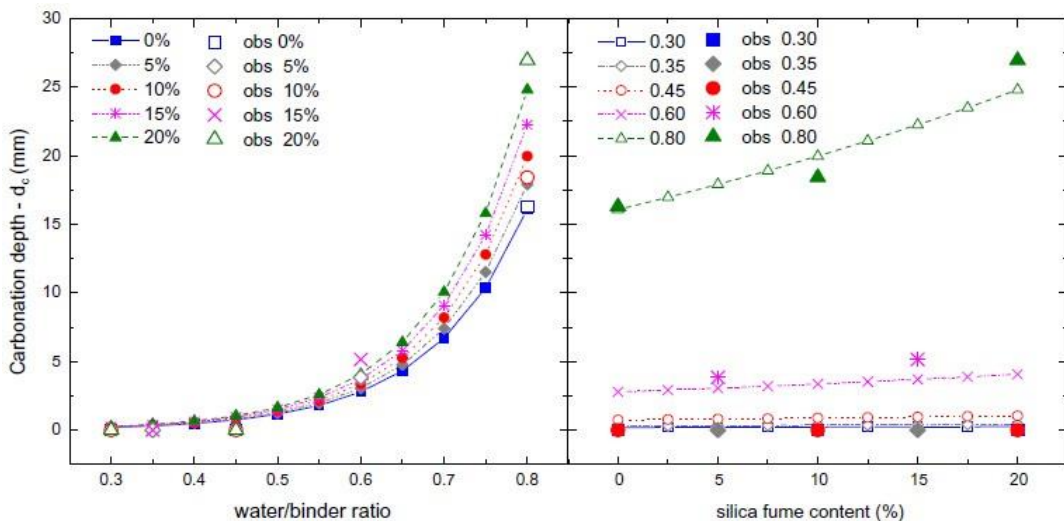


Fig.34. Carbonatación del concreto a 128 días de edad (98 días de carbonatación acelerada) <sup>(42)</sup>

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluyó que para valores por encima de la relación (a/c) permisible, las características químicas desempeñan un papel importante en el nivel de carbonatación y el consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en las reacciones puzolánicas del humo de sílice tiene un efecto importante en la carbonatación. <sup>(42)</sup>

Para determinar el umbral de carbonatación es importante determinar qué relación (a/c) debe utilizarse en los CAC expuestos. <sup>(42)</sup>



### 3.12 LOS CLORUROS EN EL CAC

Los cloruros son compuestos que llevan un átomo de cloro en estado de oxidación formal  $-1$ . Por lo tanto, éstos corresponden al estado de oxidación más bajo de este elemento, ya que tiene completa la capa de valencia con ocho electrones. Este producto se utiliza como sal de deshielo y otras aplicaciones industriales debido a esto la industria encargada de su producción sufre daños por el fenómeno de la corrosión. (fig. 35) <sup>(43)</sup>



Fig.35 Cloruro de calcio en forma de pellet.

El ingreso de los cloruros al concreto es seguido por la corrosión del acero de refuerzo en concreto, a lo largo de las costas o zonas marinas. La corrosión es inducida por los cloruros y se presenta en nuestro país en estructuras expuestas al medio marino (fig.36). Los iones cloruro están presentes en el agua de mar, pero es posible que también el viento los desplace mediante brisa marina, a la zonas costeras y los deposite en estructuras de concreto cercanas a la línea de mar. Otra fuente de cloruros es en el agua de amasado con que algunas veces se elaboran los concretos, lo cual aumenta un alto riesgo de corrosión. <sup>(43)</sup>

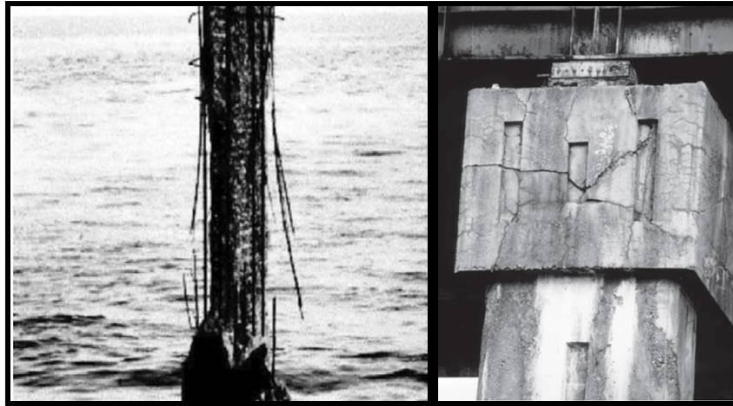


Fig. 36 Estructuras dañadas por el fenómeno de la corrosión en zonas marinas.

Los iones cloruro pueden estar presentes en el concreto de tres maneras: enlazados, absorbidos y disueltos en el agua que se conserva en los poros del concreto, lo que constituye la disolución poro. En la (fig.37) se ilustran los tres casos y se indican los equilibrios que se establecen para los cloruros en el concreto. <sup>(43)</sup>

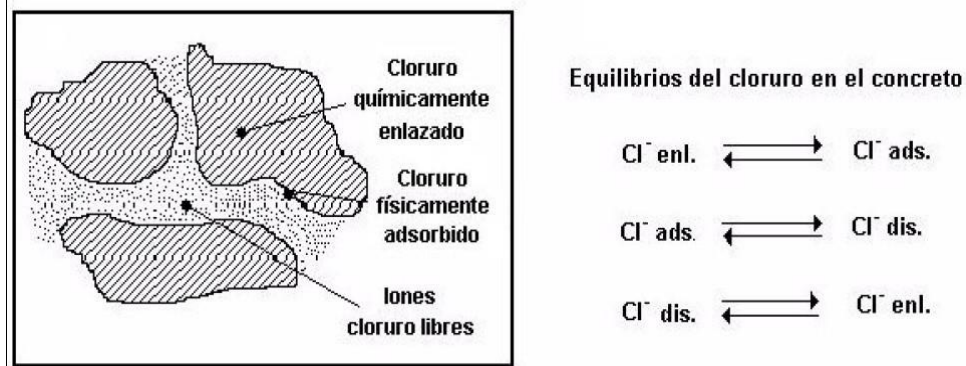


Fig. 37 Equilibrios de los cloruros en el concreto <sup>(43)</sup>

En el caso de una fuente externa de iones cloruro, el acceso es a través de los poros del concreto. Al avanzar al interior una cantidad reacciona, otra se absorbe y otra fracción queda disuelta. El medio de exposición es determinante para el ingreso de los iones cloruro. <sup>(43)</sup>

En obras que se encuentran a la intemperie, ya sea en zonas industriales (fig.38) o en zonas marinas (fig. 36), durante el día, por efecto de la humedad relativa del ambiente, se evapora una cierta cantidad de agua contenida en los poros, quedando éstos parcialmente llenos. Si la brisa marina o el viento en zonas de la industria química deposita sal sobre su área superficial, el ingreso del ion se hace por succión capilar; o sea, cuando la humedad relativa permite la formación de una película superficial de agua a la que se le conoce también como “punto de rocío”, que es succionada por los poros capilares para llenarse nuevamente. En la succión, los cloruros que se depositaron durante el día son transportados por el agua y penetran al interior del concreto. <sup>(43)</sup>



Fig. 38 Las estructuras industriales son más vulnerables al ataque químico por iones cloruro

En el caso de zonas industriales de producción de materiales alcalinos, tales como los cloruros de calcio y los cloruros de sodio, el agua que se utiliza en los procesos industriales junto con los pellets de cloro que se producen, forman una solución de alta temperatura que no se evapora pero tiene la misma función que una brisa marina en el ambiente costero. Como ya se mencionó anteriormente, los cloruros de igual manera son corrosivos para el acero de refuerzo. En las siguientes figuras se muestra el ataque por iones cloruro: en el inciso a) se muestra la viga dañada y en el inciso b) se observan las grandes cantidades de cloruros durante la producción industrial de álcalis (fig. 39) también véase la (fig. 40). <sup>(43)</sup>

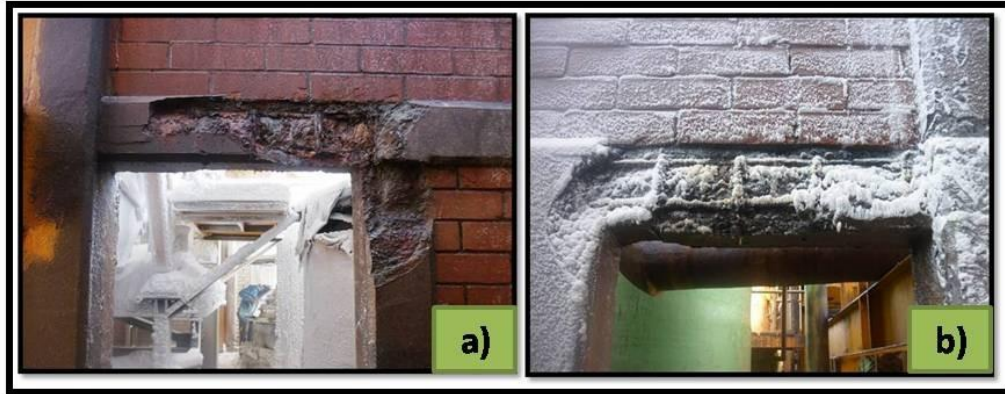


Fig.39 Ataque de cloruros en estructuras industriales

En cuanto al tiempo que tardan los cloruros en llegar al acero de refuerzo en una estructura ya construida, lo importante es averiguar a qué profundidad han penetrado en el momento de hacer la inspección, ya que el recubrimiento de concreto debe ser superior con respecto a la profundidad del acero de refuerzo, para que el concreto sea capaz de frenar el ingreso del cloruro y aumentar el tiempo previsto con respecto a la vida útil de la estructura de concreto reforzado. <sup>(43)</sup>



Fig. 40 Losa de concreto dañada por corrosión en un ambiente industrial, en la producción de cloruros en la industria química.

La velocidad de avance de los cloruros es, en general, una función de la raíz cuadrada del tiempo:

$$X_{cl}^{-1} = K_{cl}^{-1} \sqrt{t} \quad (4)$$

$X_{cl}^{-1}$  = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros

t= tiempo.

$K_{cl}^{-1}$  = Constante dependiente del concreto y del medio.

Ya que, en general, tanto los procesos de difusión pura, como los de absorción capilar, siguen una ley potencial.

El cálculo riguroso de X es complejo, debido a la multitud de parámetros que influyen (porosidad del hormigón, tipo de cemento, nivel de contaminación exterior, contenido en humedad del concreto, etc.).

Una de las expresiones matemáticas que más se emplea para efectuar la predicción de la velocidad de penetración o para ser ajustada a los perfiles de concentración de cloruros encontrados en las estructuras reales, es la solución a la segunda ley de Fick: <sup>(43)</sup>

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

Que se conoce como la “ecuación de la función de error”:

$$C_x = C_s (1 - \operatorname{erf}) \frac{X_{cl}}{2 \sqrt{D_{ap} t}} \quad (6)$$

$C_x$  = Concentración a la distancia.

$C_s$  = Concentración Superficial.

$X_{cl}^{-1}$  = Profundidad alcanzada.

$D_{ap}$  = Coeficiente aparente de difusión.

t = tiempo.



También se ha investigado sobre el efecto del uso de PSA y AL en concretos expuestos a ambientes marinos como lo son los puentes del río Mulde, Saxony, Alemania (a) (fig. 41) y el puente Nordhordland, al norte de Bergen, Noruega (b) (fig. 41). En este último se estudiaron diferentes relaciones (a/c) y el efecto de permeabilidad a los iones cloruro, que es el principal agente que produce la corrosión en la zona donde se encuentran. <sup>(44)</sup>

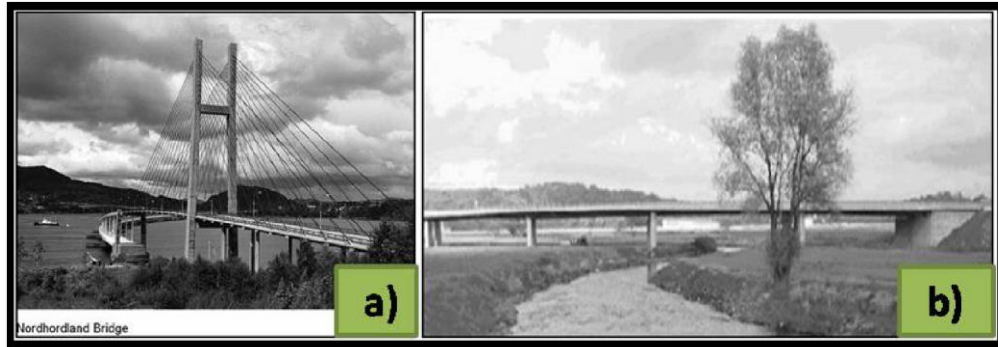


Fig. 41 Estructuras donde se han utilizado PSA y AL como agentes de CI.

En la (fig. 42) se detallan con más precisión los datos de los tipos de concretos y los resultados de la prueba de migración rápida. <sup>(44)</sup>

Concrete ID	w/c	Density (kg/m <sup>3</sup> )	28-Day strength (MPa)	Total charge passed <sup>a</sup> (Coulombs)	Rapid migration test <sup>a</sup>		Salt ponding test <sup>a</sup>	
					Penetration depth (mm)	Migration coefficient ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	Surface chloride content (kg/m <sup>3</sup> )	Diffusion coefficient ( $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)
CP	0.38	2010	70	8610 (117)	18.1 (7.2)	8.9 (4.1)	20.8 (0.4)	6.7 (1.5)
NC1	0.38	2360	71	2528 (210)	18.4 (1.4)	8.8 (0.6)	10.4 (3.6) <sup>b</sup>	6.0 (0.7) <sup>b</sup>
NC2	0.54	2290	49	6199 (765)	32.8 (2.8)	19.1 (2.5)	N.A.	N.A.
LC1	0.38	1900	50	2385 (141)	14.3 (3.7)	6.5 (1.8)	13.0 (4.3)	5.3 (1.1)
LC2	0.38	1860	47	2496 (175)	17.9 (0.3)	7.6 (0.1)	22.6 (3.1)	5.9 (1.5)
LC3	0.38	1740	42	3278 (273)	17.8 (1.8)	8.8 (0.8)	17.7 (8.3)	6.4 (1.9)
LC4-25	0.38	1610	38	2559 (200)	14.3 (1.2)	6.6 (1.2)	N.A.	N.A.
LC4-30	0.38	1620	34	3620 (529)	12.3 (1.0)	8.9 (0.6)	24.68	9.0 (0.7)

Fig. 42 Propiedades de los concretos y su resistividad a la penetración de los iones cloruro.

En el estudio se concluyó que mejorar la (ITZ) zona de interfaces por sus siglas en ingles, entre el AL y la matriz de la pasta mejoraría la microestructura de los poros del concreto, tal como lo muestra la figura 43. <sup>(44)</sup>

La profundidad de penetración y el coeficiente de cloruros se determinaron por el método NT Build 492 y los resultados fueron similares o inferiores a los de la mezcla de control como lo muestra la figura 42. <sup>(44)</sup>

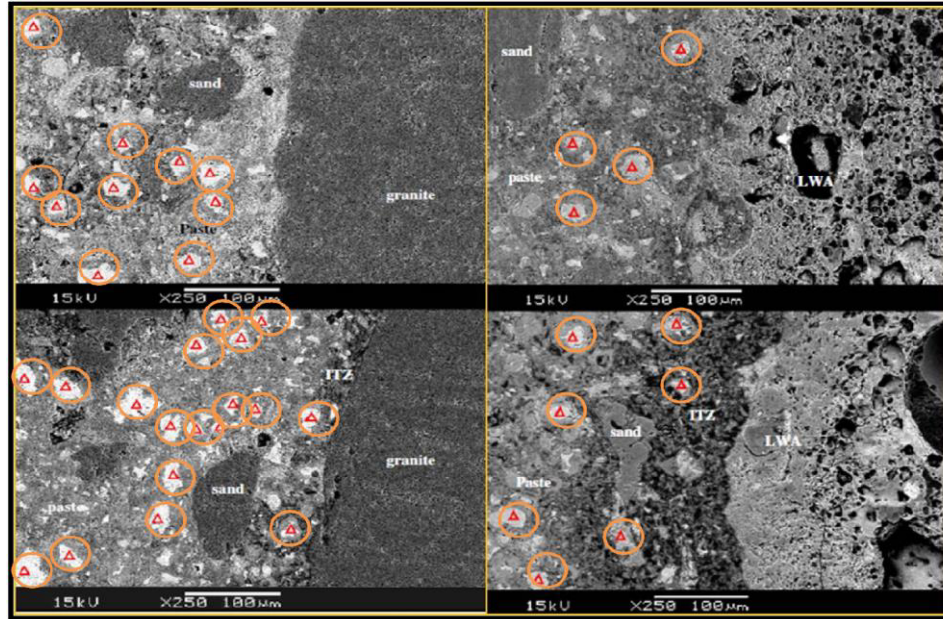


Fig. 43 Comparación la ITZ de concretos con agregado normal y concretos con AL. <sup>(44)</sup>

En la (fig.43) se observa que en los concretos donde se utilizó agregado de peso normal en la ITZ existen más poros (marcado con círculos) que en correlación con los concretos que usaron AL. Esto tiene gran relevancia en la penetración de los iones cloruro en la (fig. 44) se muestra el contenido de cloruros sobre la distancia de superficie. <sup>(44)</sup>

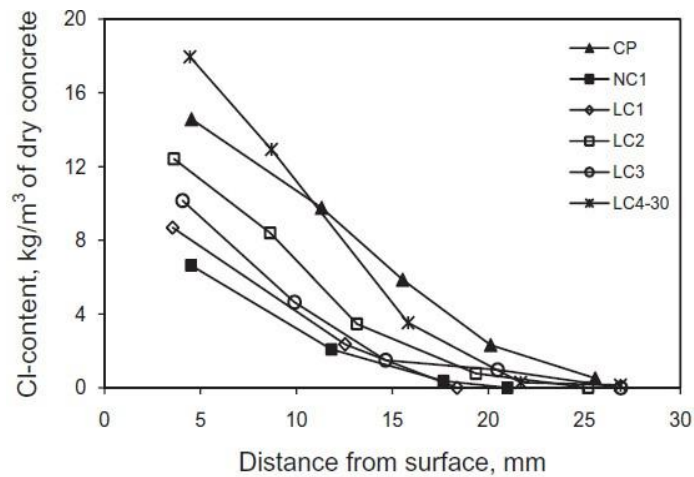


Fig. 44 Contenido de cloruros, en correlación con la distancia desde la superficie, en los diferentes tipos de concretos.

Para estudiar el ingreso de los cloruros también se han estudiado diferentes métodos para predecir la cantidad de iones cloruro en el interior de los concretos expuestos; por ejemplo, el método colorimétrico, en correlación con la permeabilidad rápida a los iones cloruro de la ASTM C 1202-91, donde se encontraron diferentes valores. En la (fig. 45) se muestran los diferentes concretos que se estudiaron. <sup>(45)</sup>

	Label							
	A	B	C	D	E	F	H	J
Binder	OPC	OPC	BFSC	FA	SF	BFSC	BFSC	FA
w/c	0.4	0.7	0.7	0.7	0.4	0.4	0.7	0.4
Cement (kg/m <sup>3</sup> )	380	380	380	380	380	380	380	380
Sand (kg/m <sup>3</sup> )	872.4	739.9	739.9	739.9	872.4	872.4	739.9	872.4
Gravel (kg/m <sup>3</sup> )	1115.5	946.6	946.6	946.6	1115.5	1115.5	946.6	1115.5
Curing (days)	28	28	28	28	28	28	7	28

OPC: Ordinary portland cement; BFSC: blast furnace slag cement; FA: fly ash; SF: silica fume.

Fig. 45 Concretos con diferentes adiciones de cementantes <sup>(45)</sup>

En las siguientes figuras (fig.46 y fig. 47) se puede observar la comparación de los métodos para determinar la penetración de los cloruros, mostrando mayor confiabilidad la prueba de ASTM C 1202, ya que el método colorimétrico no muestra los cloruros libres en las porosidades del concreto. <sup>(45)</sup>

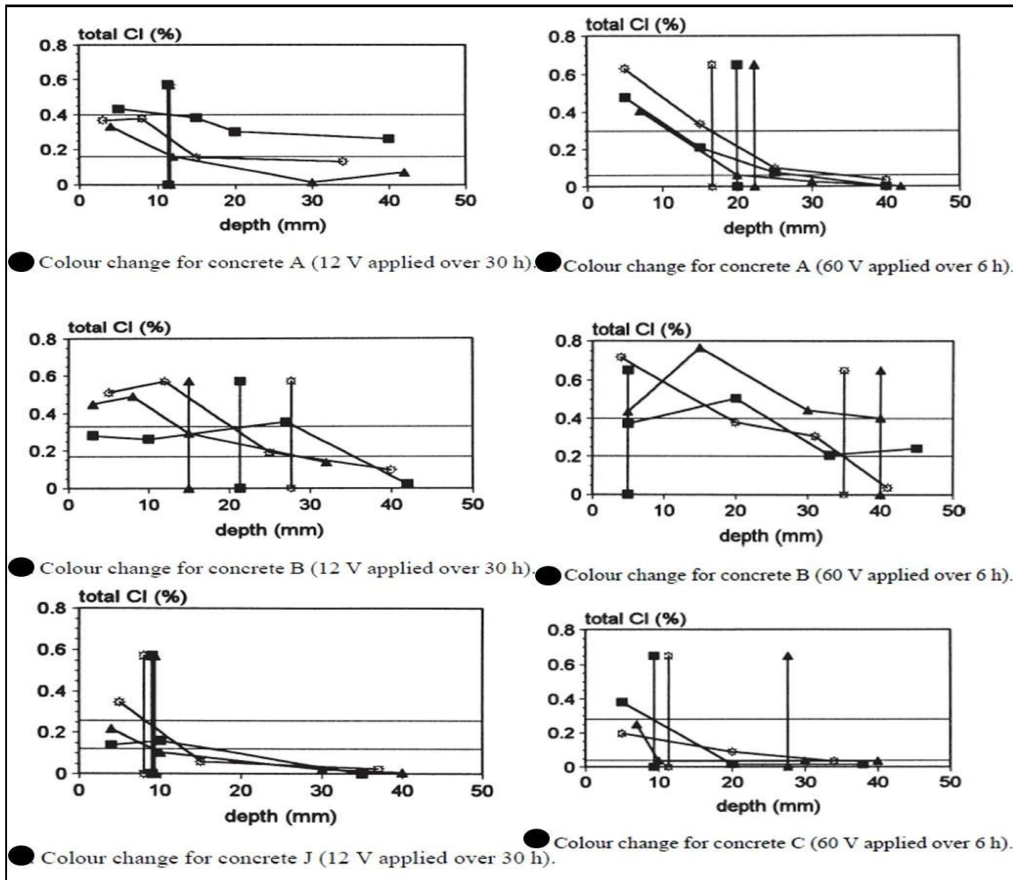


Fig. 46 Profundidad de penetración de los cloruros en variación del voltaje. <sup>(45)</sup>



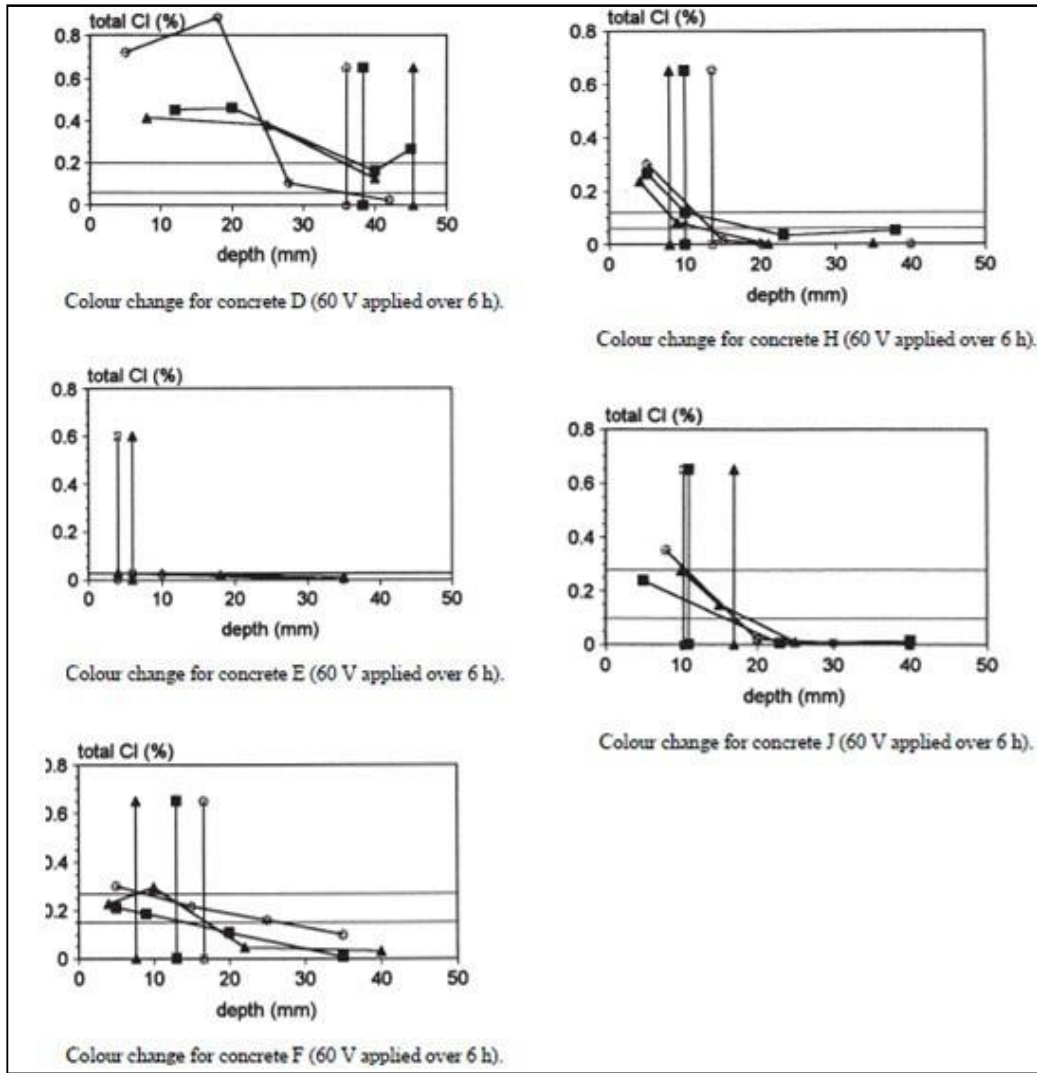


Fig. 47 Profundidad de penetración de los cloruros en una variación del voltaje

Las líneas paralelas muestran la profundidad que determina el método colorimétrico y las líneas dispersas muestran el valor determinado por la prueba de ASTM C 1202.

Por lo anterior se puede concluir que el método colorimétrico es más confiable para concretos más densos, ya que los cloruros libres pueden presentarse entre las porosidades de los concretos menos densos, que para este caso se utiliza la prueba de permeabilidad rápida. <sup>(45)</sup>

Cabe mencionar que el voltaje no influye en la coloración del pigmento en la determinación de los cloruros totales. <sup>(45)</sup>



## **CAPÍTULO 4**

# **CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES PARA SU USO EN LOS CONCRETOS**

## 4.1 PRUEBAS PRELIMINARES EN LOS MATERIALES UTILIZADOS.

### 4.1.1 COMPACIDAD DE LOS AGREGADOS.

En la prueba que se elaboró, el máximo de peso volumétrico superficialmente seco (PVSS) se presentó en una relación de 45:55 de AG (agregado grueso), AF (agregado fino) por lo que se optó por utilizar esta relación entre los agregados para asegurar el menor consumo de cemento necesario.

### 4.1.2 PUNTOS DE SATURACIÓN.

El punto de saturación de los aditivos en pastas está definido como la dosificación óptima del aditivo en la pasta, para la cual ya no presenta un aumento significativo en su fluidez. Gomes et al, <sup>(46)</sup> propusieron un método para determinar la dosificación óptima de aditivo (punto de saturación) basado en el tiempo de fluidez, empleando el cono de Marsh con una abertura de 8mm, para pastas de cemento, el cual se ilustra en la figura 48. En este método se determina el ángulo interno de la curva de tiempo de fluidez Vs el consumo de aditivo. El punto correspondiente a un ángulo interno de  $140^\circ \pm 10^\circ$  se toma como punto de saturación. <sup>(46)</sup>

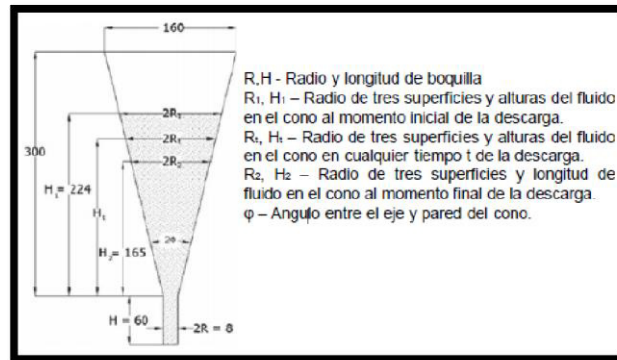


Fig.48 Punto de saturación.

Pasos que se llevaron a cabo para determinar el punto de saturación:

1. Para esta investigación se utilizó una relación (a/c) de 0.40.
2. Se determinaron las densidades secas del cemento y del aditivo.
3. Se determinó el contenido de agua en el aditivo para considerarla en el agua de reacción.
4. Se calcularon las proporciones.
5. Se pesaron los materiales para las pruebas (cemento, agua, aditivos).
6. Se efectuó el proceso del mezclado
7. Se determinó la fluidez, con el cono Marsh.

## 4.2 AGREGADOS

### 4.2.1 AGREGADO LIGERO (PUMICITA)

La pumicita es una roca volcánica porosa con apariencia esponjosa. La estructura de poros se formó por los gases disueltos que se precipitaron durante el enfriamiento de la lava que fue arrojada al aire. Todos los tipos de magma pueden formar pumicita. La conectividad de la estructura de poro puede variar desde completamente cerrado a completamente abierto.<sup>(33)</sup> Son agregados que se preparan procesando materiales a partir de productos naturales. La Pumicita es una roca ígnea que presenta una textura esponjosa y/o vesicular, compuesta principalmente por vidrio. También presenta muchos huecos o cavidades; las vesículas, en parte, están unidas y forman tubos alargados a lo largo de la roca. Este material se produce por la expansión de gases internos dentro de la lava, formándose cuando ésta llega a la superficie; se desarrolla en lavas de riolita que suelen ser muy viscosas.<sup>(47)</sup>



Fig.49 Agregado ligero (Pumicita).

Como se mencionó anteriormente, la pumicita es un agregado de origen volcánico, con tamaño máximo nominal de 5mm (pasa la malla # 4), empleado como agente de curado interno en mezclas de mortero y/o concreto. Las propiedades físicas de los agregados ligeros se presentan en la siguiente tabla (ver tabla No 4).

Los resultados de los análisis granulométricos y la tasa de desorción aparecen en la figura 50. Las propiedades físicas se obtuvieron de acuerdo con las siguientes normas ASTM: densidad C 127-07<sup>(48)</sup>, absorción C 128-07<sup>(49)</sup>, peso volumétrico C 138/C 138M-08<sup>(50)</sup> y análisis granulométrico C 136-06.<sup>(51)</sup>

Tabla No.4 Propiedades de los materiales

Propiedad	Pumicita
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1476
Módulo de finura	5.3
Absorción (%)	31.5
Peso volumétrico seco suelto (kg/m <sup>3</sup> )	470.7
peso volumétrico varillado seco (kg/m <sup>3</sup> )	509.6

#### 4.2.2 DESORCIÓN DE LOS AGREGADOS LIGEROS

La cantidad de agua que retiene el agregado como porcentaje de su peso seco, es una relación directa de la desorción del material. La desorción es una medida para evaluar la velocidad y la cantidad de agua que liberan los agregados ligeros saturados al estar sometidos a diferentes humedades relativas. Para medir esta propiedad se utilizaron las siguientes sales:

Tabla No. 5 Porcentaje de sales para la determinación de la desorción

Nomenclatura	Tipo de sal	Porcentaje de HR(%)
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de potasio	97.23
KNO <sub>3</sub>	Nitrato de potasio	91.92
KCl	Cloruro de potasio	84.17
NaCl	Cloruro de sodio	75.25

El primer paso que se siguió para medir la desorción fue la saturación en un frasco al 100% de humedad relativa (HR), similar a las condiciones del concreto fresco cuando se coloca en la obra. Esto para representar el grado de humedad que actúa sobre el agregado, una vez que comienza la hidratación del cemento, conforme se reduce la humedad relativa local. Se utilizaron las sales descritas, que fijaron la humedad relativa del ambiente cerrado en el que se colocó el agregado. La justificación para la utilización de estas humedades relativas se basa en que para humedades inferiores que el 80%, en los capilares, la hidratación del concreto se detiene, según powers<sup>(26)</sup>.

Se hicieron mediciones en dos agregados ligeros y a pesar de que ambos agregados representan tasas de desorción similares, la pumicita retiene mayor cantidad de agua al inicio del estudio <sup>(52)</sup>; aspecto que se reflejo de manera favorable en los concretos que utilizaron el curado interno mejorado (tecnología VERDiCT).

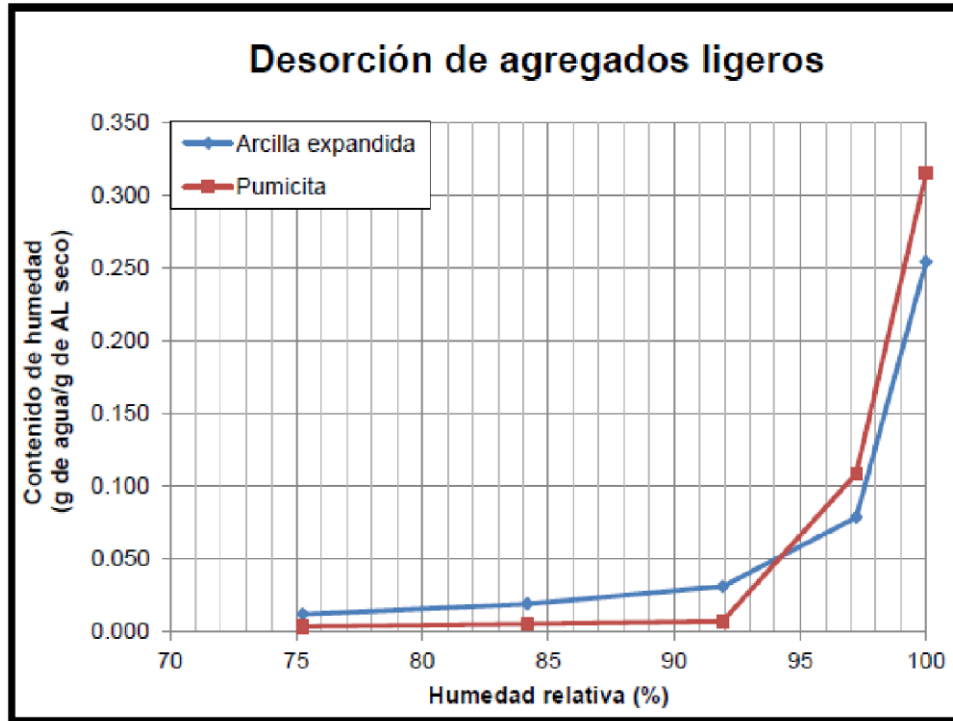


Fig. 50 Desorción del agregado ligero <sup>(52)</sup>

### 4.3 EL AGREGADO CALIZO:

Éste es un agregado granular triturado de peso normal, que resulta del proceso de molienda, como arena, grava o piedra, que al ser utilizado con algún medio cementante produce concreto o mortero de cemento hidráulico. El agregado utilizado en este trabajo es típico en el área de Monterrey N.L. México y el resto del Estado. Son rocas formadas por carbonatos de calcio principalmente. El material empleado en esta investigación pasa la malla de 9.5mm (3/8 in.) y el fino pasa como agregado grueso 4.75mm (No. 4) y en su mayoría se retiene en la malla de 75 $\mu$ m (No. 200).<sup>(53)</sup>



Fig.51 Agregado calizo utilizado en las mezclas de concreto

Las propiedades físicas de los agregados se determinaron en el departamento de tecnología del concreto de la FIC- UANL, mediante las siguientes normas ASTM: densidad C 127-07<sup>(48)</sup>, absorción C 128-07<sup>(49)</sup>, peso volumétrico C 138/C 138M-08<sup>(50)</sup> y análisis granulométrico C 136-06<sup>(51)</sup>. ASTM C-33<sup>(54)</sup>. Los resultados de los análisis granulométricos se muestran en la tabla No.5



Tabla No.6 Distribución granulométrica de los agregados finos, los agregados gruesos y los límites especificados por ASTM C33.

Malla	ASTM Límite Inferior	ASTM Límite Superior	Agregado fino de caliza	Agregado fino de pumicita
3/8	100	100	100	100
4	95	100	99.27	99.87
8	80	100	77.61	72.6
16	50	85	51.96	38.76
30	25	60	30.91	20.88
50	5	30	19.15	12.93
100	0	10	17.68	8.66
Pasa	0	0	0	0
<b>Agregado Grueso</b>				
	<b>Porcentaje retenido</b>		<b>Porcentaje que pasa</b>	
1	0		100	
3/4	9.35		90.65	
1/2	46.12		44.53	
3/8	25.94		18.6	
4	16.43		2.17	
Pasa	2.17		0	

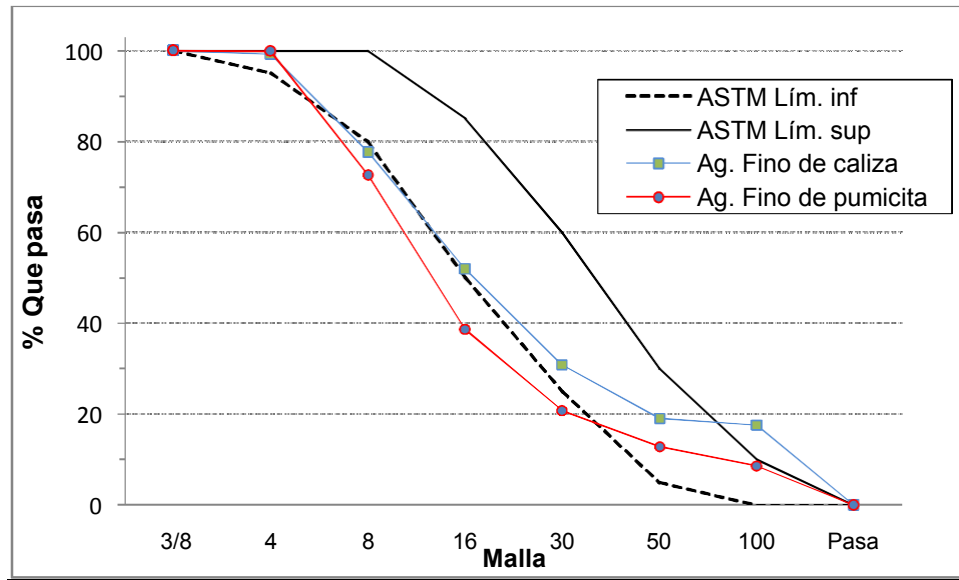


Fig. 52 Granulometría de los agregados finos

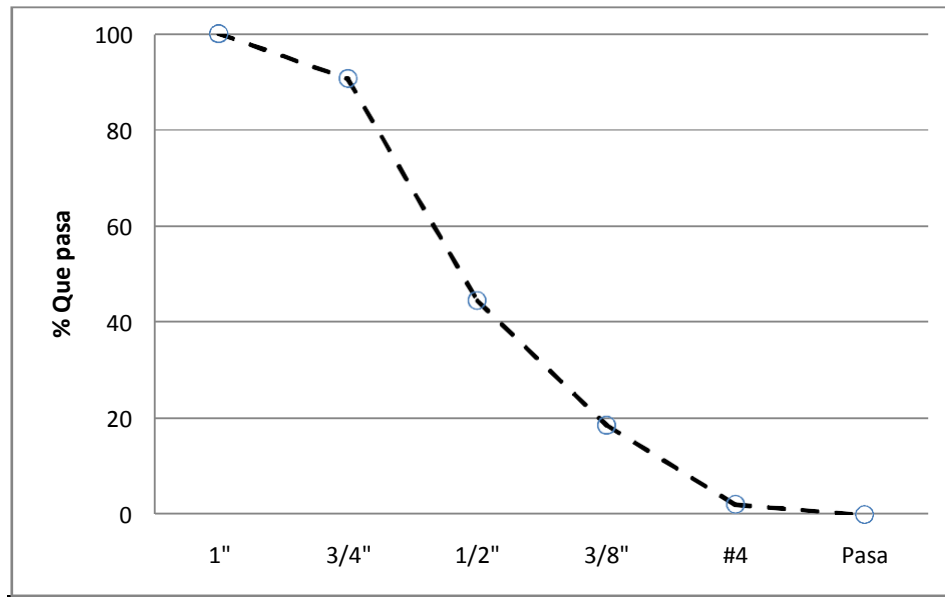


Fig. 53 Granulometría de los agregados gruesos

## 4.4 CEMENTANTES

### 4.4.1 CEMENTO PORTLAND ORDINARIO (CPO)

El cemento pórtland ordinario tiene, en principio, los mismos empleos que los de otros tipos de cementos según ASTM C 150<sup>(55)</sup> (Tipo I Y II). Por ejemplo, en condiciones comparables de resistencia mecánica, el cemento pórtland ordinario, en general, desprende un mayor calor de hidratación y es más sensible a los ataques químicos por medios ácidos y salinas (en particular, por los sulfatos). No obstante, este cemento puede ostentar, en determinados casos, las características especiales de bajo calor de hidratación y de resistencia a los sulfatos. Un factor positivo es que puede conferir una mayor protección a las armaduras contra la corrosión metálica, por lo que el cemento pórtland ordinario es utilizable con ventaja en el caso de concreto pretensado que implique una gran responsabilidad, siempre que se tenga en cuenta la posibilidad de fisuración por contracción (sobre todo térmica), en particular por lo que pueda afectar a la propia corrosión del refuerzo.<sup>(56)</sup>

El cemento pórtland ordinario es especialmente apto para la prefabricación, particularmente sin tratamientos y concretos de altas resistencias; en obras públicas especiales y de gran responsabilidad como puentes de concreto pretensado, otros elementos estructurales pretensados, etc. En el caso de concretos con cenizas volantes, sobre todo en proporciones altas, es aconsejable, prácticamente el uso exclusivo de cemento portland ordinario y cumple los requisitos de ASTM C150.<sup>(56)</sup>



Fig. 54 Cemento pórtland ordinario (CPO 40R).<sup>(56)</sup>

#### 4.4.2 LA CENIZA VOLANTE

La ceniza volante es un subproducto industrial proveniente de las plantas de carbón generadoras de electricidad, que resulta de la combustión del carbón molido o pulverizado y que se transporta desde la caja de fuego de la caldera por los gases de combustión y recolectados principalmente por precipitadores electrostáticos o bolsas y, secundariamente, por sistemas de depuración <sup>(57)</sup>.

Su recolección y almacenamiento tiene un valor económico importante que repercute en los costos de producción de la energía eléctrica. <sup>(57)</sup>



Fig. 55 Planta generadora de energía, de donde proviene la ceniza volante.

Según la norma ASTM C 618-01<sup>(57)</sup>, La ceniza volante se divide y clasifica en tres tipos:

Clase N: puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas o pumicitas calcinadas o sin calcinar; y varios materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas. <sup>(57)</sup>

Clase F: ceniza volante comúnmente producida por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Estas cenizas poseen propiedades puzolánicas.<sup>(57)</sup>

Clase C: ceniza volante comúnmente producida por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza, además de tener propiedades puzolánicas, tiene algunas propiedades cementantes.<sup>(57)</sup>

#### **4.5 EFECTO DEL TAMAÑO DE LA PARTÍCULA**

Respecto al tamaño de partícula, algunos autores señalan que es importante para las contribuciones físicas y químicas dentro de la masa de concreto. De igual manera que el agregado fino llena los espacios entre los agregados gruesos y los cementantes alternativos llenan los espacios entre los granos de cemento, incluso si el uso de la ceniza volante no reacciona químicamente, el efecto micro-filler podría traer importantes beneficios para el concreto.<sup>(58)</sup>

La distribución de tamaño de partícula se determinó mediante un analizador de partículas (fig.56) perteneciente al laboratorio de investigación de materiales de construcción de la Facultad de Ingeniería Civil–UANL, técnica mediante la cual se pueden determinar los tamaños promedio de las partículas cementantes.



Fig.56 Equipo MICROTAC S3500.

## **4.6 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS AL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.**

### **4.6.1 MÉTODO DE PRUEBA NORMALIZADA PARA DETERMINAR EL PESO UNITARIO ASTM C138.**

La prueba de la masa volumétrica es una herramienta importante utilizada para controlar la calidad del concreto recién mezclado. Después de que se ha establecido un proporcionamiento para la mezcla de concreto, un cambio en la masa volumétrica indicará un cambio en uno o más de los otros requisitos del desempeño del concreto.

Una masa volumétrica más baja puede indicar, 1) que los materiales han cambiado; 2) un mayor contenido de aire; 3) un mayor contenido de agua; 4) un cambio en las proporciones de los ingredientes y/o, 5) un menor contenido de cemento. Inversamente, la masa volumétrica más alta indicará lo contrario de las características del concreto antes mencionadas.<sup>(59)</sup> Una masa volumétrica más baja que las proporciones de la mezcla de concreto establecidas, en general indicará un “sobre rendimiento”; esto significa que el contenido de cemento requerido para un metro cúbico disminuye para producir un mayor volumen de concreto. Por lo tanto, se debe esperar resistencias más bajas así como una reducción de las otras cualidades deseables del concreto.<sup>(59)</sup>

Si la reducción de la masa unitaria del concreto se debe a un incremento en el contenido de aire, posiblemente el concreto será más durable en su resistencia a ciclos de congelación y deshielo; pero las cualidades de resistencia a la compresión, a la abrasión, al ataque de químicos, a la contracción y al agrietamiento del concreto, se verán adversamente afectadas.<sup>(59)</sup>

La prueba de masa volumétrica se debe usar para controlar concretos ligeros y pesados. Un cambio en la masa unitaria podría afectar inversamente la bombeabilidad, colocación, acabado y resistencia de todos los tipos de concreto.<sup>(59)</sup>

En el laboratorio, la prueba de la masa unitaria se puede usar también para determinar el contenido de aire (porcentaje de vacíos) del concreto, puesto que se conoce el peso teórico del concreto, calculado sobre la base de libre de aire ( $\text{kg/m}^3$ ).<sup>(59)</sup>

#### **4.6.2 MÉTODO DE PRUEBA NORMALIZADA PARA DETERMINAR EL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO ELABORADO CON CEMENTO HIDRÁULICO. ASTM C 143.** <sup>(60)</sup>

El propósito de la prueba de revenimiento es determinar la consistencia del concreto. Ésta es una medida de fluidez o movilidad relativa de la mezcla de concreto. El revenimiento no mide el contenido de agua o la trabajabilidad del concreto. Es verdad que el incremento o disminución en el contenido de agua causará el correspondiente aumento o disminución en el revenimiento del concreto, siempre y cuando todos los otros materiales y condiciones permanezcan constantes. Sin embargo, muchos factores pueden causar que el revenimiento del concreto cambie, sin que cambie el contenido de agua. <sup>(60)</sup>

Además, el contenido de agua puede aumentar o disminuir sin cambio aparente en el revenimiento del concreto. Ciertos factores como el cambio de las propiedades de los agregados o granulometría, proporciones de la mezcla, contenido de aire, temperatura del concreto o el uso de aditivos especiales pueden influir en el revenimiento del concreto o inversamente, puede resultar un cambio en el requerimiento de contenido de agua para mantener un revenimiento dado. <sup>(60)</sup>

Por ejemplo, una mezcla con exceso de arena puede requerir más agua de mezclado que las proporciones estipuladas en el diseño de mezclas original, pero el revenimiento puede permanecer igual. Por lo tanto quien hace la mezcla no puede suponer que la relación agua/cemento está siendo mantenida simplemente porque el revenimiento está entre los límites de especificación. <sup>(60)</sup>

En el presente trabajo, la prueba de revenimiento se realizó de acuerdo con la norma ASTM C143. En la (fig. 73) se muestran los resultados de la prueba en una de las mezclas y en la tabla No. 11 se muestran los resultados obtenidos.

#### 4.6.3 MÉTODO DE PRUEBA NORMALIZADA PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO RECIEN MEZCLADO, POR EL METODO VOLUMÉTRICO ASTM C 173. <sup>(60)</sup>

Este método de prueba puede usarse para determinar el contenido de aire de cualquier tipo de concreto, incluyendo los ligeros, los normales y los pesados. Este método de prueba determinará la cantidad de vacíos de aire en el concreto, tanto si el aire es incluido o si quedó atrapado.



Fig.57 medidor de aire con cuello elevado

Para obtener más información se recomienda verificar la norma ASTM C 173 y/o el manual de técnicos para las pruebas al concreto en la obra del ACI.



## **4.7 PRUEBAS DE DURABILIDAD A LAS QUE SE SOMETIERON LOS CONCRETOS EN ESTADO ENDURECIDO.**

### **4.7.1 ASTM C 642 – ABSORCIÓN, DENSIDAD Y VACIOS EN EL CONCRETO ENDURECIDO <sup>(61)</sup>**

El agua puede penetrar en un cuerpo poroso, como líquido o como vapor por atracción capilar. Se le puede impulsar hacia el interior de ese cuerpo bajo presión o se puede introducir mediante una combinación de presión y atracción capilar. El movimiento de agua a través del cuerpo también puede comprender efectos osmóticos. Por absorción se entiende el proceso por el cual el concreto lleva agua hacia sus poros y capilares. La permeabilidad del concreto al agua o vapor es la propiedad que permite el paso del fluido o vapor a través del concreto. <sup>(61)</sup>

Todas las mezclas de concreto absorben agua y son permeables hasta cierto punto. El concreto tiene poros en todos sus componentes. Los poros en los agregados sufren sólo pequeños cambios con el tiempo, pero los poros en la pasta de cemento están sujetos a grandes cambios; en especial, durante los primeros días de la pasta. En una pasta de cemento puro, recién mezclada, se cuenta con espacio lleno de agua para la formación de los productos de hidratación. Este espacio originalmente está en función de la relación agua/cemento de la pasta, es reducido en forma continua por el volumen de gel hidratado que se precipita. En cualquier instante, el sistema capilar es esa parte del espacio original lleno de agua que no se llena con gel hidratado. De modo, resulta evidente que la hidratación reduce el tamaño y volumen de los poros capilares e incrementa el volumen del gel, y que el proceso es continuo a medida que progresa la hidratación. Se ha afirmado que si, el espacio capilar es pobre (relación agua/cemento menor que 0.40 en peso), al final el gel llenará todo el espacio original del agua y dejará una pasta sin poros capilares. <sup>(61)</sup>

En resumen el concreto contiene una amplia variedad de poros entre sus componentes y dentro de estos mismos. Pueden existir como esferoides separados o pueden encontrarse interconectados y distribuidos de manera aleatoria. Además, la estructura porosa cambiará conforme continúa la hidratación y causa la reducción de los poros capilares y un incremento en los poros del gel. <sup>(61)</sup>

Puesto que los poros capilares están directamente relacionados con la permeabilidad, al aumentar la hidratación se disminuye la permeabilidad. La pruebas de permeabilidad se llevan a cabo al sumergir las muestras de concreto en agua. <sup>(61)</sup>

#### **4.7.2 ASTM C 1202 – PERMEABILIDAD A LOS IONES CLORURO.**

##### **Propósito:**

El sistema a utilizar es el equipo **PROOVE'it** útil para evaluar la resistencia en el concreto al ingreso de iones cloruros en dos maneras:

- Determinando que tan fácil es forzar a los cloruros dentro de concreto saturado por medio de la aplicación de un potencial eléctrico a través de un espécimen de prueba de acuerdo a la norma AASHTO T 277 <sup>(62)</sup> o ASTM 1202<sup>(63)</sup>. Esto se conoce como la “Prueba rápida de permeabilidad de los cloruros (Rapid Chloride Permeability Test, RCPT)”.
- Midiendo la profundidad de penetración de iones cloruro, después de haber aplicado un potencial eléctrico al espécimen, de acuerdo con el NORTEST BUILD 492 (Chloride Migration Coefficient from Non-Steady State Migration Experiments) para determinar el “Coeficiente de migración de los cloruros”, el cual puede usarse para estimar el coeficiente de difusión de cloruros para cálculos de estimación de vida. <sup>(63)</sup>

**Principio:**

Un espécimen saturado en agua, 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, se posiciona en una celda que contiene una reserva de fluidos en ambos lados. Para la prueba coulomb, una reserva se llena con una solución de 3 % NaCl y la otra con solución 0.3N NaOH. Se aplica un potencial de 60 VCD, a través de la celda. La terminal negativa se conecta en la reserva con NaCl y la terminal positiva se conecta a la reserva con NaOH. <sup>(63)</sup>

Los iones cloruros cargados negativamente migraran hacia la terminal positiva. Entre más permeable sea el concreto, más iones cloruro viajaran a través de el espécimen, y una mayor corriente será medida. La corriente se mide por 6 horas. Se determina el área bajo la curva, contra el tiempo, la cual representa la carga total o los Coulomb que pasaron a través del espécimen. Los valores de la cantidad de Coulomb se utilizan para caracterizar el concreto, como sigue (ASTM C 1202): (ver fig. 58 <sup>(63)</sup>)

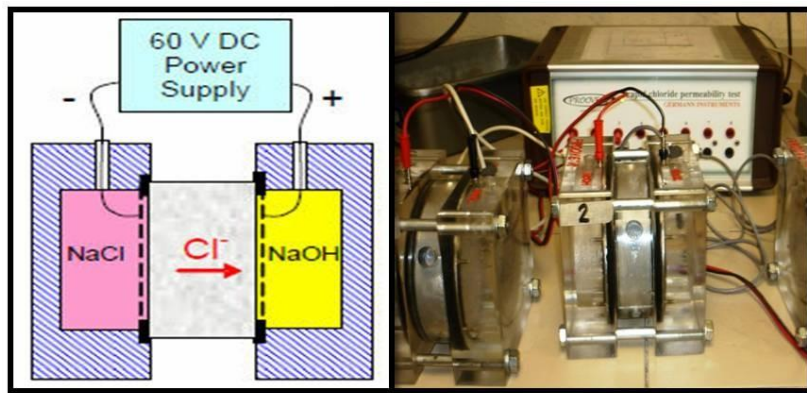


Fig. 58 principio de funcionamiento y conexión del equipo al espécimen del concreto para su prueba.

La permeabilidad a los iones cloruro se determinó de acuerdo con la norma ASTM C1202. En la siguiente tabla se muestran los valores típicos en Coulomb, la clase de permeabilidad y la relación (a/c). Esta última es la que determina la permeabilidad de un concreto.

Tabla No.7 Valores en Coulombs y tipos de permeabilidad según su relación (a/c) <sup>(63)</sup>

Coulomb	clase de permeabilidad	tipico de
> 4000	Alta	A/C > 0.5
4000-2000	Moderada	A/C >0.4 a 0.5
2000-1000	Baja	A/C < 0.4
1000-100	Muy baja	concreto modificado con látex
< 100	insignificante	concreto polimérico
A/C = relación agua cemento		

### 4.7.3 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE IONES CLORURO, SEGÚN LA NORMA ASTM C 1556. <sup>(64)</sup>

**Propósito:**

Determinar el umbral de cloruros en especímenes que aún no se han expuesto a otros ambientes. Las mediciones son a diferentes profundidades, dentro de los especímenes de concreto a exponer en soluciones que contienen cloruros. Los iones cloruro ingresan al espécimen de concreto siempre y cuando el concreto haya sido bien preparado.

**Método:**

Según la norma, se cortarán las muestras en una medida de 6 cm, para, posteriormente, prepararlas y pintarlas con pintura epóxica, para que sólo los cloruros penetren en forma vertical. <sup>(64)</sup>

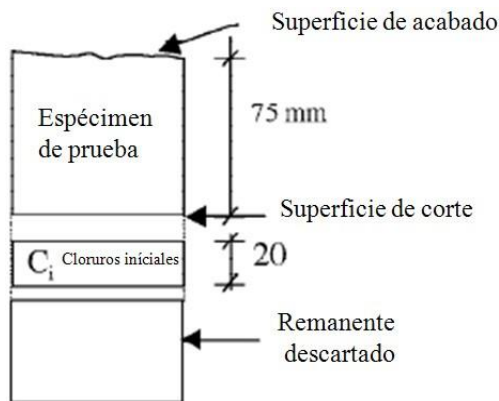


Fig. 59 Método para el corte del espécimen.

#### 4.7.4 CARBONATACIÓN ACELERADA - PROCEDIMIENTO INTERNO.<sup>(65)</sup>

##### Principio:

El dióxido de carbono del aire penetra a través de la red de poros del concreto y reacciona con los constituyentes alcalinos del cemento, sobre todo con el hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})$ . Este proceso conduce a la formación de carbonatos cálcicos y alcalinos y a una reducción del valor del pH de la solución acuosa contenida en los poros, que resulta finalmente con un valor de pH cercano a la neutralidad. Similar fenómeno de reducción del pH se produce si el concreto está en contacto con agua en circulación o ligeramente ácida. En este caso el pH se reduce por un efecto de deslavado que lixivia todas las sales contenidas en los poros y en último extremo, puede provocar la desintegración del propio concreto.<sup>(65)</sup>

La profundidad de la capa superficial carbonatada o deslavada se llama profundidad de carbonatación y la reducción de su pH se hace visible por el cambio de color apropiado. Como indicador más adecuado se utiliza una disolución al 1% de fenolftaleína en alcohol etílico.<sup>(65)</sup>

Esta solución es incolora en pH inferiores a 8, para valores de pH superiores a 9.5 se torna de color rojo purpura; entre 8 y 9.5, el indicador forma una coloración del rosa al rojo-purpura, según evoluciona el pH desde 8 a 9.5.<sup>(65)</sup>

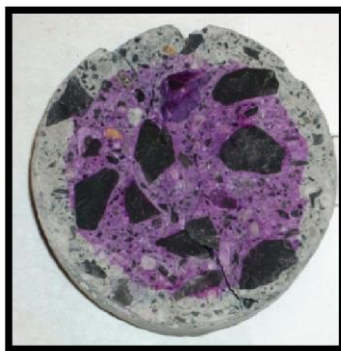


Fig. 60. Frente de carbonatación típico en el concreto medido con fenolftaleína.

**Método:**

Los especímenes se expusieron a una cámara de carbonatación acelerada, con un porcentaje de 4% de CO<sub>2</sub>, con una humedad relativa de 10 %, y la determinación se debe realizar sobre una porción de concreto. La medida se debe efectuar siempre sobre una fractura fresca, ya que las superficies se carbonatan rápidamente. Una vez obtenida la fractura perpendicular a la superficie del elemento de concreto, se le rocía una solución de fenolftaleína al 1%. Pasados 1 ó 2 minutos para que tome el color el indicador, se mide el espesor de la capa incolora con precisión de 0.5 mm. <sup>(65)</sup>



Fig. 61 Cámara de carbonatación acelerada y método de rociado de fenolftaleína para probetas de concreto

Si la línea de cambio es ondulada, se toman valores de máximo 10 puntos y se indica la media aritmética y la profundidad máxima. <sup>(65)</sup>

### **Criterios de valoración.**

La principal indicación que se pretende con esta medida es conocer si la carbonatación ha llegado o no hasta la armadura para poder establecer si ha provocado o contribuido al deterioro de una estructura. <sup>(65)</sup>

No todos los concretos se carbonatan a la misma velocidad, ya que ésta depende de numerosas variables, tales como: la proporción de cemento en el hormigón, la porosidad de éste, del tipo de cemento, la humedad ambiente, etc. De forma general, se acepta que la capa carbonatada es función de la raíz cuadrada del tiempo, según la ley<sup>(65)</sup>:

$$X = K\sqrt{t} \quad (7)$$

dónde: X = capa carbonatada

t= tiempo

K= constante

El valor de K se puede determinar si se conoce el grosor de la capa carbonatada y la edad del concreto y una vez conocida K, se puede predecir la velocidad de avance de la capa carbonatada y, por lo tanto, el tiempo que tardará en llegar hasta el acero de la armadura si no ha alcanzado el momento de realizar la inspección. <sup>(65)</sup>

## 4.8 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

El microscopio electrónico de barrido (MEB) o (SEM) (Scanning Electron Microscope) por sus siglas en inglés, es aquel que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Tiene gran profundidad de campo, que permite enfocara la vez una gran parte de la muestra. También produce imágenes de alta resolución, lo cual significa que características especialmente cercanas en la muestra pueden ser examinadas con una alta magnificación. La preparación de las muestras es relativamente fácil pues la mayoría sólo requieren que sean conductoras. En el Microscopio electrónico de barrido la muestra se recubre con una capa de carbón o una capa delgada de un metal como el oro, para darle propiedades conductoras a la muestra. Posteriormente, es barrida con los electrones acelerados, que viajan a través del cañón. Un detector mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de la muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones, proyectado en una imagen digital. Su resolución está entre 3 y 20 nm, dependiendo del microscopio. <sup>(6)</sup>



Fig.62 Microscopio electronico de barrido.





# **CAPÍTULO 5**

# **EXPERIMENTACIÓN**

## 5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

El objetivo de este trabajo fue evaluar la efectividad del curado interno mejorado, para así disminuir la difusión de agentes hacia el interior del concreto, por lo cual se propusieron 7 diferentes mezclas: 1 de referencia y otras 6 para evaluar el efecto del curado interno mejorado con y sin ceniza volante.

### 5.1.1 DISEÑO DE LAS MEZCLAS

En esta etapa se produjeron las mezclas que se describen en la tabla No. 8:

Tabla No.8 Especificación de las mezclas de concreto

MEZCLAS		
Mezcla	Identificación	Descripción
I	R	Mezcla de referencia en la que el 100% de los agregados con calizos de peso normal.
II	CI	Mezcla con curado interno convencional con agua, en la que el curado interno se administró sustituyendo 20% en volumen del agregado de peso normal por arena pumicitica ligera.
III	ARC	Mezcla de referencia(R), con aditivo reductor de la contracción dosificada de manera convencional con el agua de mezcla.
IV	CI + ARC	Mezcla con curado interno convencional CI, con aditivo de la contracción dosificado de manera convencional con el agua de mezcla.
V	V	Mezcla con curado interno mejorado (tecnología VERDiCT). Esta mezcla es similar a la mezcla de CI con la diferencia de que en esta mezcla el agregado ligero se saturó con una solución acuosa de agua del fluido y aditivo reductor de la contracción en proporción 1:1 con volumen.
VI	CV	Mezcla de referencia con una sustitución del 20% en masa de ceniza volante por cemento portland.
VII	V + CV	Mezcla V con una sustitución del 20% en masa de ceniza volante por cemento pórtland.

Tabla No.9 Programa para la caracterización de las propiedades mecánicas, elásticas y de durabilidad en las 7 mezclas de concretos.

Pruebas	Edad en días					Numero de muestras
	14d	28d	56d	90d	180d	
I. Resistencia a la compresión, a 4 edades de acuerdo a ASTM C 39	✓	✓		✓	✓	112 Cilindros D=10 cm H= 20 cm 4 por edad
II. Módulo de elasticidad a 2 edades de acuerdo a ASTM C 469		✓		✓		28 Cilindros D=7.5 H=15 14 por edad
III. Permeabilidad abierta al agua a 3 edades de acuerdo ASTM C 642		✓		✓	✓	63 Cilindros D=10 cm H= 20 cm 3 por edad
IV. Carbonatación acelerada a 5 edades, procedimiento interno.	✓	✓	✓	✓	✓	20 Cilindros D=7.5 H=15 3 por edad
V. Determinación de la difusión de cloruros , a 180 días de edad según ASTM C 1556					✓	21 Cilindros D=10 cm H= 20 cm 3 por edad
IV. Permeabilidad rápida a los cloruro, 3 edades, ASTM C 1202		✓		✓	✓	63 Cilindros D=10 cm H= 20 cm 3 por edad

## 5.2 PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES.

### 5.2.1 AGREGADO GRUESO.

En la figura 63 se puede observar la manera en que se caracterizaron los materiales utilizados para la elaboración de los concretos estudiados.



Fig. 63 Separación y tamizado del agregado grueso.



Fig.64 Procedimientos para obtener la humedad de la obra y el peso volumétrico.

Para obtener la humedad de obra (fig.64), se coloca el agregado ligero y el agregado fino en una bandeja de lámina a cierta temperatura para así poder eliminar el contenido de humedad de los agregados. Se determinó la densidad, absorción y el volumen desplazado del agregado ASTM C127 <sup>(48)</sup> como se muestra en la figura 65. <sup>(48)</sup>



Fig. 65 Determinación de absorción y volumen desplazado de los agregados

### 5.3 CONTENIDO DE SÓLIDOS EN LOS ADITIVOS UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DEL CONCRETO

El aditivo utilizado como reductor de alto rango (HRWR) fue el Glenium 30NS. Este es un aditivo fabricado con éter de policarboxilato. Se especifican en la ficha técnica del producto sus características, tales como: los tiempos de fraguado, la resistencia a la compresión, y las dosificaciones, que varían de acuerdo con el tipo de aplicación.

Máster Life SRA 20. Es un aditivo reductor de la contracción, en los datos proporcionados por el fabricante son que la dosificación va desde 1.0 a 2.5% de cementante: además, produce un incremento en la velocidad del sangrado (10%) mas. Un retraso en el tiempo de fraguado que depende de la dosificación y de la temperatura. El contenido de sólidos en los aditivos, tanto para los superfluidificantes como para los reductores de la contracción, consistió en colocar el aditivo sobre una lata de aluminio, que se colocó dentro del horno, a una temperatura de 100°C para determinar el contenido de humedad y el contenido de sólidos en la solución.



Fig. 66 Procedimientos para obtener los contenidos de sólidos den los aditivos.

Tabla No.10. Contenido de sólidos en los aditivos.

<b>Contenido de sólidos de los aditivos</b>	
<b>Aditivo reductor de contracción</b>	
Porcentaje de sólidos ARC	72%
<b>Aditivo superfluidificante</b>	
Porcentaje en sólidos SF	21%

## 5.4 PREPARACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Se elaboraron diferentes especímenes para la realización de las pruebas que permitan evaluar la calidad y las características entre las distintas mezclas. (ver figura 67)

- Para los especímenes que se sometieron a las pruebas de durabilidad en la cámara de carbonatación acelerada, se elaboraron cilindros (a) de 7.5 cm de diámetro por 15 cm. de altura.
- Para especímenes sometidos a pruebas mecánicas y elásticas de Módulo de elasticidad, se elaboraron cilindros (b) de 10 cm. de diámetro por 20 cm de altura.

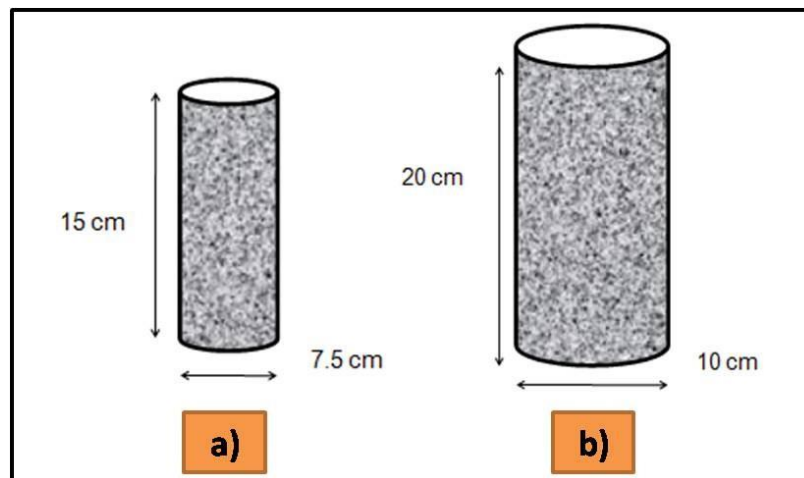


Fig. 67 Tipos de cilindros que se elaboraron para las distintas pruebas.

## 5.5 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LAS MEZCLAS.

Antes de comenzar la fabricación del concreto se prepararon los recipientes donde se iba a vaciar el concreto. La preparación consistió en engrasar los recipientes para tener mayor facilidad, al momento de desmoldar los cilindros. (Ver figura 68)



Fig. 68 Moldes metálicos para vaciar el concreto.

Se utilizó una máquina revolvedora convencional para la mezcla de los materiales con capacidad de 95 litros de concreto. (fig. 69)



Fig. 69 Máquina revolvedora utilizada para producir el concreto

En la figura 70 se puede observar la cohesividad del concreto, esta imagen pertenece a la mezcla de referencia, en cuanto se le fue suministrando el agregado ligero y los aditivos ASF – ARC, mejoró la trabajabilidad, el mezclado se hizo según la norma ASTM C94.





Fig. 70 Mezclado del concreto de referencia donde se observa la cohesividad de la pasta.

Para su posterior vaciado de la mezcla se utilizó una carretilla para el transporte de la mezcla al laboratorio en un cuarto de curado para mantener al concreto en las temperaturas óptimas de laboratorio y que no se hubiera sido afectada por la temperatura del medio ambiente.

En la figura 71 se muestra la mezcla de concreto con curado interno mejorado (tecnología VERDiCT).



Fig.71 Transportación del concreto

Para lograr una buena compactación se siguió la norma ASTM C 31 para el llenado de los cilindros de 10cm x 20cm. (Ver Fig.72)





Fig.72 Compactación del concreto durante la fabricación de los cilindros.

Los cilindros se fabricaron de acuerdo con el procedimiento descrito en ASTM C 31. (Ver fig.73)



Fig.73 Especímenes cilíndricos después del acabado final.

## 5.6 PRUEBAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.

### 5.6.1 DENSIDAD (MASA ESPECÍFICA) Y VOLUMEN PRODUCIDO DE CONCRETO Y CONTENIDO DE AIRE, ASTM C138. <sup>(50)</sup>

La determinación de la masa específica y el volumen producido de concreto y el contenido de aire se obtuvo mediante lo descrito en la norma ASTM C138. <sup>(50)</sup>



Fig.74 Llenado y enrasado para determinar posteriormente su masa

Tabla No. 11. Peso volumétrico de los concretos.

Nomenclatura	Peso volumétrico kg/m <sup>3</sup>
<b>R</b>	2,400
<b>CI</b>	2,310
<b>ARC</b>	2,410
<b>CI +ARC</b>	2,310
<b>V</b>	2,290
<b>CV</b>	2,350
<b>CV + V</b>	2,260

El peso volumétrico del agregado tiene influencia en el peso volumétrico del concreto. Esto se observa en los resultados obtenidos, ya que las mezclas en las que se incorporó el CI a través del AL, presentaron valores menores que las mezclas que contienen sólo agregado calizo de peso normal.

### 5.6.2 MÉTODO DE PRUEBA NORMALIZADA PARA DETERMINAR EL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO ELABORADO CON CEMENTO HIDRÁULICO. ASTM C 143.<sup>(60)</sup>

Para la prueba de revenimiento y los materiales utilizados se siguió la norma ASTM C 143.<sup>(60)</sup>



Fig.75 Revenimiento del concreto en estado fresco.

En la siguiente tabla, No.12, se muestran los valores obtenidos en la experimentación con los diferentes tipos de mezclas para la elaboración de las variaciones de concretos.

Agregar el aditivo reductor de la contracción no afecta significativamente el revenimiento en la mezcla de referencia y en los concretos donde se utilizó curado interno convencional; sin embargo, el ARC afecta la tensión superficial del agua, según por lo que el revenimiento se vio modificado en las mezclas donde se utilizó el curado interno mejorado. Posiblemente por una absorción – desorción no controlada en el agregado ligero, cuando éste se saturó en la solución acuosa.

**5.6.3 MÉTODO DE PRUEBA NORMALIZADA PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE AIRE DEL CONCRETO RECIÉN MEZCLADO POR EL MÉTODO VOLUMÉTRICO ASTM C 173.**

En la figura 76 se muestra el instrumento de laboratorio utilizado en la prueba estandarizada para determinar el contenido de aire, por el método volumétrico.

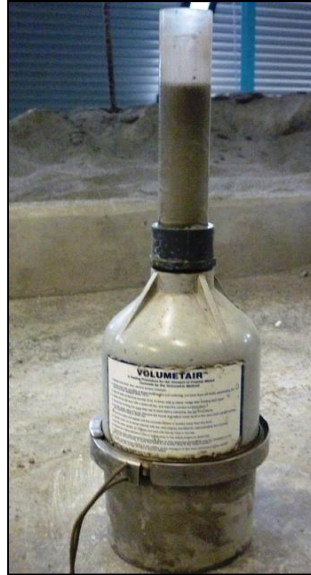


Fig.76 Prueba de contenido de aire por el método volumétrico.

Tabla No.12 Contenido de aire y revenimiento de los concretos elaborados.

Nomenclatura	Contenido de aire	Revenimiento (cm)
<b>R</b>	2.75	13.5
<b>CI</b>	2.25	13.0
<b>ARC</b>	2.25	14.0
<b>CI +ARC</b>	2.25	14.5
<b>V</b>	2.50	16.5
<b>CV</b>	2.50	16.0
<b>V + CV</b>	2.50	21.0

Los resultados del contenido de aire no reflejan incremento o disminución atribuible a las tecnologías estudiadas. Las variaciones entre las mezclas estudiadas son relativamente pequeñas y sugieren congruencia entre los resultados. Los resultados son ligeramente superiores al promedio de aire atrapado que sugiere el ACI 211 para concreto, con un tamaño máximo de agregado de 20 mm, el cual es el 2%.

## 5.7 EXPERIMENTACIÓN PARA LAS PRUEBAS DE DURABILIDAD EN ESTADO ENDURECIDO

### 5.7.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD

Para todos los concretos elaborados se fabricaron especímenes para el ensaye mecánico a compresión. Para el cabeceo de los cilindros se utilizó el procedimiento descrito en la norma ASTM C 617<sup>(67)</sup> y para la prueba de resistencia a la compresión se basó en la norma ASTM C 39<sup>(68)</sup> En la figura 77, se describen los pasos a seguir tanto para el cabeceo como para los ensayos mecánicos.

Después de retirar del cuarto de curado los cilindros, se procedió a cabecearlos para tener una superficie plana en las partes superior e inferior del cilindro.



Fig. 77. Preparación del azufre para el cabeceo de los cilindros de concreto.



Fig.78. Ensaye mecánico a compresión en maquina universal.



### 5.7.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD

Para elaborar esta prueba se tomó de referencia la norma ASTM C469<sup>(68)</sup>, para lo cual se utilizó un marco con micrómetros digitales *marca mitutoyo*, para medir las deformaciones longitudinales.



Fig.79 Se toman las lecturas con el medidor *mitutoyo* en la maquina universal durante el ensaye.

Para este ensaye se utilizó la máquina de ensayos mecánicos de laboratorio marca ADR auto de ELE International con capacidad de 200 toneladas, para tomar la medición más precisa.



Fig.80 Máquina de ensayos mecánicos a compresión y medidor de la deformación longitudinal del concreto

### 5.7.3 POROSIDAD ABIERTA AL AGUA

Las rodajas de concreto deben cortadas de un cilindro de concreto de 10 cm x 20 cm y deben ser de 6 cms de espesor.



Fig.81 Secado al horno y sumersión del concreto en agua.

Se secó al horno a una temperatura de 60°C hasta peso constante y después se sumergieron en agua hasta peso constante para la medición de la absorción de agua a las diferentes edades.



Fig.82 Corte e identificación de las rodajas para su posterior uso.

#### 5.7.4 PERMEABILIDAD RÁPIDA A LOS IONES CLORURO

Al igual que en la prueba de ASTM C 642, se cortaron muestras con las mismas dimensiones para la prueba de durabilidad de permeabilidad rápida a los iones cloruro según ASTM C 1202.

En las siguientes figuras 83 y 84, se muestra el procedimiento de conexión en las celdas y los tipos de celdas utilizadas. ASTM C 1202<sup>(63)</sup>



Fig. 83 Preparación de los especímenes para la prueba de permeabilidad rápida a los iones cloruro.



Fig. 84 Verificación de las conexiones en las terminales correspondientes.



### 5.7.5 DIFUSIÓN DE IONES CLORURO - ASTM C 1556

En las siguientes figuras se muestra cómo se prepararon los especímenes y las soluciones para esta prueba según la norma ASMT C-1556.

*\*Los especímenes se expusieron a 40 días de inmersión como lo marca la norma.*



Fig. 85 Preparación de especímenes y solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .



Fig.86 Procedimiento interno para saturación de los especímenes con agua destilada.



Fig.87 Se sumergieron los especímenes en solución de  $\text{NaCl}$ .

Para extraer los cloruros se necesita desbastar hasta 4 profundidades, esto es en relación a la norma y dependiendo de la relación (a/c) según la norma ASTM C 1556<sup>(64)</sup>. El desbaste para la extracción de los polvos se hizo como se muestra en la siguiente figura 88:



Fig.88 Desbaste de los fragmentos expuestos a los cloruros

Para este fin se utilizó una fresadora o torno para el desbaste de la cara expuesta a los iones cloruro como se puede observar en las figuras 88 y 89. En esta prueba se obtuvieron polvos representativos, empezando de la cara expuesta y para cuatro profundidades, 1.016 mm, 3.048 mm, 7.112 mm y 8.128 mm.



Fig.89 Recolección de los polvos después del maquinado.

Cada mezcla el polvo que se logró recolectar se utilizó para determinar el contenido de cloruros en porcentaje; para la titulación de los cloruros se utilizó un procedimiento interno.

Posterior a este procedimiento, los segmentos se rociaron con Nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ), para determinar hasta dónde habían migrado los iones cloruro. En la figura 90 se puede observar cómo el avance fue más rápido en algunas mezclas. El área oscura denota la zona donde no penetraron los cloruros.

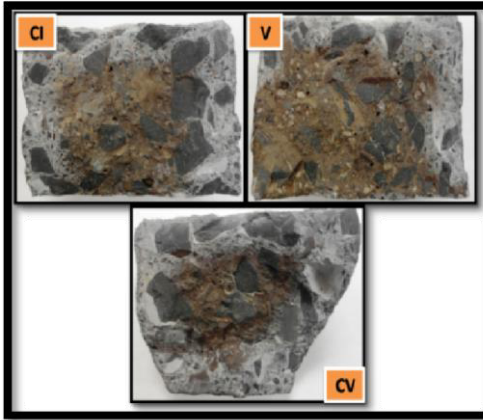


Fig. 90 Especímenes rociados con  $\text{AgNO}_3$  (nitrato de plata) en los cuales se puede observar el ingreso de los iones cloruro.

Procedimiento para la realización de la prueba de titulación de cloruros.

1. Identificar los frascos con datos de la muestra (Cada muestra se analizó por duplicado).



Fig. 91 Identificación de los frascos para titulación.

2. En una báscula analítica se pesaron de  $3.0000 \pm 0.0050$  de polvo colocando primero el frasco en la báscula y agregando el polvo).
3. Agregar 35 mL de agua destilada y agitar hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, verter la solución en un vaso de precipitados de 250 mL.



Fig. 92 Balanza analítica y equipo de agitación de las soluciones.

4. Introducir un agitador magnético en el vaso para el mezclado y colocar en la parrilla de agitación para agitarlo durante 10 minutos.
5. Verter nuevamente en un frasco de 125 ml y agregar 0.9 de ácido nítrico.
6. Para la interpretación de los datos se utilizó un titulador 848 titrino.



Fig.93 Titulador utilizado para la medición de los porcentajes de cloruros en los concretos a diferentes profundidades.



## 5.8 PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA EL ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).

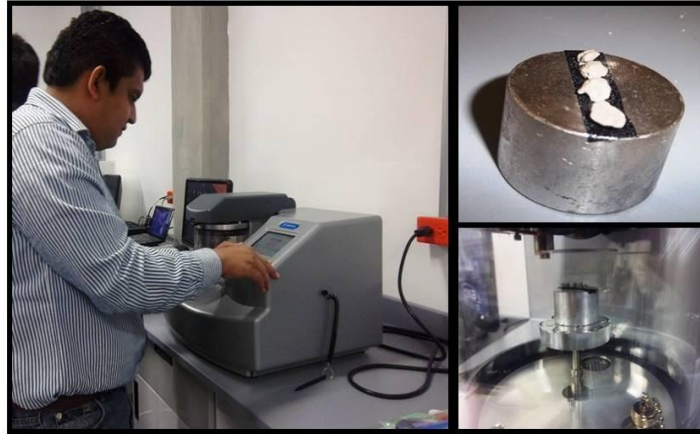


Fig. 94 Se recubrieron los materiales con una capa conductora de grafito para su observación en el MEB.

Se prepararon muestras de concretos y de AL para su análisis mediante la técnica de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para determinar cómo influye la microestructura con los fenómenos de hidratación y el comportamiento del agregado ligero dentro de los concretos en la matriz cementante.

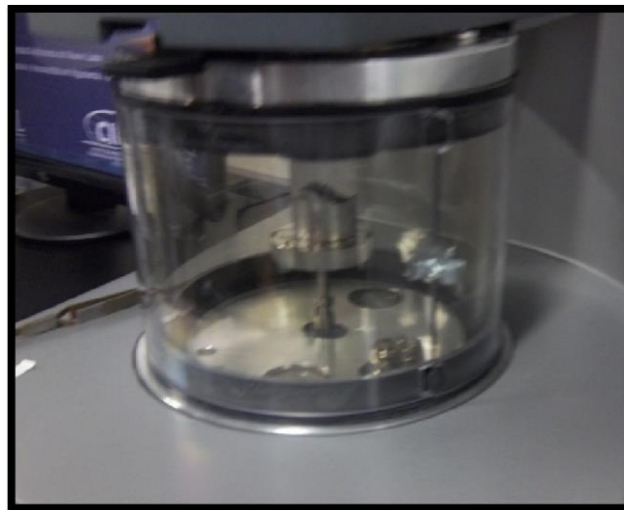


Fig. 95. Proceso de recubierta: capa conductora de grafito.

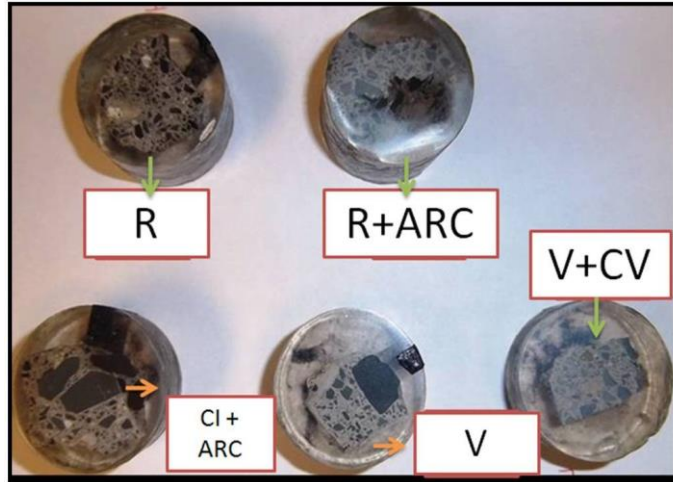


Fig. 96. Muestras sobre resina cristal, para su análisis en el MEB.



# **CAPÍTULO 6**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 6.1 Proporcionamientos

En la siguiente tabla, No. 13, se presentan las proporciones de los concretos estudiados, En todas las mezclas se mantuvo una relación a/c fija de 0.42. En las mezclas CV y V+CV en sustitución del cemento pórtland a razón de 20% en volumen.

Estas proporciones están dadas para una mezcla de 95 lts de concreto.

Tabla No. 13 proporciones de mezclas de los concretos estudiados

Materia Prima	Proporción por mezcla (Kg/m <sup>3</sup> )						
	R	CI	ARC	CI +ARC	V	CV	V + CV
Cemento CPO40	38,250	38,250	38,250	38,250	40,375	30,600	32,300
Ceniza volante						7,650	8,075
Agua de Reacción	15,375	13,843	15,436	13,633	16,229	15,433	16,598
Ag. Fino	88,991	70,351	88,294	69,938	93,935	87,714	74,295
Ag. Grueso	71,296	71,170	70,771	70,752	75,257	70,305	74,716
Ag. Ligero		13,088		13,011	11,203		
Glenium-3030 (SF)	102,128 g	149,940 g	102,128 g	149,940 g	158,270 g	103,128 g	158,270 g
As20 (ARC)			573,750 g	573,750 g	573,750 g		573,750 g



## 6.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

### 6.2.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La figura 97 muestra los resultados de resistencia a compresión para las 7 mezclas estudiadas. En esta gráfica se puede observar que todas muestran el mismo patrón de desarrollo de resistencia.

Tabla No. 14 Resistencia a compresión de los concretos elaborados

Resistencia a compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )							
Días	R	CI	ARC	CI +ARC	V	CV	V+ CV
14	432	354	370	390	384	343	314
28	540	500	467	445	433	398	353
90	535	506	491	482	475	476	437
180	548	515	509	484	481	485	442

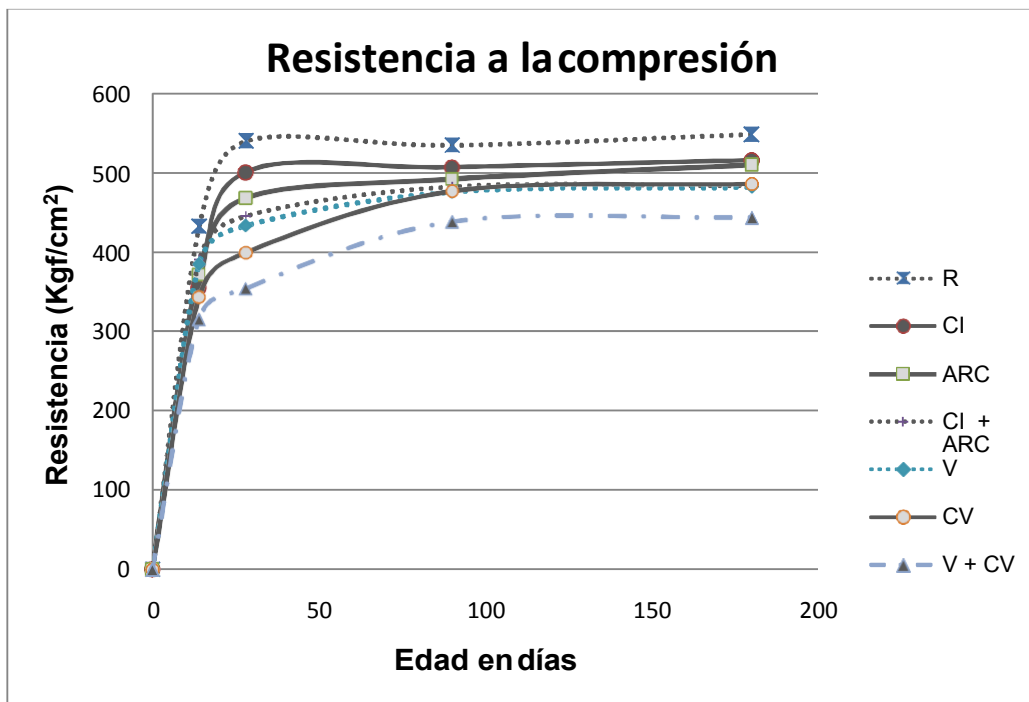


Fig. 97 Desarrollo de la resistencia a la compresión, hasta una edad de 180 días de edad.

La mezcla de referencia (R) presentó la máxima resistencia, a partir de los 28 días, manteniéndose prácticamente sin generar ganancia de resistencia hasta la edad de monitoreo.

La mezcla con la tecnología VERDiCT, presentó la máxima resistencia, a partir de los 28 días pero con resistencias inferiores a la mezcla de referencia (R), en 20%, 12% y 10% a los 28, 90 y 180 días, respectivamente.

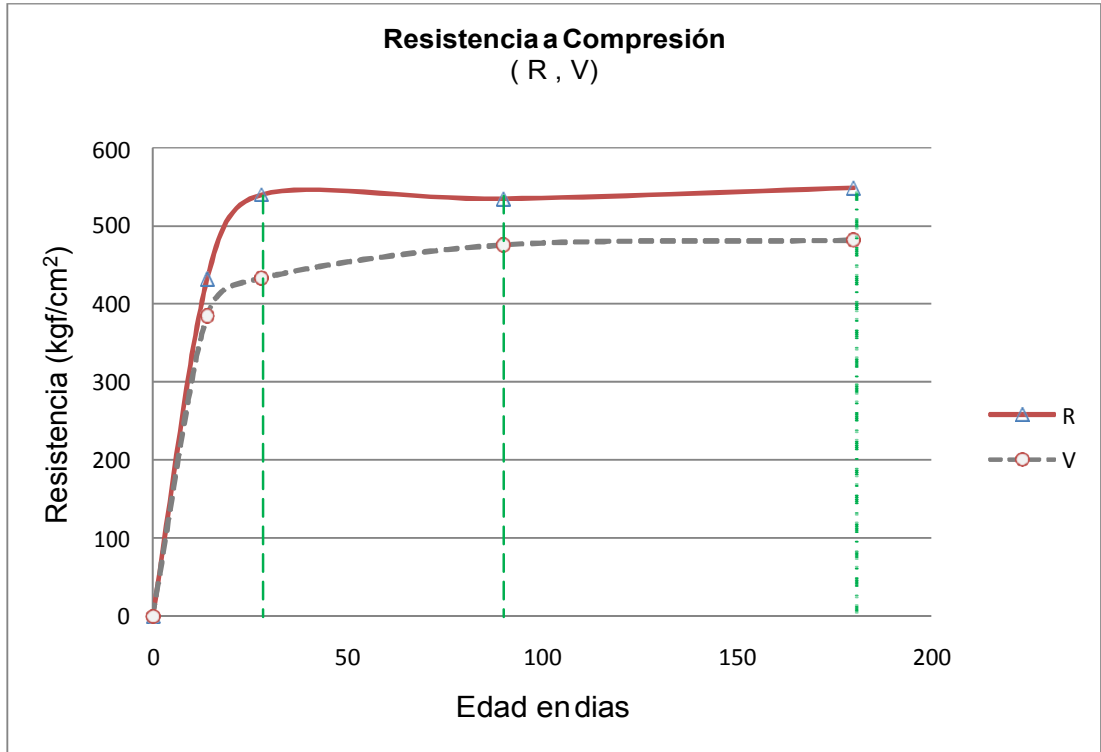


Fig. 98 Comparativa del desarrollo de la resistencia a la compresión en las mezclas R y V.

La mezcla con el curado interno convencional con agua presentó prácticamente el mismo desempeño que la mezcla de referencia, a partir de los 28 días y sin ganancia o pérdida significativa, a edades posteriores. En cuanto la mezcla CI presentó resistencias menores a las de la mezcla de referencia, las resistencias de la mezcla V también fueron menores, a las edades de 28, 90 y 180 días.

Este comportamiento se atribuye a que el aditivo ARC tiende a disminuir la resistencia mecánica, según la ficha técnica del fabricante .

En términos del desarrollo de la resistencia a la compresión, la adición de un aditivo reductor de la contracción (ARC) a la mezcla, en conjunto con el curado interno convencional (mezcla CI +ARC), ésta mostró prácticamente el mismo comportamiento que la mezcla (V) pero con resistencias inferiores a la mezcla (CI) en 11%, 5% y 3% a las edades de 28, 90 y 180 días, respectivamente.

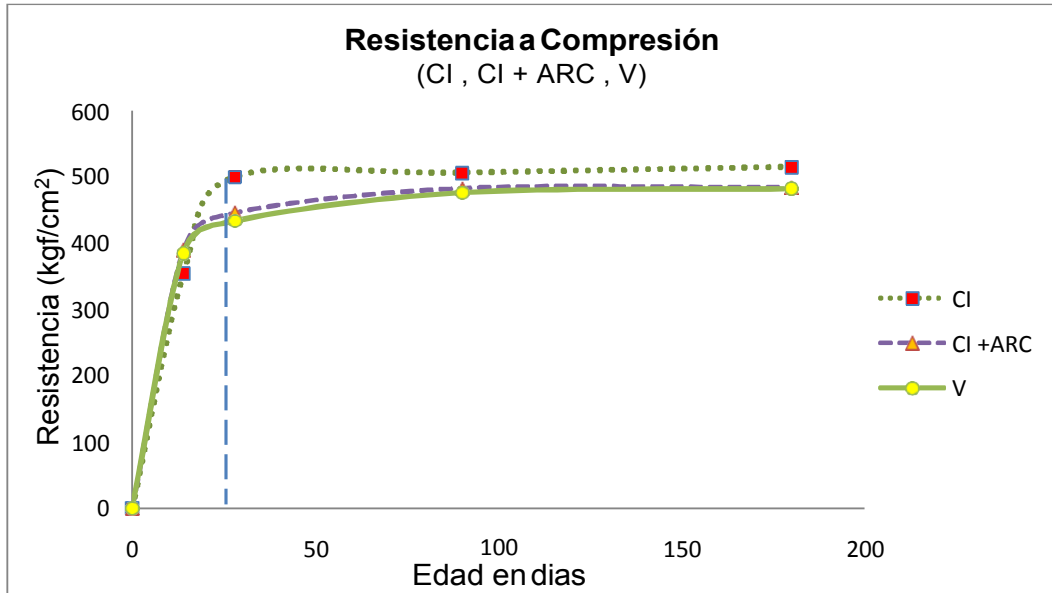


Fig. 99 Comparación del desarrollo de la resistencia a la compresión, en las mezclas CI, CI+ARC, V.

Con relación a la mezcla (R), la incorporación de ceniza volante a la mezcla de referencia, mezcla (CV) originó reducciones en resistencia a la compresión de 20% y 26%, a las edades de 14 y 28 días, respectivamente.

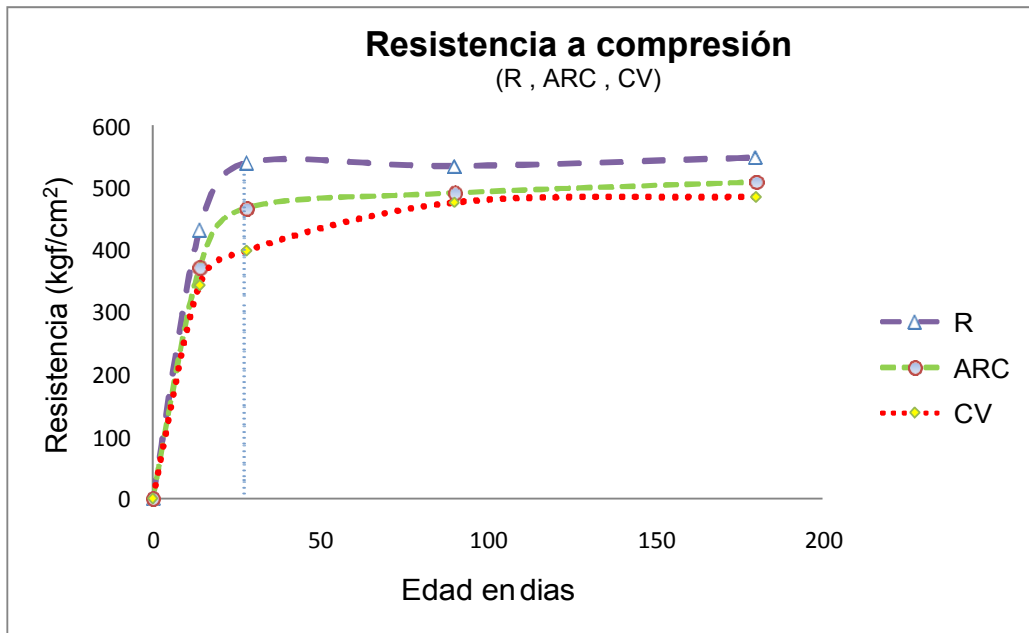


Fig. 100 Comparación del desarrollo de la resistencia a la compresión en las mezclas R, ARC y CV.

La incorporación de la tecnología VERDiCT a la mezcla adicionada con ceniza volante (mezcla V+ CV) condujo a las menores resistencias entre todas las mezclas estudiadas. Las mezclas R, ARC y CV, mantuvieron las mismas resistencias entre las edades de 28 y 90 días, con valores promedio de 538, 480 y 437 kgf/cm<sup>2</sup>, lo cual ilustra una reducción de 8% y 12% para las mezcla (R), respectivamente.

El la mezcla del concreto (V) adicionada con ceniza volante (V+CV) origina reducciones en la resistencia a la compresión en un 20% y 8% entre la mezcla (V) y la mezcla (V + CV) para las edades de 28, 90 y 180 días

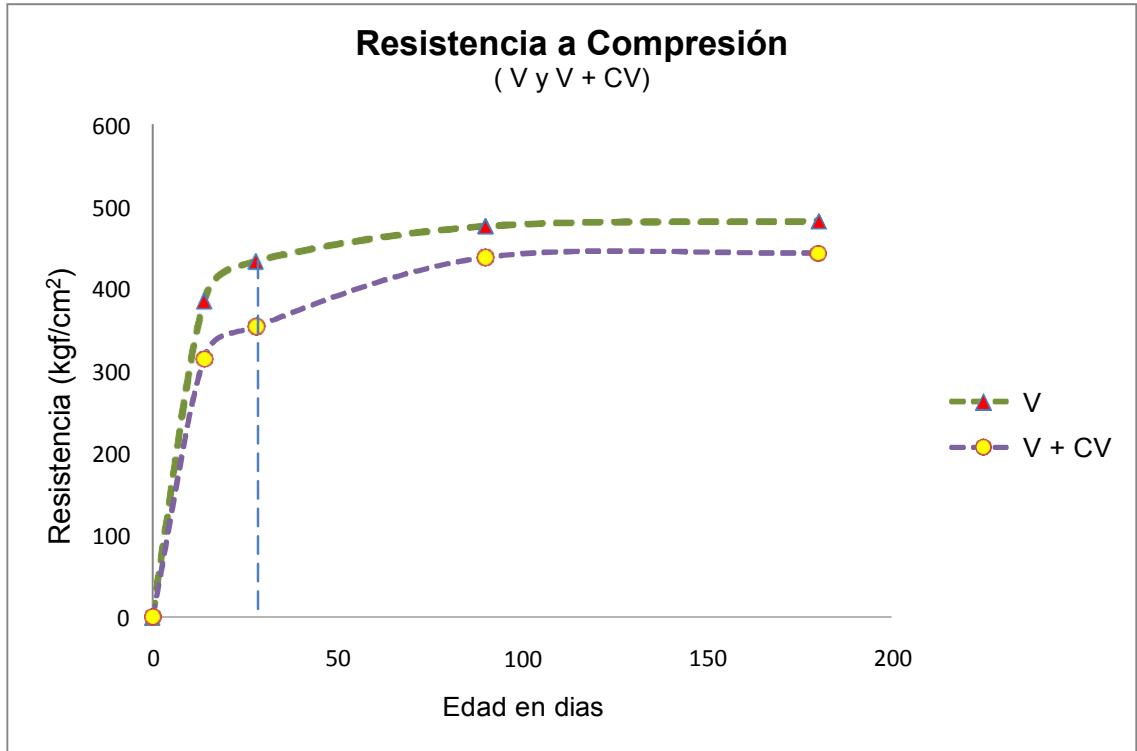


Fig. 101 Comparación del desarrollo de la resistencia a la compresión, en las mezclas V y V+CV.

Las reducciones en la resistencia a la compresión originada por la incorporación del aditivo ARC, son congruentes con lo reportado en la ficha técnica del producto.

### 6.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD.

El módulo de elasticidad es la pendiente de la recta secante obtenido del diagrama de esfuerzo contra la deformación, dentro del rango de elasticidad de cada uno de los concretos elaborados.

Tabla No. 15 Módulo de elasticidad a 28 y 90 días.

Módulo de elasticidad (GPa)		
MEZCLA	28 días	90 días
R	32.1	29.7
CI	28.4	26.1
ARC	29.3	29.1
CI + ARC	24.6	24.1
V	25.6	25.7
CV	29.4	27.6
V + CV	24.4	25.1

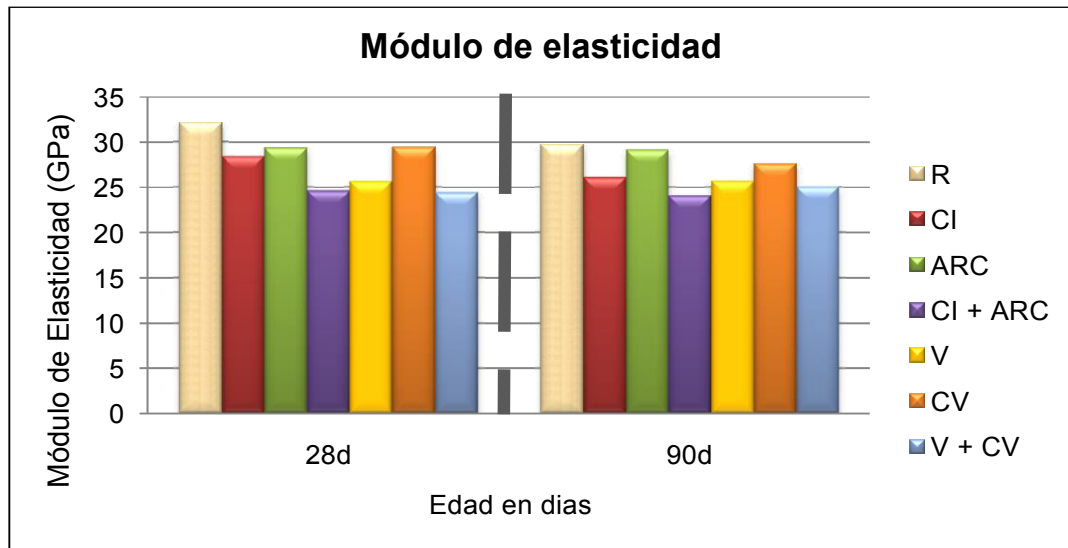


Fig. 102 Comparación del módulo de elasticidad de los concretos a 28 y 90 días.

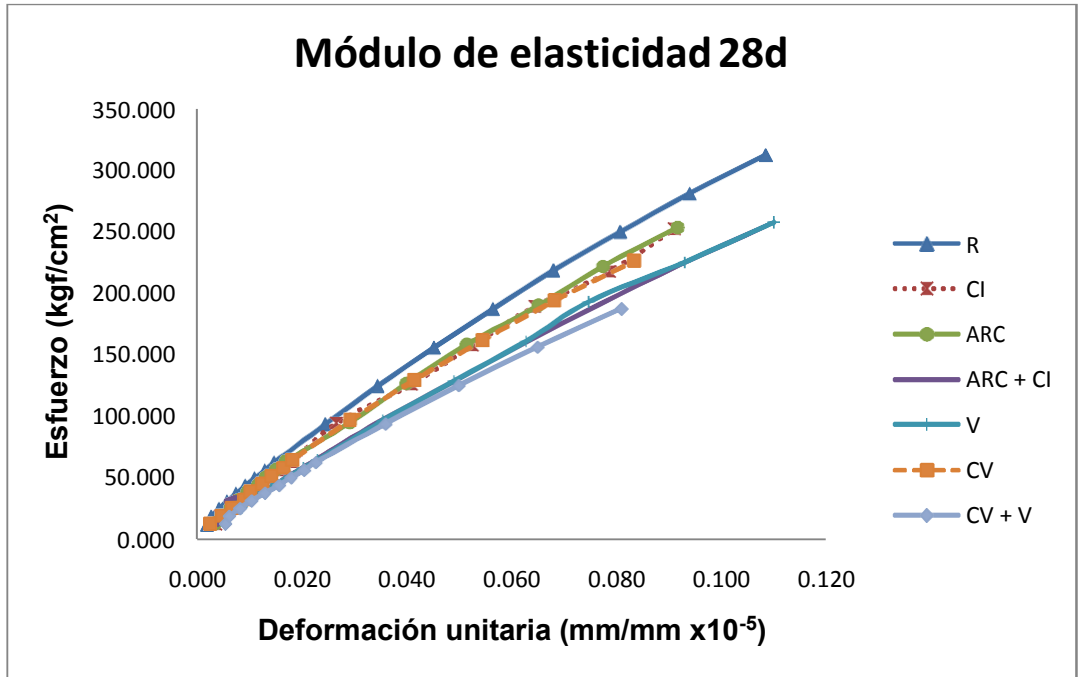


Fig. 103 Módulo de elasticidad a los 28 días.

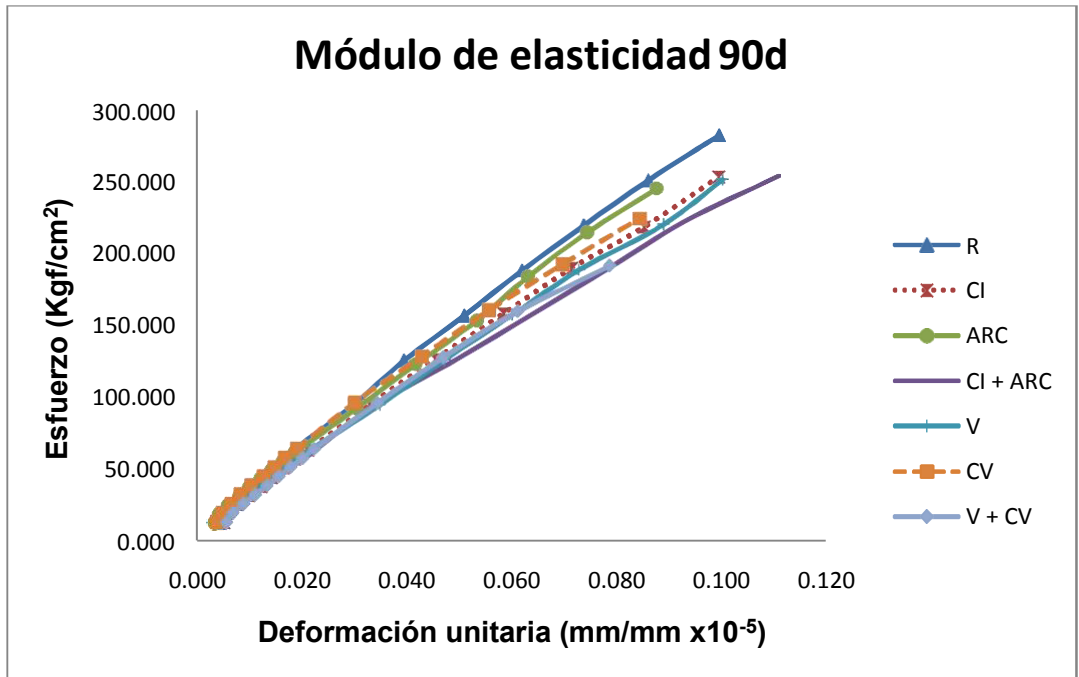


Fig. 104 Módulo de elasticidad a los 90 días.

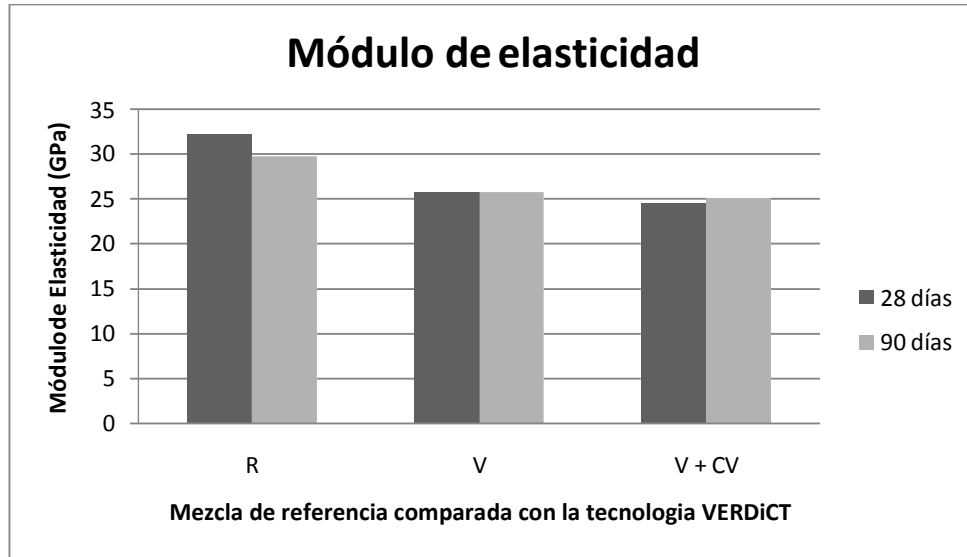


Fig. 105 Comparación de la mezcla de referencia, con las mezclas donde se utilizó la tecnología VERDiCT.

En la propiedad del módulo de elasticidad se puede observar en la gráfica una disminución de la rigidez en los resultados de la mezcla de referencia R, con respecto a la edad del concreto; lo que no es significativo y pudiese atribuirse a las variaciones entre los resultados individuales, de manera contraria a los concretos donde se utilizó la tecnología VERDiCT con (V +CV) y sin adición (V) de ceniza volante, la cual presentó un aumento en la rigidez. Esto se puede atribuir al uso de agregado ligero como promotor administrador del curado interno.

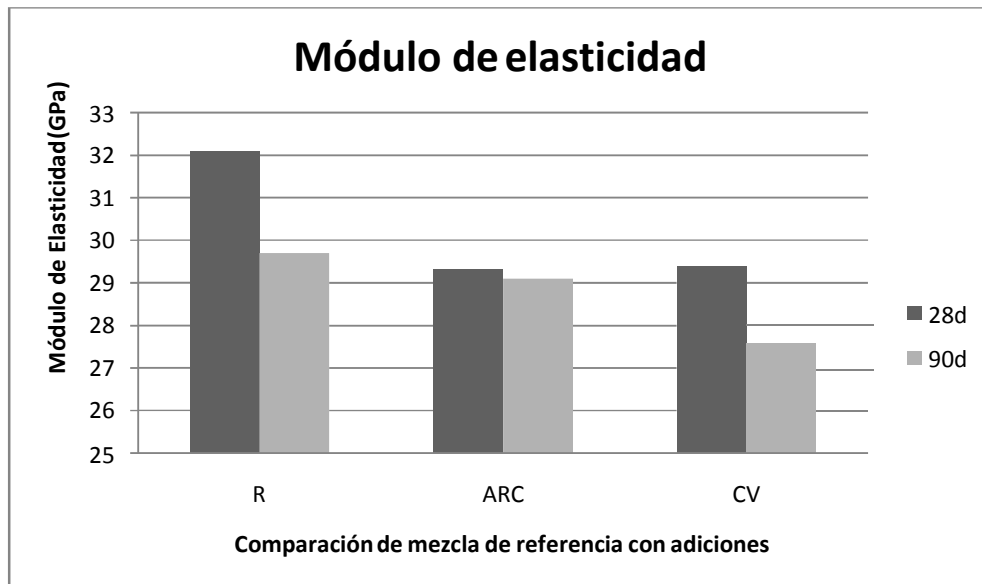


Fig. 106 Comparación de la mezcla de referencia con sus respectivas adiciones.



En la figura 106 la gráfica muestra que la mezcla de CV presenta un módulo de elasticidad menor que la mezcla R y que la mezcla ARC, aunque a 28 días la mezcla CV y la ARC presentan un módulo elástico similar y en cuanto a la mezcla CV presenta una mayor rigidez de 28 a 90 días. En el Módulo a los 90 días, el concreto con ARC muestra mayor rigidez, seguido del concreto CV; a su vez, éste relacionado con el concreto con de CI muestra menos rigidez que el concreto R y se puede concluir que el concreto con CI es más durable aunque pierda resistencia en correlación con el concreto de referencia R.

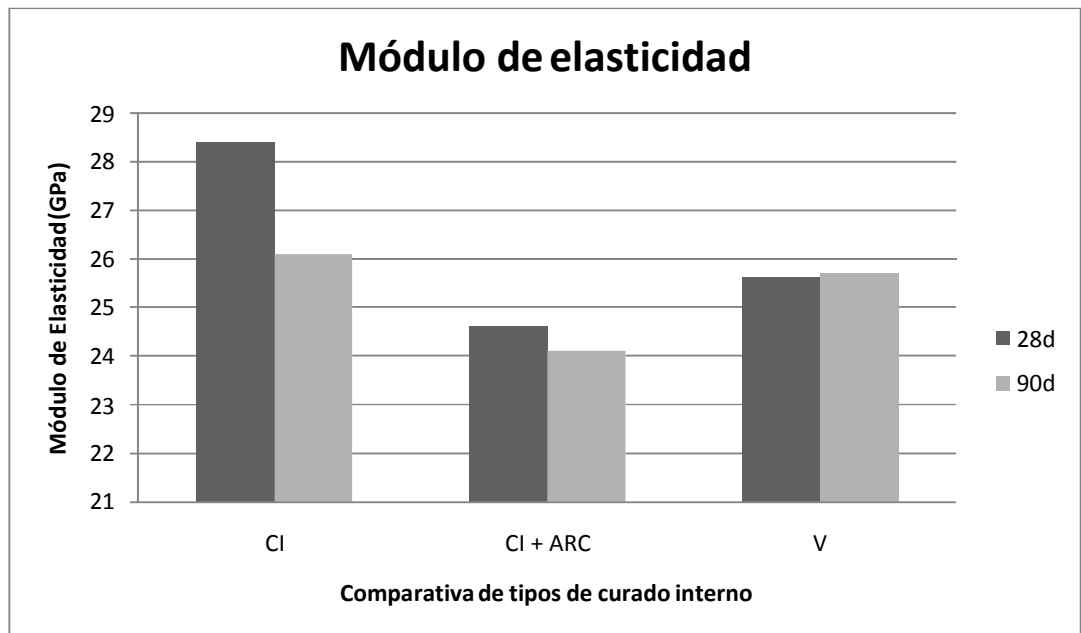


Fig. 107 Comparación del módulo de elasticidad en concretos con diferentes tipos de curado interno.

Como se aprecia en la figura 107, comparando la mezcla del CI vs CI +ARC se puede deducir que a la edad de 28 días la mezcla CI presenta un módulo elástico mayor y la mezcla de CI +ARC a los 28 días mostró un módulo elástico de 24.6 GPa y a los 90 días tuvo una reducción mínima de 24.1 GPa, donde la gráfica muestra que no hubo una variación notable. En mezcla donde se utilizó la tecnología VERDiCT, según la grafica, presentó un aumento en el módulo elástico con respecto a la mezcla donde se utilizó el curado interno convencional.

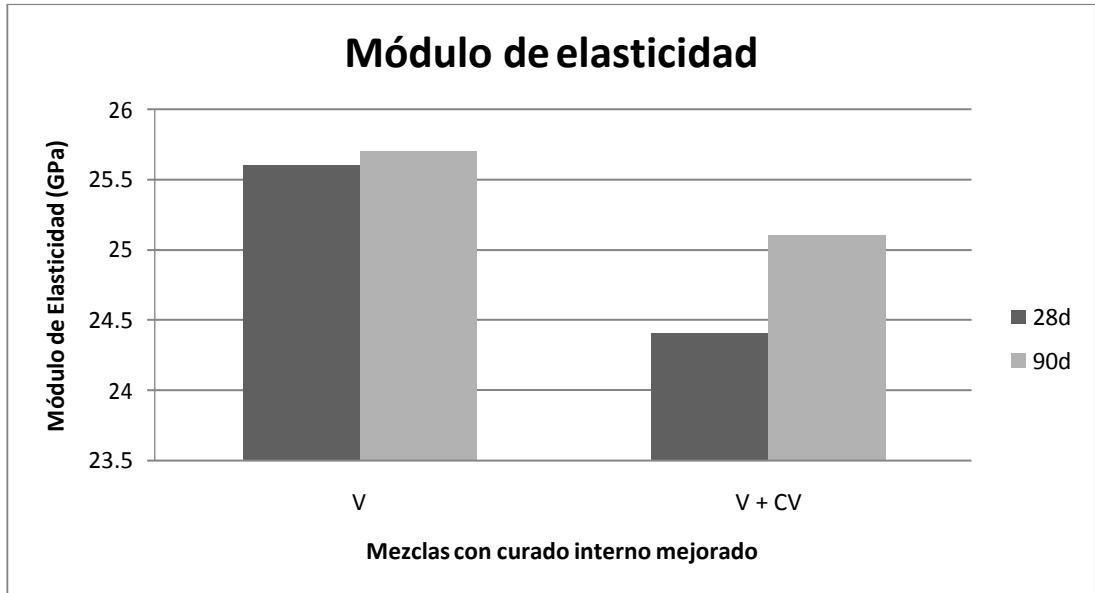


Fig. 108 Comparación de mezclas donde se utilizó el curado interno mejorado.

En la figura 108 se presenta una comparación del módulo elástico donde se utilizó el curado interno mejorado (V) y con su variante, adicionando ceniza volante, a la que se le llamó (V+CV). Se muestra un aumento en el módulo elástico de 28 a 90 días, donde la mezcla (V + CV) presentó un aumento de 24.4 GPa a 25.1 GPa. Se atribuye éste comportamiento a que el AL se embebió en el aditivo reductor de la contracción y éste provocó un notable endurecimiento del concreto, a sus diferentes edades y con esto un mayor modulo elástico.

Se le atribuye al ARC la nula activación de la CV. Esto lo hace más flexible por la mayor cantidad de matriz cementante sin hidratar.

En cuanto al concreto con curado interno mejorado (V), sí hubo un aumento pero no tan notorio como en la mezcla adicionada con ceniza volante, en la que se puede concluir que se mantuvo el módulo elástico.

Dentro del diseño de los concretos, por seguridad se diseña con una resistencia superior a las resistencias de trabajo; es decir, el concreto se trabaja del 30% al 40% de su capacidad, por lo tanto, el módulo elástico a los 28 días en las mezclas de concreto con AL presenta una mayor elasticidad y es menos rígidos que el concreto de referencia R.

Como sugerencia, un parámetro que pudiera ayudar a complementar esta información sería medir el flujo plástico (creep) en los concretos VERDiCT para ver la relación de rigidez con los demás concretos.

### 6.3 PERMEABILIDAD ASTM C- 642

En la fig. 109 se muestra la absorción de agua en porcentaje, después de la inmersión, basados en la norma internacional ASTM C 642.

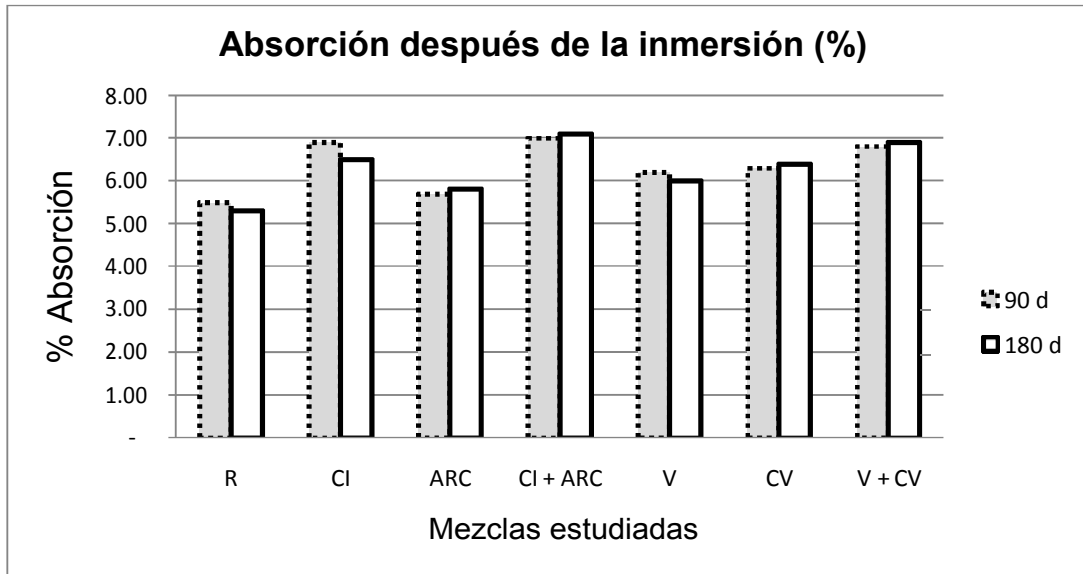


Fig.109 Absorción después de la inmersión.

En la misma figura se puede observar una disminución de absorción en las mezclas de CI y V; en lo cual se puede concluir que tiene gran influencia el curado interno y la tecnología VERDiCT, en correlación con las demás mezclas, debido a que el agua de desorción en el AL influye en la hidratación continua de los cementantes, a las diferentes edades. Cabe mencionar que las demás mezclas se mantienen similares en los porcentajes de absorción.

En los concretos donde se utilizó el curado interno mejorado (tecnología VERDiCT) se puede atribuir también a que también se usó el ARC como factor importante en la disminución de la absorción, al igual que los concretos con curado interno. Como se mencionó anteriormente dependen de la hidratación continua para la disminución de poros capilares que es donde se puede alojar el agua de absorción, como lo sugiere la norma ASTM C 642.

En la figura 110, se muestran los porcentajes de las edades a 28 y 90 días después de la inmersión y hervido; en las cuales se puede observar que en la mayoría de las mezclas disminuyó el porcentaje de absorción, debido a la hidratación continua, excepto en la mezcla del VERDiCT, que se mantuvo el mismo porcentaje de absorción, a sus respectivas edades, debido al uso del aditivo reductor de contracción.

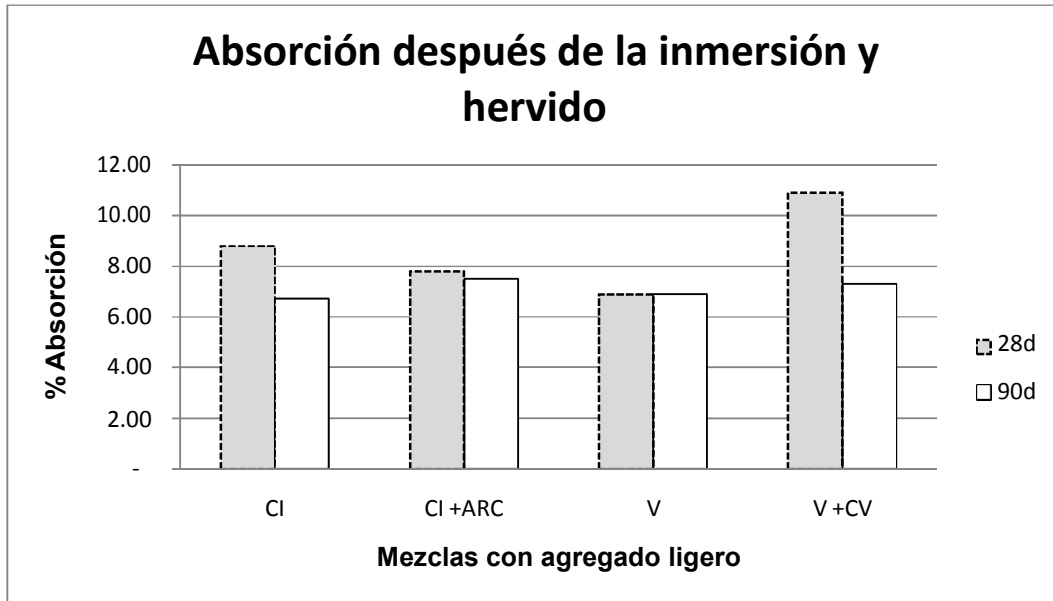


Fig.110 Absorción después de la inmersión, después de hervir los especímenes.

Como se describió en la experimentación, después de hervir los especímenes se sumergieron para obtener el peso suspendido de la muestra. Este valor nos daría el porcentaje de absorción después de la inmersión, con ayuda de los porcentajes de la figura 110 podemos concluir que, en la mayoría de los concretos hubo una disminución del porcentaje de absorción, haciéndose más notoria la disminución en la mezcla en que se utilizó el curado interno mejorado (VERDiCT) y CV; por lo cual, se puede atribuir este fenómeno a que la ceniza volante reaccionó de forma tardía, pero cumpliendo el objetivo de densificar la matriz cemento en el concreto.

Tabla No. 16: Porcentaje de vacíos en las edades de 28,90 y 180 días

	Vacíos Permeables (%)		
	28d	90d	180d
R	19.3	13.8	12.1
CI	16.6	14.4	13.7
ARC	13.5	12.5	12.5
CI +ARC	16.6	16.3	14.7
V	16.5	15.2	<u>10.2</u>
CV	15.4	14.4	14.1
V + CV	19.9	19	15.6

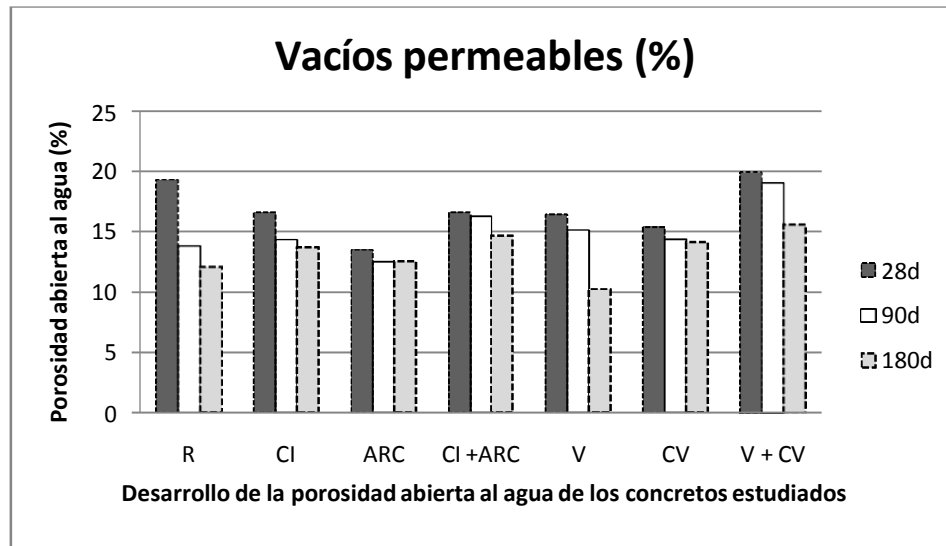


Fig.111 Porcentaje de vacíos permeables en los concretos.

Los valores del volumen aparente y la densidad aparente sirven para demostrar el total del porcentaje de vacios totales en los especimenes de los diferentes tipos de concretos, en los que se pueden ver como referencia las mezclas de curado interno, el curado interno mejorado (VERDiCT) y el curado interno mejorado adicionado con ceniza volante, en sustitución en masa de CPO por CV. En esta última mezcla se notó una disminución de los vacíos totales, debida a la hidratación continua y a la acción puzolánica de la ceniza volante, junto con el buen desempeño del ARC.

La tendencia a disminuir el volumen de los vacíos permeables, permite deducir que la mezcla de CV se mantiene constante, hasta que comenzó a reaccionar la CV; ya que formó productos de hidratación, que propiciaron a la disminución del contenido de los vacíos permeables.

En cuanto a los concretos de curado interno mejorado (VERDiCT) éstos tienden a disminuir los vacíos al igual que los concretos ARC y el concreto V+CV, debido a la interacción del agregado ligero y el ARC junto con la activación puzolánica de la ceniza volante a edades tardías.

Los otros concretos tienden a disminuir los vacíos conforme pasa la edad de cada una. Cabe mencionar que las mezclas de CI, la mezcla con ARC y mezcla de curado interno mejorado (VERDiCT) tienen un comportamiento similar conforme pasa la edad del concreto.

### 6.4 PERMEABILIDAD A LOS IONES CLORURO.

Esta técnica consiste en inducir una corriente eléctrica a una solución alcalina de cloruro de sodio (NaCl). Ésta corriente eléctrica propicia que los electrones migren a través del espécimen de concreto, midiendo la carga resultante de penetración, la cual se reporta como la permeabilidad a los iones cloruro.

Tabla No. 17 Carga transmitida a través de los concretos.

Carga transmitida en (C)							
Edad	R	CI	ARC	CI +ARC	V	CV	V+CV
28D	3767	3543	3441	3405	2601	2867	2483
90D	3368	2960	2926	2556	1338	1965	945
180D	3859	2779	1898	1713	945	1616	673

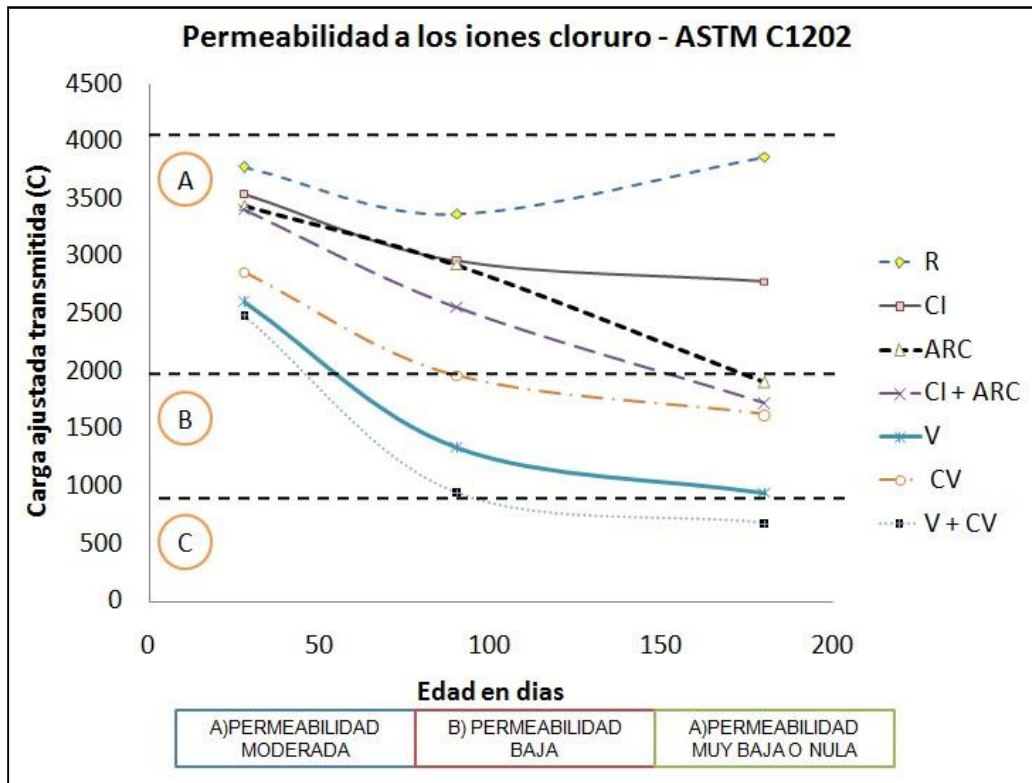


Fig.112 Desarrollo de la permeabilidad a los iones cloruro.



A la edad de 28 días, las permeabilidades obtenidas se hallaron en un rango de 2500 a 3750 Coulomb, mismo que se mantiene en cuanto al comportamiento de las mezclas estudiadas y se amplía de manera significativa a la edad de 180 días; lo que resulta ventajoso para la evaluación de los resultados, ya que contrasta de manera más clara las diferencias entre las mezclas analizadas.

Estos resultados demuestran el beneficio de la tecnología VERDiCT para mejorar la permeabilidad del concreto a los iones cloruro, ya que originó que el concreto pasara de una permeabilidad moderada a una permeabilidad muy baja o nula, en un lapso de 152 días.

### **ARC vs R vs CI**

En esta comparación se observaron que el aditivo ARC dosificado directamente en la mezcla condujo a una reducción de 400 Coulomb, con relación a la mezcla de referencia R, que presentó un desempeño similar al de la mezcla CI, entre las edades de 28 y 90 días; el que a partir de los 90 días tendió a mejorar, conduciendo al concreto a una permeabilidad mejorada clasificada como baja, de acuerdo con la ASTM C1202, lo que representa una reducción de carga transmitida a través del espécimen con respecto a la mezcla del CI.

### **ARC vs V**

En esta comparación se pudo observar que la tecnología VERDiCT exhibió mejoras significativas a los 28 días de edad, con reducciones del 15%; beneficio que se mantuvo hasta la edad de 180 días, presentando una reducción de 25%; lo que resulta muy significativo, ya que esta tecnología condujo a que este concreto pasara en este periodo de una permeabilidad moderada a una permeabilidad muy baja o nula, de acuerdo con la norma ASTM C1202.

### **CI + ARC vs R vs CI vs ARC**

En esta comparación se observó que el efecto sinérgico del curado interno convencional con agua CI, en conjunto con el aditivo reductor de la contracción dosificado directamente en la mezcla (CI + ARC), condujo a una reducción de carga transmitida en 1066 Coulomb, a los 180 días con relación a la mezcla del CI. La mezcla R a esta misma edad presentó 3859 Coulomb; 2793 Coulomb más que la mezcla CI + ARC, lo cual esta tecnología refleja una mejora producto de la sinergia implementada en esta mezcla.

### **CI + ARC vs V**

Esta comparación ilustró que la tecnología VERDiCT origina mejores beneficios, ya que la reducción de la permeabilidad osciló entre 1300 Coulomb para la edad de 180 días. Esto beneficia una permeabilidad muy baja o nula, de acuerdo con la norma ASTM C1202.

### **CV vs R**

En la gráfica se observa que la ceniza volante originó reducciones significativas en la permeabilidad a los iones cloruro, que oscilaron en aproximadamente un 50% en reducción de carga transmitida a la edad de 180 días entre la mezcla CV y la mezcla R, siendo más resistiva la mezcla CV con una carga transmitida de 1616 Coulomb, lo cual se atribuye a un mayor nivel de densificación de la matriz cementante que se originó por la reacción puzolánica y el efecto filler de la ceniza volante.

### **CV vs V**

La ceniza volante presentó un comportamiento muy similar al VERDiCT; sin embargo los beneficios que refleja la tecnología VERDiCT son mayores, un 10% y 45% menos de carga pasada que la mezcla CV a los 28 y 180 días de edad, a pesar de que las diferencias entre los valores numéricos pudiesen presentarse muy altos, la grafica presenta desempeños muy similares entre la mezcla con la tecnología del curado interno mejorado y para la mezcla CV.

**V+CV vs V**

Para los rangos de los valores obtenidos para todas las mezclas, esta comparación muestra un mejor desempeño para la mezcla V+CV, con reducciones moderadas, ya que la tendencia disminuyó de la edad de 28 a 180 días, a una carga transmitida al espécimen de 2483 a 673 Coulomb. Esta mezcla fue la más resistente al paso de la corriente eléctrica, debido al curado interno mejorado (V) y a la acción puzolánica de la ceniza volante. Esta adición del cementante suplementario hace más resistente al concreto al paso de la corriente eléctrica. Los concretos donde se registraron valores con cargas eléctricas por debajo de 1000 Coulomb mostraron una permeabilidad casi nula, según la norma ASTM C1202.

Tabla. No. 18 Clase de permeabilidad en los concretos expuestos a los iones cloruros.

<b>Coulums</b>	<b>clase de permeabilidad</b>	<b>tipico de</b>
> 4000	Alta	a/c > 0.5
<b><u>4000-2000</u></b>	<b><u>Moderada</u></b>	<b><u>a/c &gt; 0.4 a 0.5</u></b>
2000-1000	Baja	a/c < 0.4
1000-100	Muy baja	concreto modificado con látex
< 100	insignificante	concreto polimérico
a/c = relación agua cemento		

## 6.5 DIFUSIÓN A LOS IONES CLORURO ASTM C-1556

Para esta prueba se obtuvieron los porcentajes de peso de cemento descritos en la tabla No. 19, mostrando un comportamiento difusivo similar entre los concretos elaborados; sin embargo, se puede observar que la mezcla V+CV es más propensa a difundir con facilidad los iones cloruro, probablemente debido a que el aditivo inhibió la acción puzolánica de la ceniza volante.

Tabla No.19 Porcentaje de cloruros en los concretos expuestos.

Porcentaje de cloruros en concretos (%)							
Profundidad (mm)	R	CI	ARC	CI + ARC	V	CV	V + CV
1.016	2.7	3.1	2.3	3.4	3.2	2.9	4.0
3.048	1.5	1.3	1.1	1.2	1.4	1.2	2.2
7.112	0.7	0.5	0.6	0.7	0.4	0.8	0.9
8.128	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.4	0.4

En la figura 113, Se muestra el comportamiento difusivo en cuanto a la profundidad de penetración en las mezclas estudiadas.

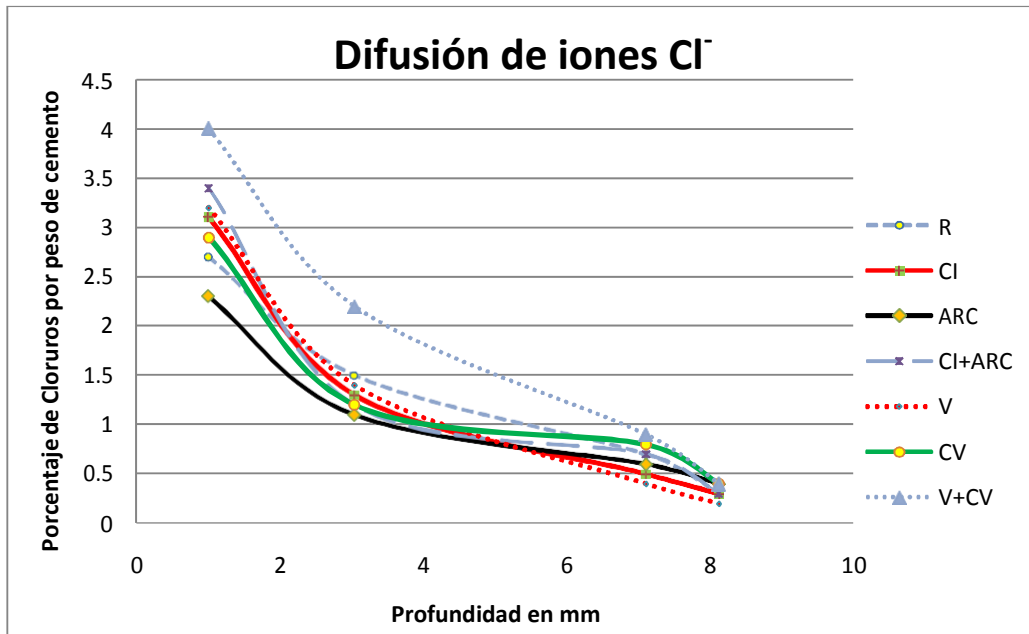


Fig.113 Difusión de los iones cloro a los 90 días de edad.

Para evaluar el desempeño de cada tipo de concreto, se determinó el coeficiente de difusión en todas las mezclas, siendo este parámetro un factor determinante para comparar el comportamiento difusivo de los iones cloruro. El cálculo para determinar el coeficiente de difusión parte de la segunda ley de Fick, de difusividad.

Tabla No. 20 Coeficientes de difusión de iones cloruro calculados.

Coeficiente de difusión de iones cloruro (m <sup>2</sup> /s)	
R	3.778 X10 <sup>-12</sup>
CI	1.998 X10 <sup>-12</sup>
ARC	4.034 X10 <sup>-12</sup>
CI + ARC	1.359 X10 <sup>-12</sup>
V	1.771 X10 <sup>-12</sup>
CV	3.511 X10 <sup>-12</sup>
V + CV	3.389 X10 <sup>-12</sup>

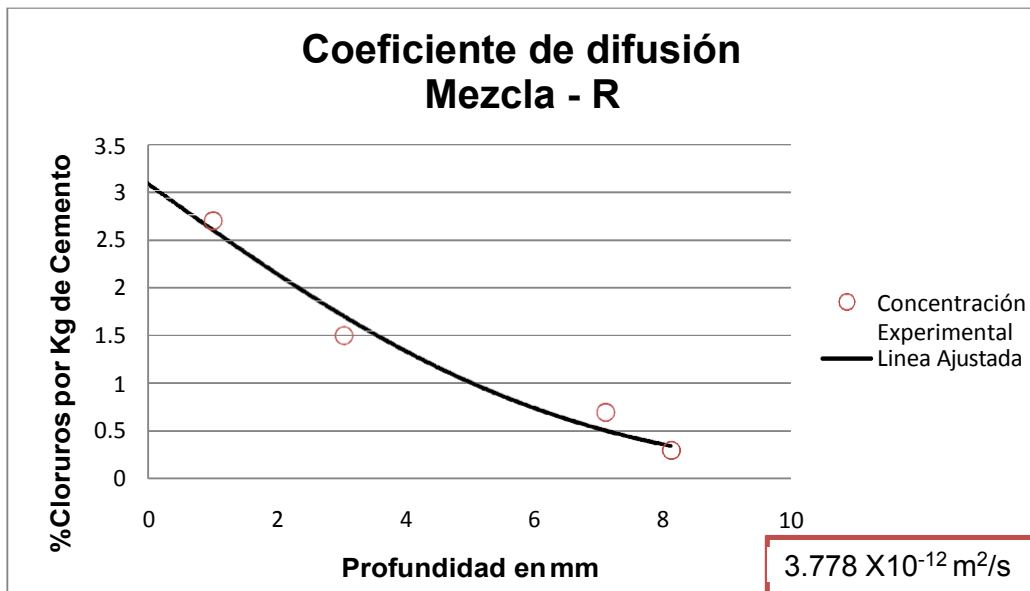


Fig.114 Coeficiente de difusión de cloruros, a los 90 días de edad de la mezcla R.

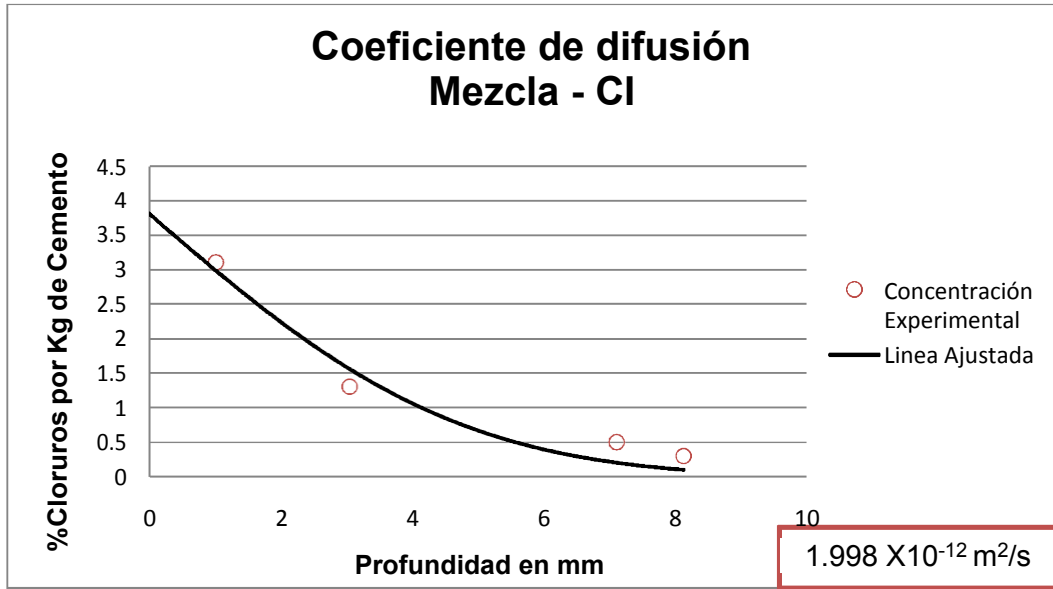


Fig.115 Coeficiente de difusión de cloruros, a los 90 días de edad de la mezcla CI.

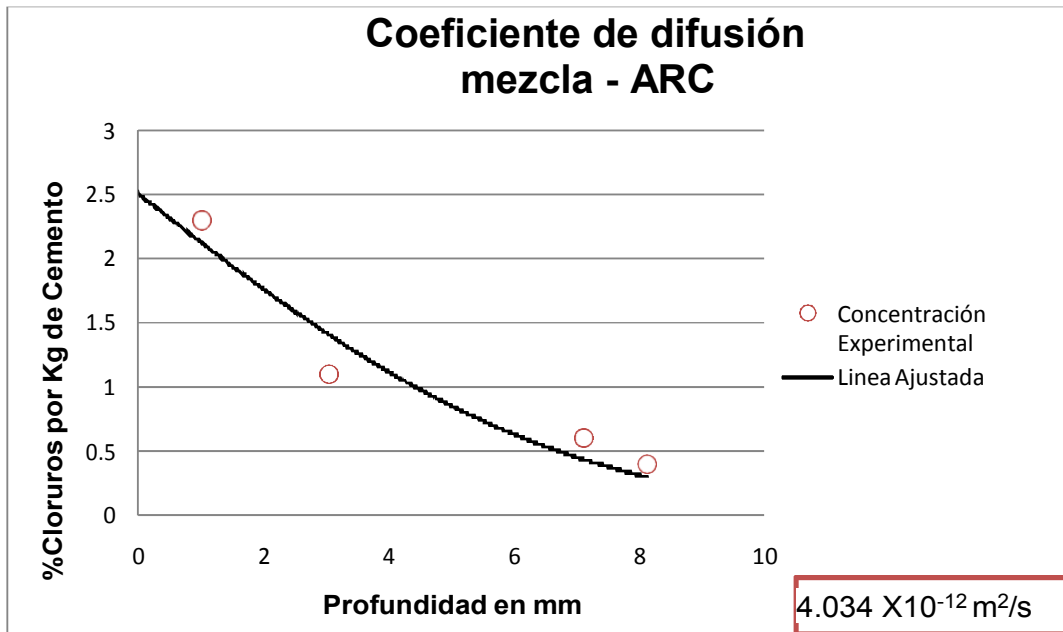


Fig.116 Coeficiente de difusión de cloruros, a los 90 días de edad de la mezcla ARC.

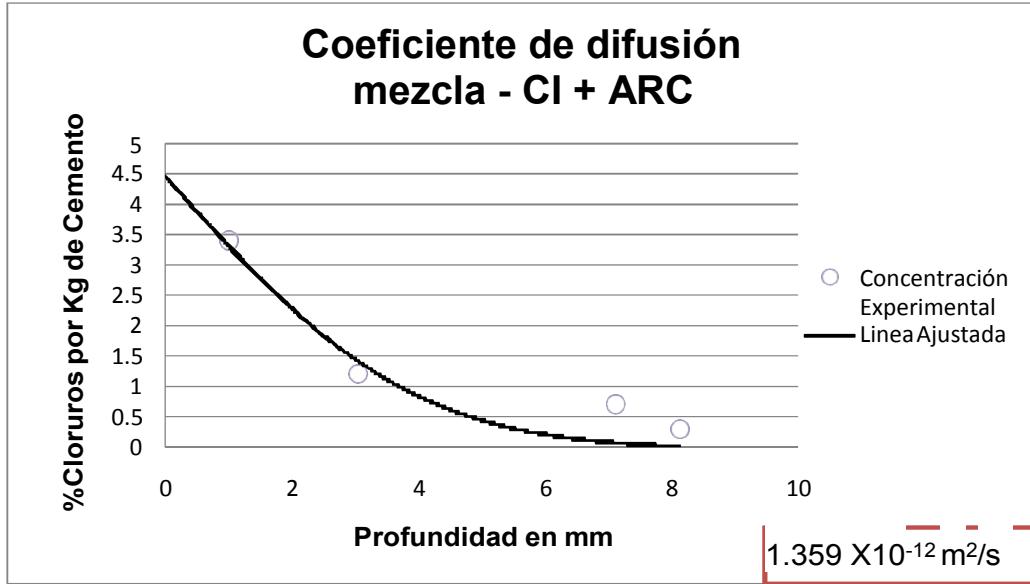


Fig.117 Coeficiente de difusión de cloruros, a los 90 días de edad de la mezcla CI +ARC.

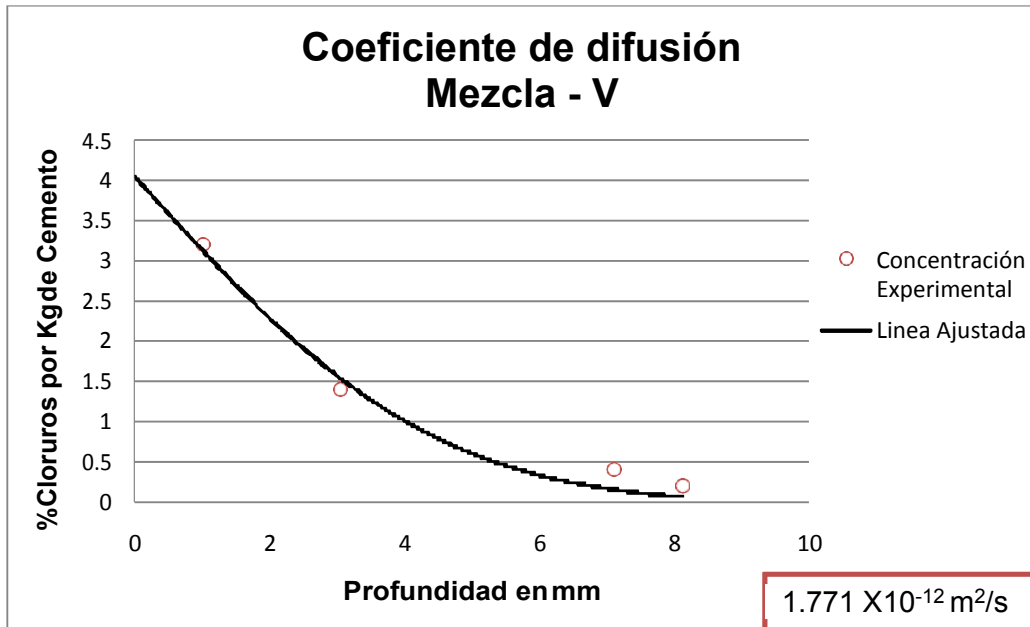


Fig.118 Coeficiente de difusión de cloruros, a los 90 días de edad de la mezcla V.

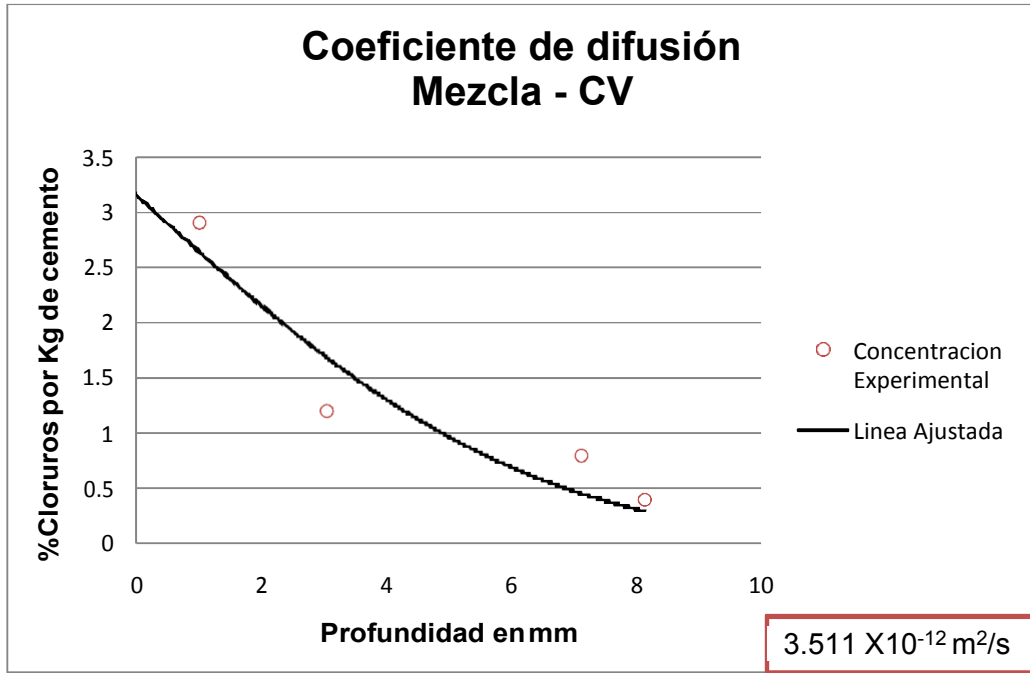


Fig.119 Coeficiente de difusión de cloruros, a los 90 días de edad de la mezcla CV.

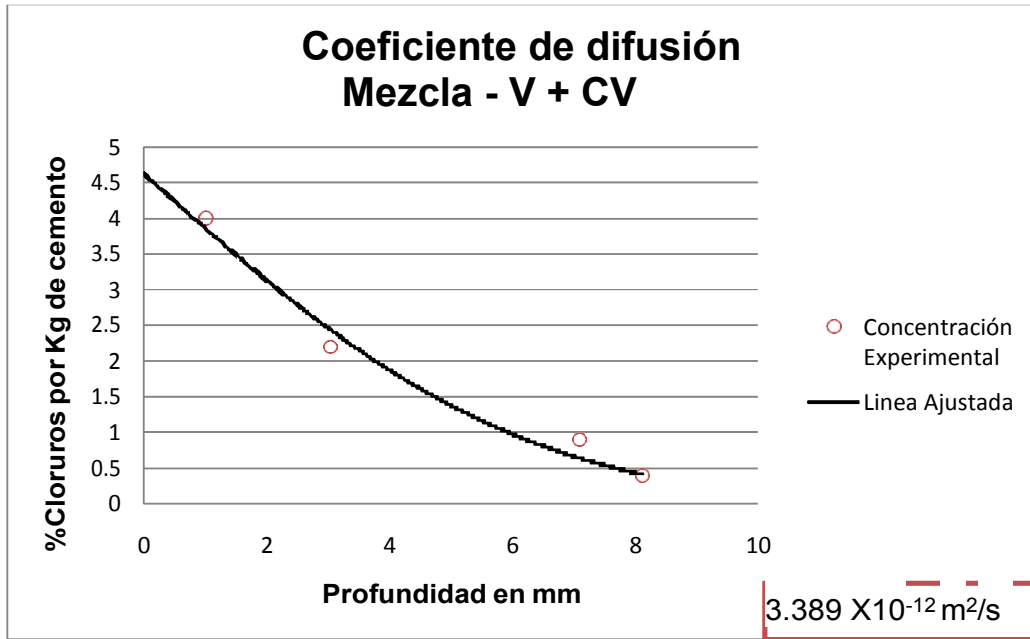


Fig.120 Coeficiente de difusión de cloruros, a los 90 días de edad de la mezcla V+CV.



### **R vs V**

Si se compara la concentración de  $Cl^-$  entre estos dos concretos, es posible concluir que la mezcla que mostró una menor concentración al ingreso de  $Cl^-$  fue la mezcla V.

De acuerdo con el cálculo del coeficiente de difusión en la mezcla R se presentó un resultado de  $D_o=3.788 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  y para el concreto con curado interno mejorado V fue de  $D_o=1.771 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Esto se atribuye a la función del AL que administró la solución acuosa de ARC y agua, obteniéndose una mejor densificación de la matriz cementante; razón por la cual la mezcla V obtuvo un mejor desempeño.

### **CI vs CI + ARC vs V**

Para hacer una comparación se debe recordar que en todos estos concretos se utilizó AL como promotor administrador del curado interno, que para el caso de la mezcla (CI) curado interno convencional, se calculó su coeficiente de difusión, resultando éste en  $D_o=1.998 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , en correlación con el concreto (CI + ARC) que mostró un comportamiento más resistente a la difusión, ya que se calculó su coeficiente, que es de  $D_o=1.359 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , podemos concluir que es menor el comportamiento difusivo de la mezcla (CI + ARC) esto debido a que el aditivo reductor de la contracción desempeñó un papel importante en la densificación de la pasta a edades tempranas y en el concreto CI con curado interno convencional no se utilizó ningún aditivo reductor de la contracción.

Para el concreto donde se implementó el CI mejorado (VERDiCT) se calculó el coeficiente de difusión  $D_o$  obteniéndose un valor mayor que el del CI + ARC, pero menor al concreto con curado interno convencional (CI). Este fenómeno puede también atribuirse al uso del aditivo reductor de la contracción; en cambio, para la comparación en la mezcla (V) vs (CI + ARC), se atribuye menor el comportamiento difusivo a la mezcla CI + ARC, por el método de implementación del aditivo. Cabe mencionar que no existe gran diferencia entre los coeficientes de difusión para estos 2 tipos de concretos.

### **R vs ARC vs CV**

La mezcla que obtuvo un mayor coeficiente de difusión fue la ARC, donde se observó que el aditivo no ayuda a minimizar por si solo el ingreso a los iones cloruro, pudiéndose concluir que el ARC mejora la calidad del concreto respecto a disminuir el coeficiente, siempre y cuando se acompañe con un agente de curado interno, como se pudo constatar en la comparación anterior.

### **V vs V+CV**

Para esta comparación se analizaron los concretos con el curado interno mejorado, V y V + CV. Esta última con una sustitución de cemento por ceniza volante, siendo la ceniza un factor importante en la velocidad de difusión, ya que la mezcla V +CV presentó un valor de  $D_0 = 3.389 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  que es menor un 50%, al obtenerse un valor de  $D_0 = 1.771 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

### **V +CV vs CV**

Para esta comparación se tiene como factor común el uso de la ceniza volante. La diferencia radicó en el proceso del curado, que la mezcla V +CV utilizó un curado interno mejorado y la mezcla CV un curado convencional. Los coeficientes calculados son similares en un 90%; ya que, para la mezcla V+CV, el coeficiente de difusión fue de  $D_0 = 3.389 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  y para el concreto CV el  $D_0 = 3.511 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , que según las gráficas, la línea ajustada a la concentración experimental tiende a comportarse de manera similar entre los concretos CV y V+CV. Esto se le puede atribuir a que la sustitución de cemento por ceniza volante fue en el mismo porcentaje.

## 6.6 LA CARBONATACIÓN ACELERADA

En las figuras 121 y 122 se muestran, para diferentes tiempos de exposición, los frentes del avance carbonatado en los diferentes concretos estudiados.

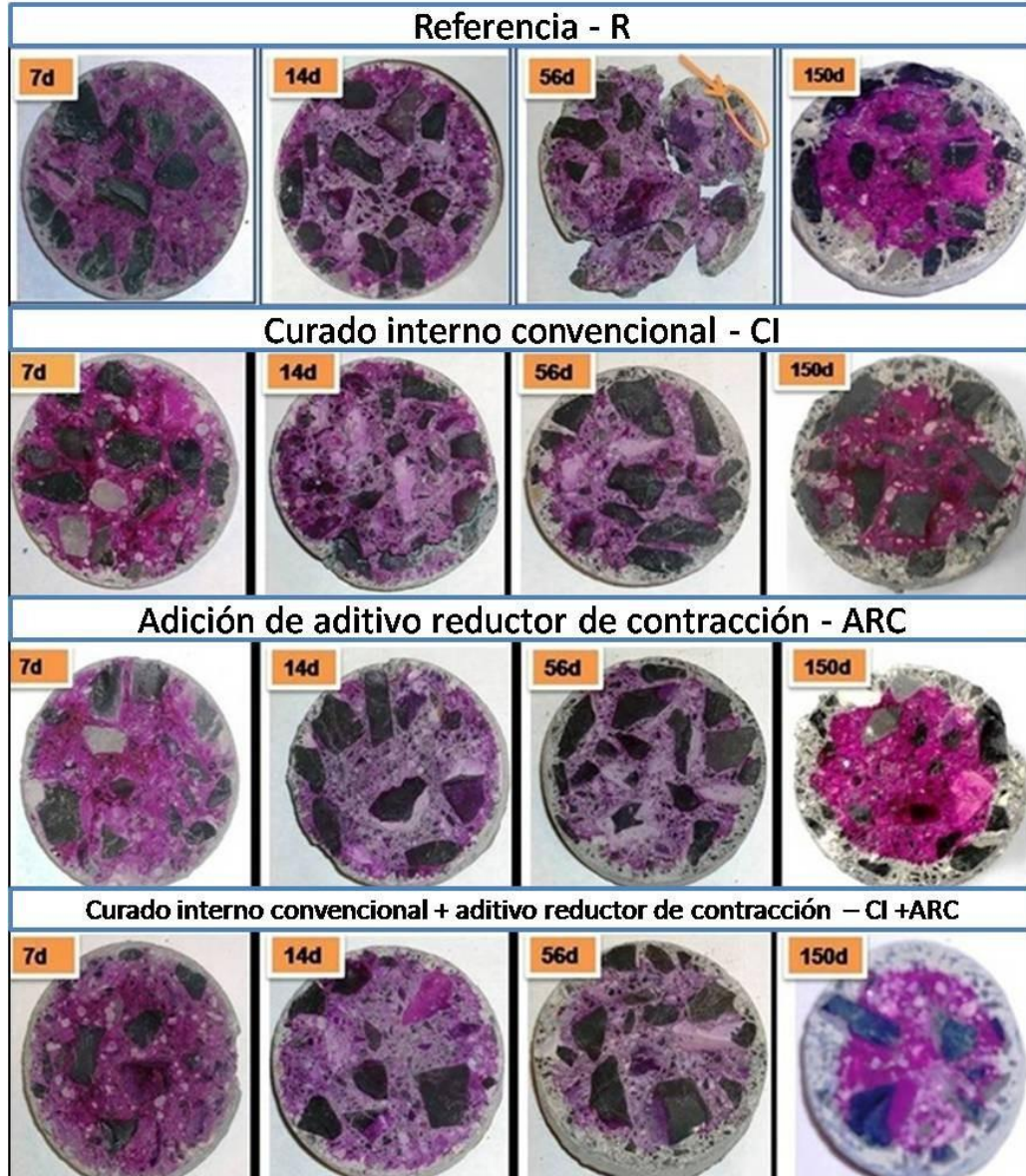


Fig. 121 avance de la carbonatación acelerada para las mezclas R, CI, ARC y CI+ARC.

En la figura 121, se observa que los concretos donde se implementó el curado interno y el ARC, el fenómeno de la carbonatación fue disminuyendo conforme pasó la edad de los concretos sometidos al deterioro acelerado.

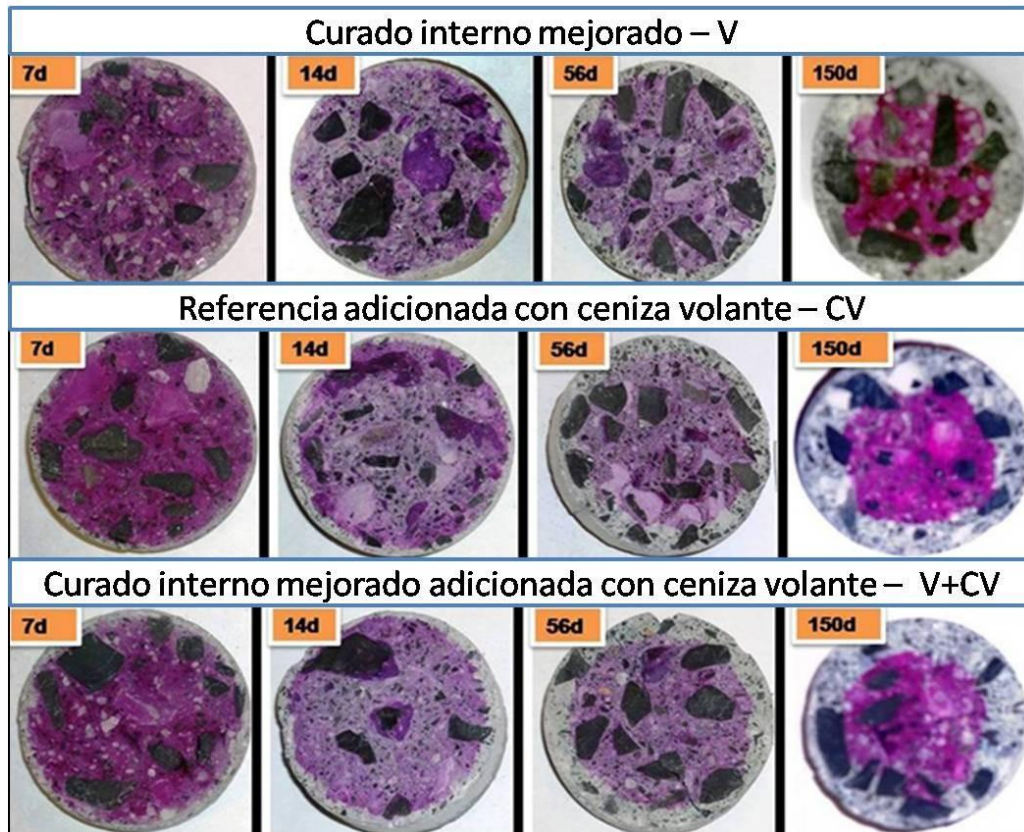


Fig. 122 Avance de la carbonatación acelerada para las mezclas V, CV, V + CV.

En la figura 122, se observa una menor penetración en la mezcla V respecto a las mezclas CV y V +CV, debido al efecto del curado interno mejorado y al efecto del ARC en la mezcla.

La gráfica 123 ilustra un mayor comportamiento en las mezclas CI + ARC, ARC, V y CI, a 150 días de exposición en condiciones aceleradas al  $\text{CO}_2$ .



Tabla No.21 Profundidad de carbonatación

PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN (mm)							
EDAD	R	CI	ARC	CI+ARC	V	CV	V +CV
7	2.2	3.3	2.7	3.3	3.2	2.7	3.3
14	2.7	3.1	2.5	2.8	2.4	2.6	3.2
28	4.0	4.3	3.3	3.9	3.3	4.1	5.1
56	5.1	6.4	5.0	5.3	5.2	7.1	7.4
90	8.9	8.6	7.5	7.7	7.4	10.7	10.8
150	11.0	9.6	8.9	8.0	9.4	10.2	10.9

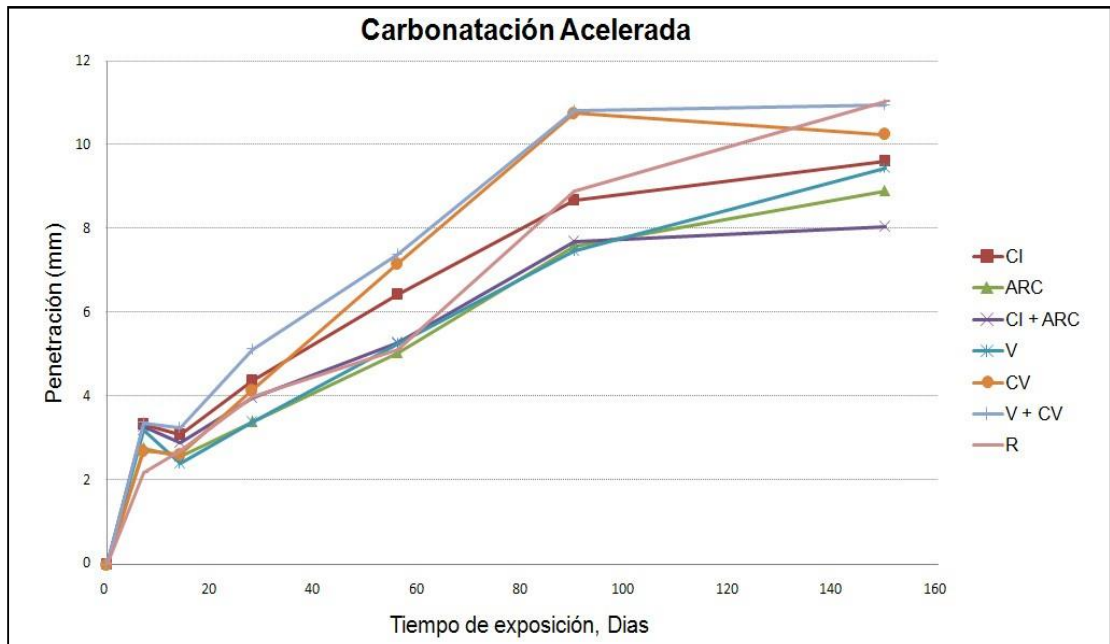


Fig. 123 Profundidad de carbonatación con relación al tiempo de exposición.

En la tabla 21 se registra la profundidad de carbonatación acelerada la cual demuestra una disminución respecto avance de carbonatación a la edad de exposición.

En la figura 123, también se puede observar un avance significativo en las mezclas R y V+CV, en correlación con las demás mezclas. La mezcla V+CV no presentó un buen comportamiento y esto se atribuye a que la ceniza volante no cumplió su función como cementante, probablemente a una reacción con el ARC.

### **Efecto del curado interno mejorado respecto a la mezcla de referencia y su desempeño en ambiente acelerado de carbonatación (R vs V)**

Para los valores obtenidos hasta una edad de 56 días, se puede considerar que ambas mezclas presentaron un avance de carbonatación a partir de esta edad. La figura 122 y en la tabla no.21 se muestra un mejor desempeño para la mezcla V, ya que originó reducciones en el avance de la carbonatación, de 16 y 14%, a las edades de 90 y 150 días, respectivamente.

### **Efecto del aditivo reductor de contracción en conjunto con el curado interno convencional (mezcla CI + ARC)**

En esta comparación, los resultados muestran que el aditivo ARC redujo el avance de la carbonatación a partir de los 14 días de exposición, también se observa que la reducción se fue incrementando conforme pasaba el tiempo, lo cual representó reducciones entre 7 y 16%, para tiempos de exposición entre 14 y 150 días.

### **Efecto del aditivo ARC en la mezcla de referencia (R vs ARC)**

Los resultados demuestran que en ambas mezclas se tuvieron resultados similares, hasta los 56 días, con menos avances de carbonatación a partir de esta edad, para la mezcla ARC lo que representa reducciones de 14 y 19% a las edades de 90 y 150 días respectivamente.

### **Efecto de la ceniza volante en la mezcla de referencia (R vs CV)**

Ambas mezclas arrojaron prácticamente los mismos avances en carbonatación hasta los 28 días de edad a partir de la cual la mezcla CV presentó avances significativamente mayores con incrementos de 39% y 20% a las edades de 56 y 90 días respectivamente. A partir de los 90 días, la ceniza volante originó una reducción en el avance de la carbonatación que condujo a que esta mezcla mejorara su desempeño con relación a la referencia refiriéndose en una mejora del 7%.

### **V vs V+CV**

Para esta comparación a la edad de 28 días, la mezcla de concreto V mostró un comportamiento mayor que el concreto V+CV con una diferencia muy marcada de un 44% de diferencia. Ante este fenómeno a los 90 días, existía ya un diferencia notable según la grafica siendo un 31% menor el ingreso al concreto V. Para la edad de 150 días la diferencia entre el V y V+CV fue de un 14%, siendo mayor la penetración del CO<sub>2</sub> en los concretos V+CV y atribuyendo esto a la probable no activación de la ceniza volante, debido al uso del aditivo reductor de la contracción.

### **Efecto del curado interno mejorado en la mezcla con ceniza volante (V +CV vs CV)**

En esta comparación se puede concluir que ambas mezclas se comportan prácticamente igual y que hay un beneficio de impermeabilidad que brinda la ceniza volante para tiempos de exposición entre 90 y 150 días. Se concluye, entonces, que la tecnología VERDiCT no tuvo efecto en esta mezcla.

### **Comentarios de esta prueba**

En el procedimiento de carbonatación acelerada que se utilizó, se puede observar que el desarrollo de este fenómeno para el intervalo de tiempos de exposición estudiado, demuestra claramente tres etapas del proceso que se pueden delimitar para los siguientes rangos de tiempos de exposición: de 0 a 14 días; de 14 a 90 días y de 90 a 150 días, siendo la segunda en la que se da la carbonatación más activa, debido a que algunos resultados son similares a la edad de 150 días. Hubiera sido de gran utilidad monitorear el avance de la carbonatación a edades más avanzadas.



# **CAPÍTULO 7**

# **CONCLUSIONES**



## **1. La resistencia a la compresión.**

El aditivo reductor de la contracción originó reducciones en la resistencia a la compresión y cuando se utilizó para mejorar el curado interno, los resultados se mantuvieron similares a cuando se dosificó directamente en la mezcla.

Con relación al curado interno convencional, la tecnología VERDiCT presentó una resistencia marginalmente menor.

## **2. El módulo de elasticidad.**

La reducción en el módulo de elasticidad que presentó la tecnología VERDiCT, con relación a la referencia, se atribuye a una mayor deformación del concreto inducida por la presencia de agregado ligero.

Todas las mezclas con agregado ligero en las que se utilizó como agente para incorporar el curado interno mejorado, presentaron un mayor nivel de deformación longitudinal, lo cual es atribuible a la presencia de este material.

## **3. La permeabilidad abierta al agua.**

Respecto a la mezcla de referencia, la tecnología VERDiCT presentó 14% menos vacíos permeables a la edad de 28 días, con desempeño similar a las edades de 90 y 180 días.

El aditivo ARC presentó el mejor desempeño con reducciones del 30% a las edades de 28 días.

## **4. La permeabilidad a los iones cloruro.**

Los resultados confirman la excelente capacidad de la tecnología VERDiCT para reducir la difusión iónica en el concreto.

El ARC dosificado en la mezcla también reduce de manera importante la difusión y el efecto resulta mejorado cuando se utiliza en conjunto con el curado interno convencional.

La ceniza volante resultó un excelente material para reducir la difusión iónica y en conjunto con la tecnología VERDiCT, es significativamente mayor el beneficio, entre todos los concretos estudiados la sinergia de la CV y la tecnología VERDiCT produjo los mejores resultados.

## **5. La difusión a los iones cloruro.**

Con relación a esta referencia, el curado interno mejorado redujo en un 53% la difusión de iones cloruro en el concreto. con relación al curado interno convencional, la tecnología VERDiCT condujo a una reducción del 6% mayor.

La ceniza volante condujo a una reducción del 7% y el efecto se mejoró en un 10%, cuando se utilizó en conjunto con la tecnología VERDiCT.

Con una reducción del 64%, el mejor desempeño lo presentó el trabajo sinérgico del curado interno convencional, con el ARC en la mezcla, destacando la aportación del curado interno, ya que por sí solo aportó una reducción del 47%.

## **6. La carbonatación acelerada.**

Hasta los 90 días de monitoreo, la tecnología VERDiCT ofrece mayor protección inicial contra la carbonatación; pero después de esa edad los resultados indican un mejor desempeño para la mezcla con curado interno convencional y ARC en la mezcla.

A pesar de que la referencia mostró una de las mejores desempeños contra la carbonatación hasta los 60 días de edad, contra la carbonatación después de esa edad, esta mezcla es la que presenta las mayores velocidades de carbonatación, lo que conduce a los 150 días de monitoreo, para ser la de mayor avance de la carbonatación.

Por su efecto en la alcalinidad del concreto, la ceniza volante es la que presentó los mayores avances de la carbonatación, desde el inicio de la prueba; sin embargo, estos fueron los que presentaron mejores proyecciones después de los 14 y los 150 días.



# **CAPÍTULO 8**

# **RECOMENDACIONES**

Para evaluar otras propiedades de los concretos donde se puede utilizar eficientemente la tecnología del curado interno mejorado (VERDiCT) se recomienda los siguientes puntos:

- Utilizar diferentes proporciones de agregado ligero en los concretos, para determinar las variaciones, en cuanto a durabilidad y curado interno.
- Utilizar otros materiales cementantes alternativos, tales como micro sílice, humo de sílice, ceniza volante activada mecánicamente y pumicita fina en la sustitución de finos.
- Medir de las contracciones en el concreto.
- Medir la reología del concreto, para correlacionar la reología con la viscosidad de poro de los agregados en los concretos.
- Análisis químicamente los aditivos, y determinar el papel que desempeñarán en las reacciones de hidratación del cemento y qué reacciones se pueden llevar a cabo con los cementantes alternativos.
- Realizar pruebas de microscopia óptica de barrido a diferentes edades, para conocer el progreso de la hidratación en la zona de interface pasta-agregado.
- Utilizar las técnicas de caracterización de análisis térmico diferencial y análisis termogravimétrico, para determinar el cambio de los compuestos en la hidratación y así verificar si la tecnología VERDiCT tiene un buen comportamiento termodinámico en la hidratación.
- Exponer a diferentes ambientes de deterioro los concretos ha estudiar, por ejemplo en ambientes ricos en sulfatos o ambientes ácidos.
- Utilizar una relación agua/cemento más baja y correlacionar el efecto del agregado ligero en sinergia con el ARC.
- Utilizar otros medios de curado interno como: los polímeros súperabsorbentes, la arcilla expandida u otro mineral que tenga la capacidad de absorber y desorber el agua internamente.



# **ANEXO 1**

## **CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LOS MATERIALES**

## ANÁLISIS QUÍMICO DE LA MATERIA PRIMA MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X.

La materia prima se analizó mediante la técnica de fluorescencia de rayos x para determinar el contenido, en porcentaje, de los óxidos de la materia prima.

La tabla no. 22 reporta la composición química para el agregado ligero, la ceniza volante y el cemento portland ordinario (CPO 40). Se incluye para fines de caracterización.

Tabla No.22 Análisis químico de la materia prima

Compuesto	Contenido en porcentaje (%)		
	AL	CV	CPO 40
Na <sub>2</sub> O	1.71	0.64	0.37
MgO	0.43	0.84	1.68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.36	25.01	5.84
SiO <sub>2</sub>	72.02	63.78	20.71
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.02	0.12
SO <sub>3</sub>	0.00	0.00	1.99
K <sub>2</sub> O	0.05	0.01	0.01
CaO	2.74	2.29	65.80
TiO <sub>2</sub>	0.31	0.93	0.22
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.05	0.07
MnO	0.04	0.01	0.06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.71	4.99	2.35
NiO	0.01	0.00	0.01
ZrO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00
HfO <sub>2</sub>	0.01	0.00	0.00
<b>Pérdidas por ignición</b>	0.00	0.04	0.00

## DISTRIBUCIÓN PROMEDIO DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE CEMENTO Y CENIZA VOLANTE UTILIZADAS.

Se analizó, mediante la prueba de tamaño de partícula, la materia prima cementante para fines de caracterización

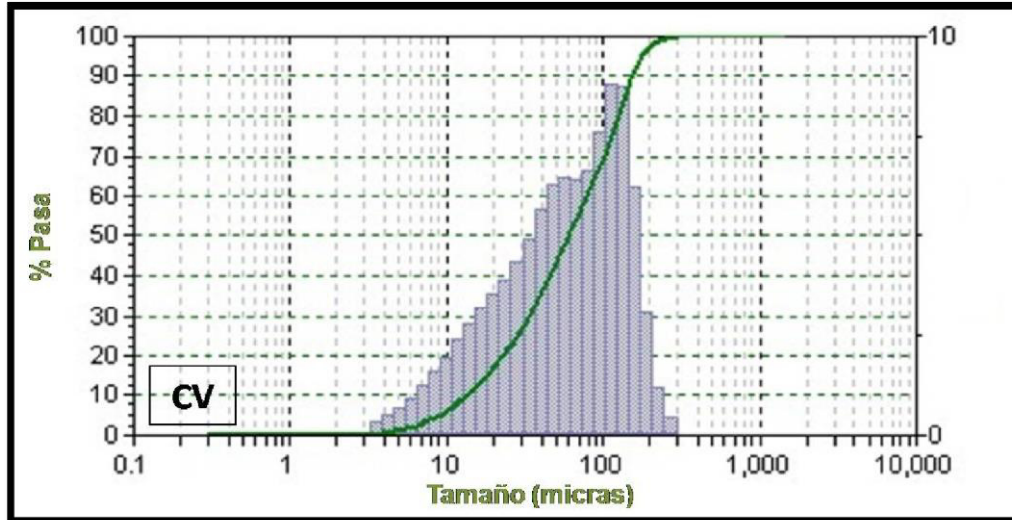


Fig.124 Tamaño de partícula, en micras, de la ceniza volante.

la ceniza volante presentó un tamaño promedio de partícula de **75  $\mu\text{m}$** , y el tamaño promedio de las partículas de cemento portland fue de **30  $\mu\text{m}$** .

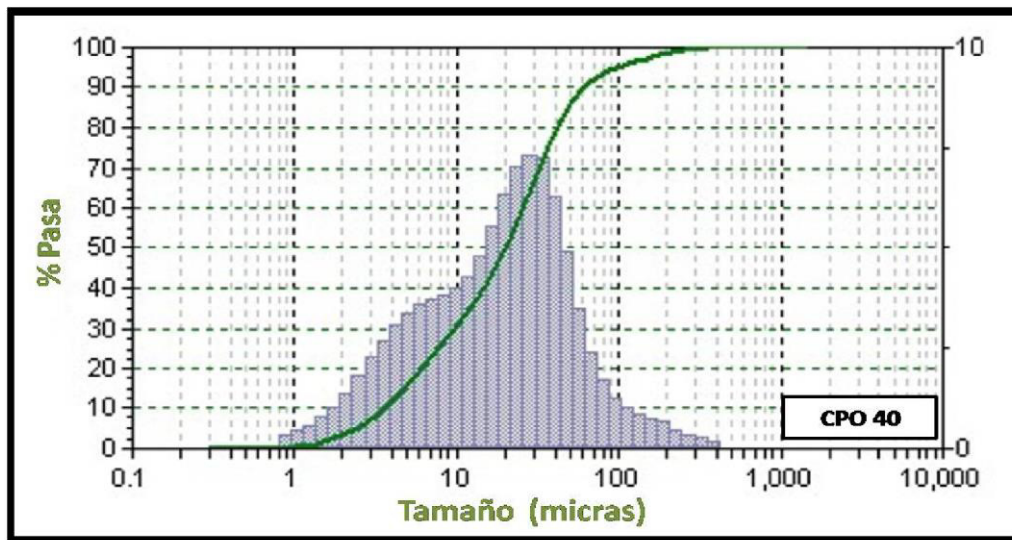


Fig. 125 Tamaño de partícula, en micras, del cemento portland ordinario.

Comparando las figuras se puede observar que existe una mayor uniformidad en las partículas del cemento pÓrtland. Las partículas de ceniza volante no tienen la misma homogeneidad, debido a que es un residuo industrial.

## CARACTERIZACIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

Debido a que se deseaba ver el desempeño de la tecnología VERDiCT, se analizó microestructuralmente el AL y se optó por hacer pruebas de microscopia electrónica y determinar las propiedades que el CI brinda al concreto en la densificación de la pasta.

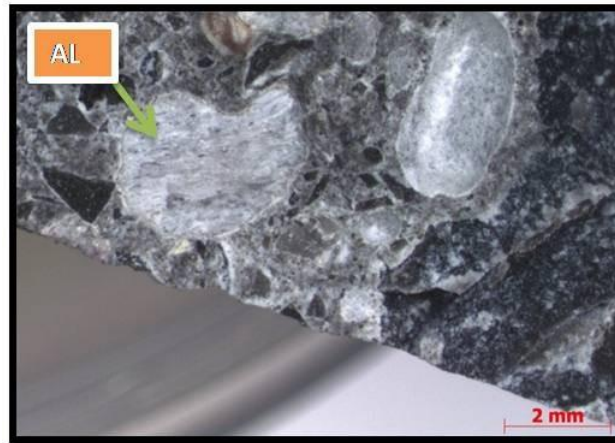


Fig. 126 Agregado ligero adherido a la pasta en el concreto.

En la (fig.126) se observa un agregado ligero de pumicita (AL) embebido en el concreto. Se pudo observar una buena distribución del agregado en todas los concretos donde se utilizó el AL.

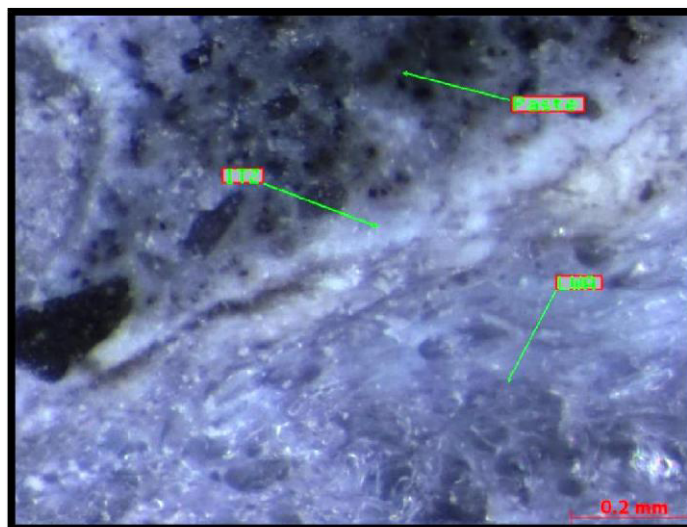


Fig.127 Zona interfacial entre el agregado ligero y la pasta del concreto.



En la (fig.128) se puede observar la interacción del agregado con la pasta del concreto. En apariencia se observa un gel producto de la hidratación, lo que llevo al estudio de la microscopia electrónica de barrido.

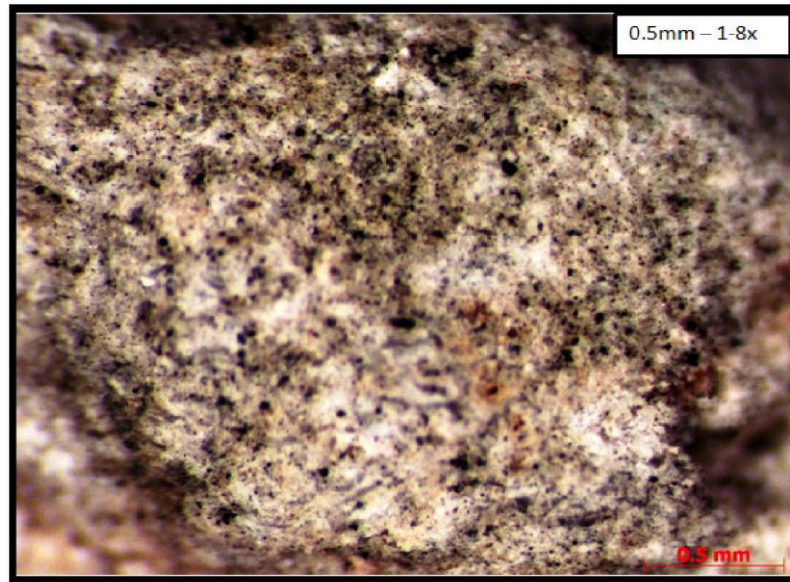


Fig.128 Agregado ligero a 0.5 mm- 1.8 x (tomada con estereoscopio).

En la (fig.129) se hizo la toma de la micrografía a mayor magnificación, para determinar aproximadamente el tamaño de los poros más grandes; pero esto no fue suficiente para calcular el tamaño promedio, por lo que se utilizó el MEB.

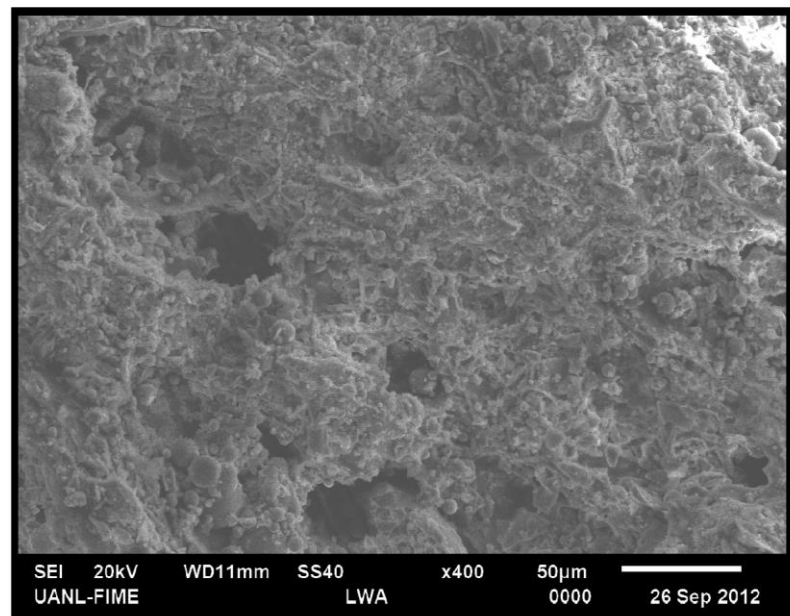


Fig. 129 Imagen en microscopio electrónico de barrido, agregado ligero (pumicita) a 50 µm-400 x.

En la (fig.130), el agregado ligero se observó mediante microscopía electrónica de barrido, su morfología y partículas de ceniza rodeando dentro y fuera de los agregados.

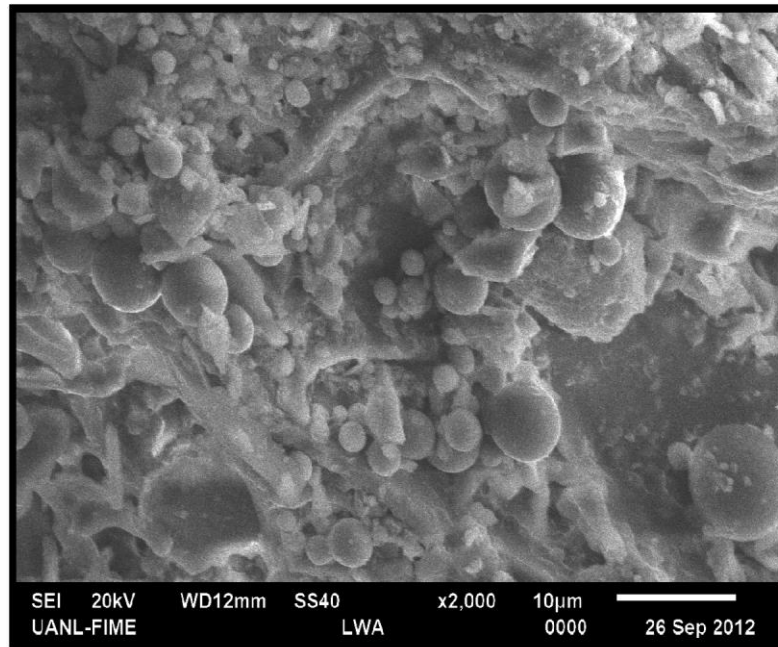


Fig. 130 Imagen en microscopio electrónico de barrido del agregado ligero (pumicita) a 10 µm-2,000 x dentro de un poro del AL.

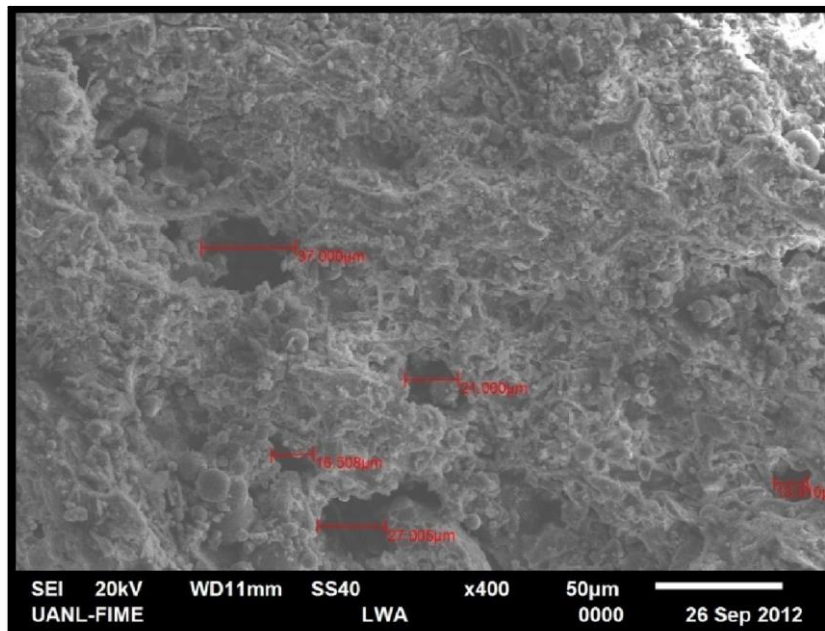


Fig. 131 Imagen en microscopio electrónico de barrido del agregado ligero (pumicita) a 50 µm-400 x.

En la (fig.132) se midió el tamaño del poro, variando las medidas, debido a que la morfología del agregado también varía de acuerdo con el proceso de formación natural del mismo. El tamaño aproximado promedio se da entre las 40  $\mu\text{m}$ .

Se pudo verificar y comprobar que el agregado ligero contenía cementante alterno; en este caso, ceniza volante, que, en vez de perjudicar, ayudó a la reacción puzolánica en la zona de interface entre los agregados y la pasta. Esto se verificó mediante la prueba de electrones retrodispersados.

### CONCRETO DE REFERENCIA (R)

Se observó una buena distribución de los agregados, así como una buena matriz cementante, como se muestra las siguientes figuras.

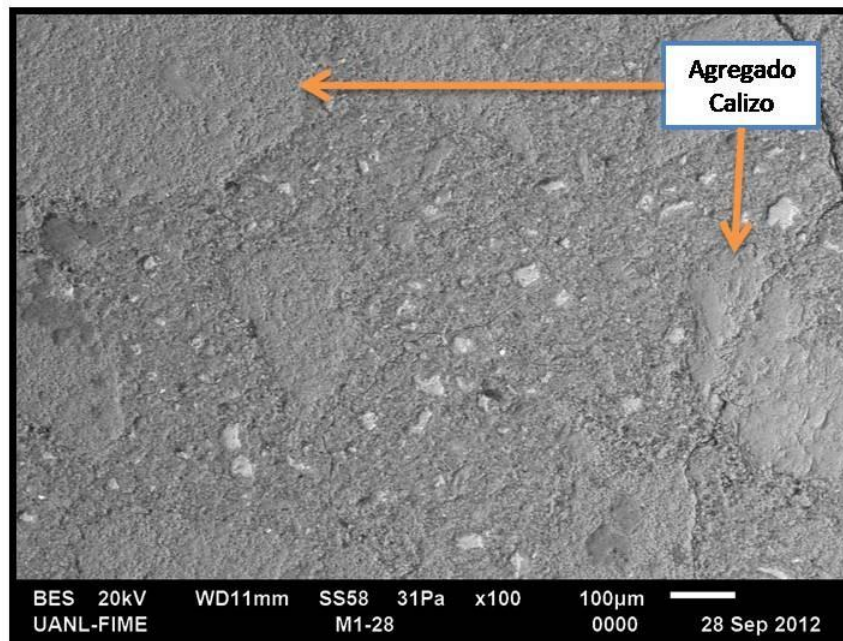


Fig.132 Imagen en MEB, (R) a 28 días a 100  $\mu\text{m}$ -100 x.



### CONCRETO ADICIONADO CON CI + ARC

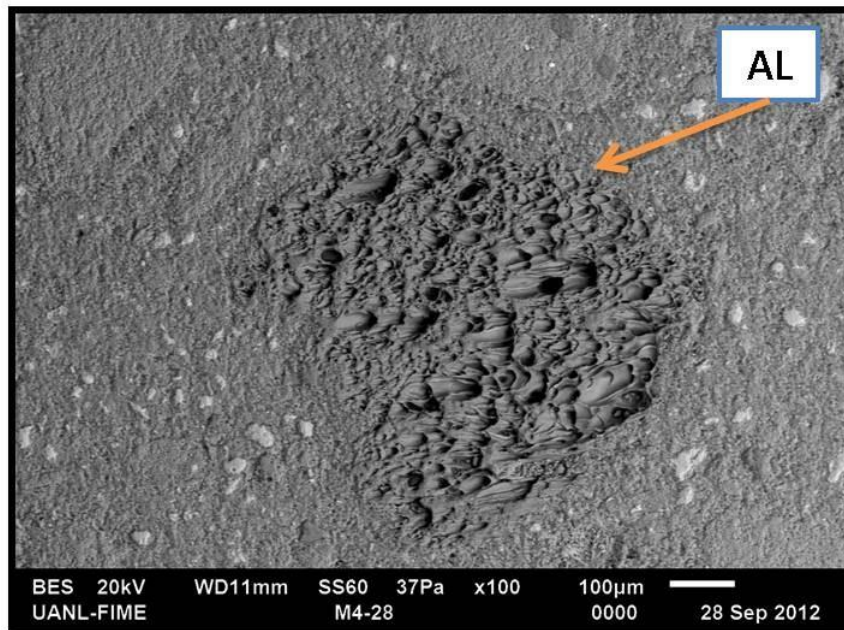


Fig.133 Pumicita en mezcla de CI +ARC, 28 días a 100 µm-100 x.

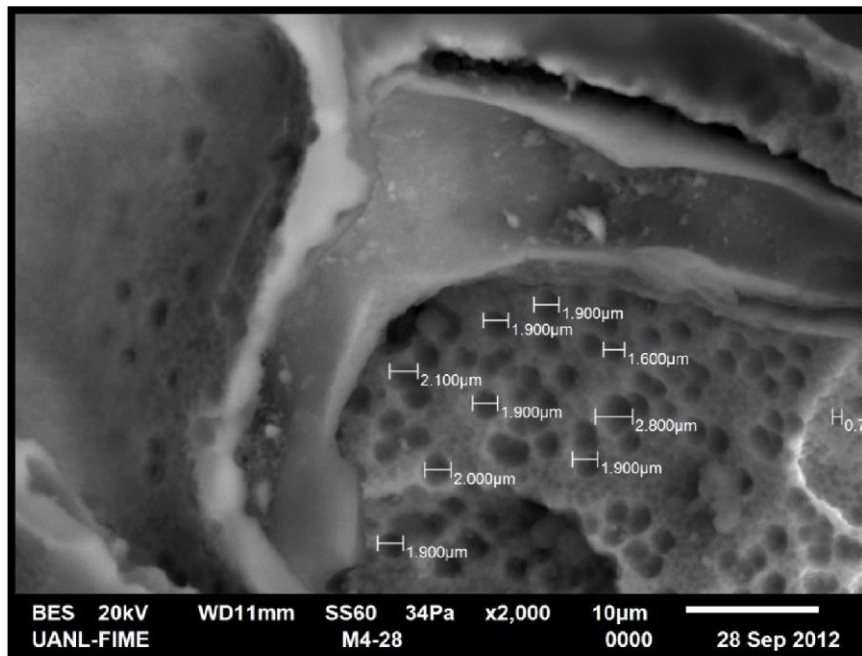


Fig. 134 Imagen en microscopio electrónico de barrido, agregado ligero (Pumicita) CI +ARC 28d a 10 µm-2000 x.

La (fig.134) muestra datos importantes, debido a que se observan los tamaños de poro dentro del poro, los cuales se midieron con el MEB, siendo esta medida de tamaño nanométrico. Estos nanoporos tienen gran influencia en la desorción del agua el curado interno; los demás poros oscilan en el tamaño de las micras.

**CONCRETO CON CURADO INTERNO MEJORADO (TECNOLOGÍA VERDiCT).**

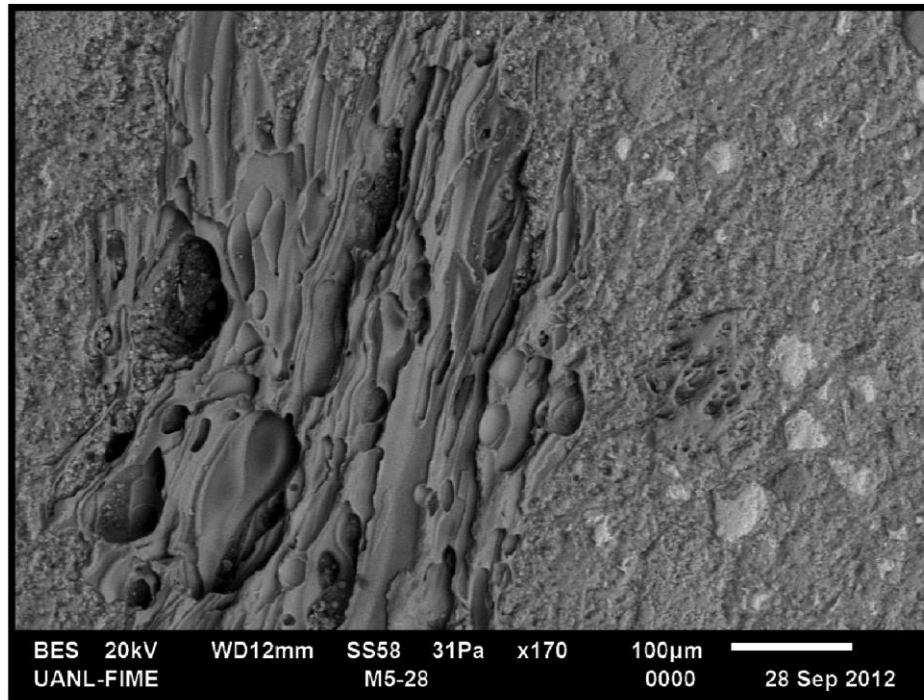


Fig. 135 Imagen en microscopio electrónico de barrido, agregado ligero (Pumicita) VERDiCT 28d a 100 µm-100 x.

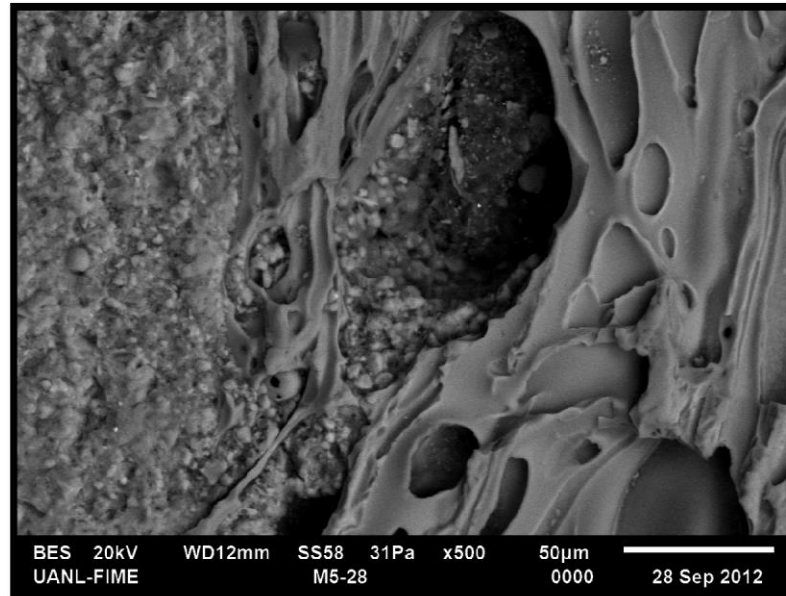


Fig.136 Imagen en microscopio electrónico de barrido, agregado ligero (Pumicita) VERDiCT a 50 μm-500 x.

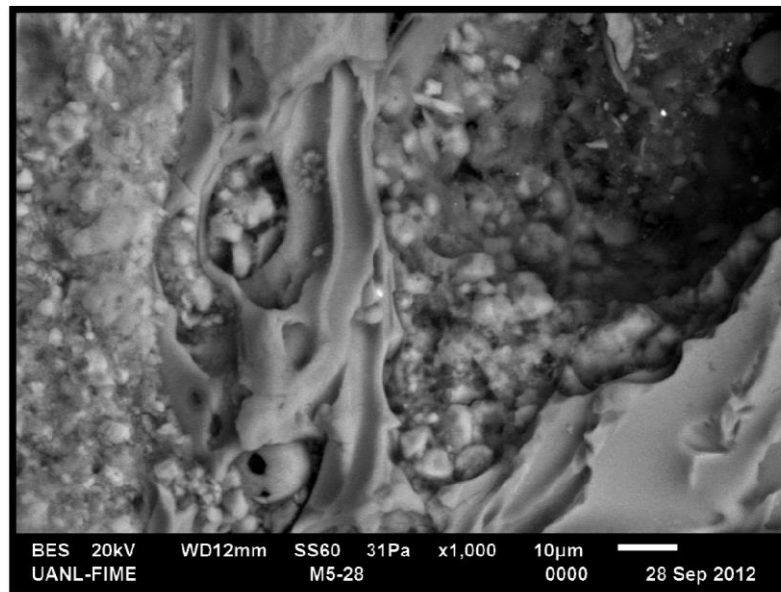


Fig.137 Imagen en microscopio electrónico de barrido, agregado ligero (Pumicita) VERDiCT a 10 μm-1000 x.

En la figura 137 se observa la muestra de concreto con la tecnología VERDiCT, a los 28 días de edad, donde se pueden ver productos de hidratación en las capilaridades del agregado ligero, pudiéndose también observar algunas cenizas volcánicas en proceso de hidratación.



**CONCRETOS CON CURADO INTERNO MEJORADO ADICIONADO CON CENIZA VOLANTE.**

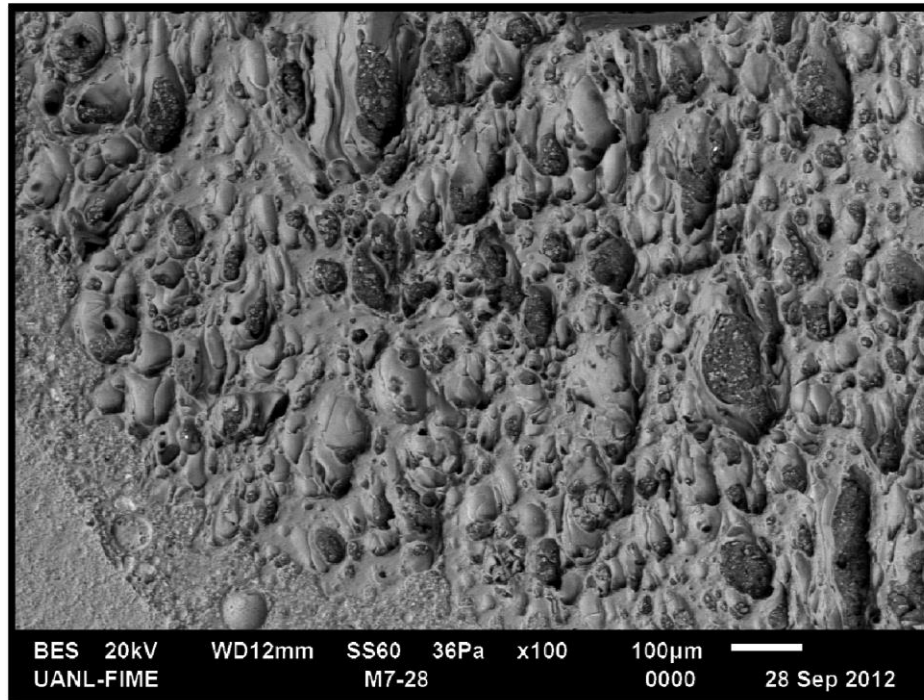


Fig.138 Imagen en microscopio electrónico de barrido, agregado ligero (Pumicita) VERDiCT + CV a 10 µm-1000 x.

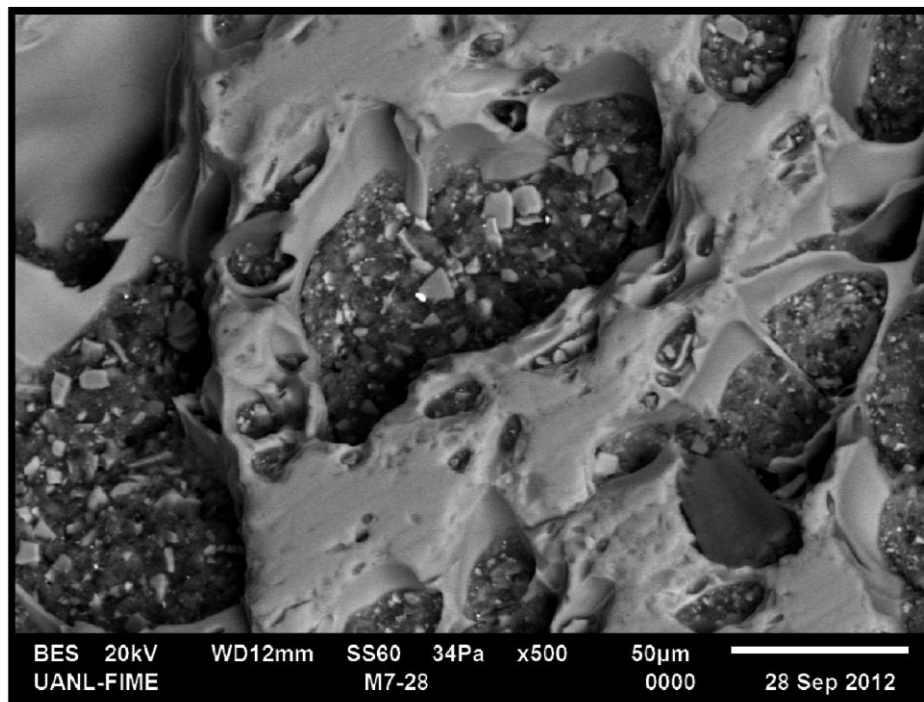


Fig.139 Imagen en microscopio electrónico de barrido, agregado ligero (Pumicita) VERDiCT + CV a 10 µm-1000 x.

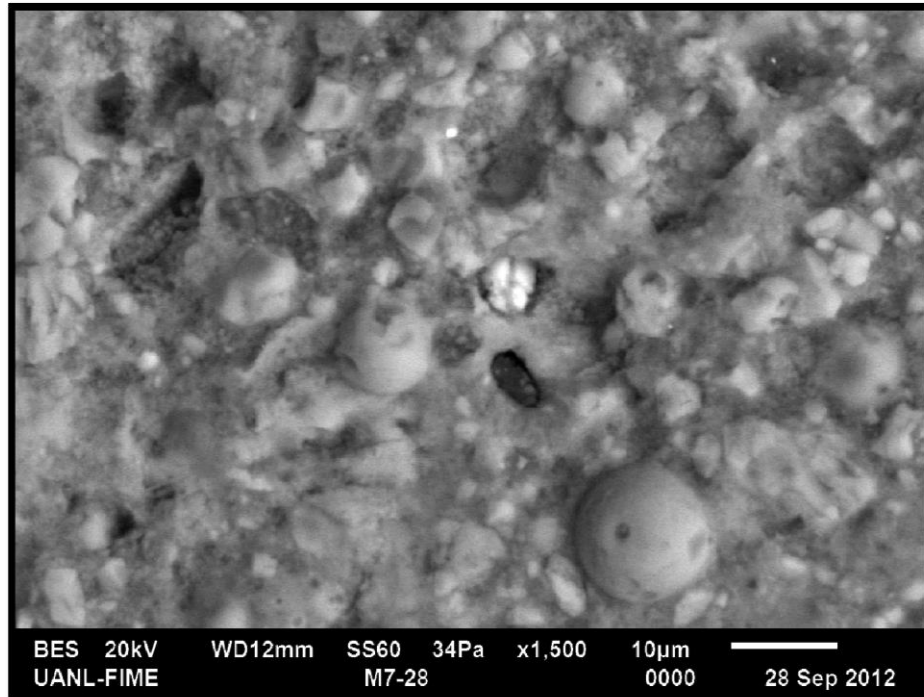


Fig. 140 Imagen en microscopio electrónico de barrido, agregado ligero (Pumicita) V + CV a 10  $\mu\text{m}$ -1000 x.

Las diferentes magnificaciones en el concreto donde se utilizó la tecnología V + CV se pueden observar la característica similar en la figura donde se utilizó el AL, observándose la reacción de la ceniza volante en la pasta y la densificación de la matriz cementante, en las capilaridades también se observan algunos productos de hidratación.



MICROANÁLISIS DE LOS CONCRETOS DE REFERENCIA

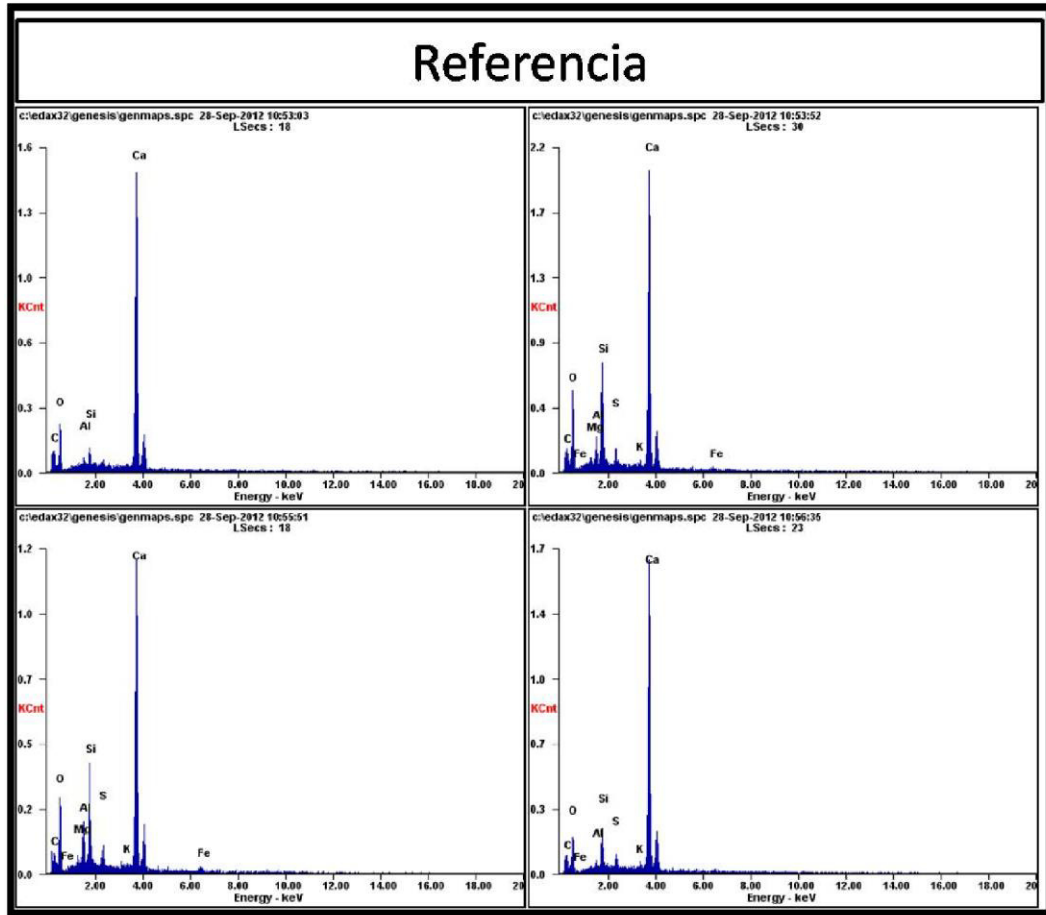


Fig. 141 Microanálisis por EDS del concreto de referencia.

Se puede observar que, en su mayoría los compuestos son silicatos de calcio hidratados. En la mayoría los picos son de Ca, teniendo también otros elementos como resultado de la hidratación. El Ca forma gel de S-C-H el cual se densifica. Las muestras se hicieron en la interface de la pasta y el agregado por lo cual se menciona que es Si, y Al. Estos elementos pueden formar parte de los compuestos del cemento.

**MICROANÁLISIS DE LOS CONCRETOS DE REFERENCIA DE CONCRETOS CON CURADO INTERNO Y ADITIVO REDUCTOR DE LA CONTRACCIÓN**

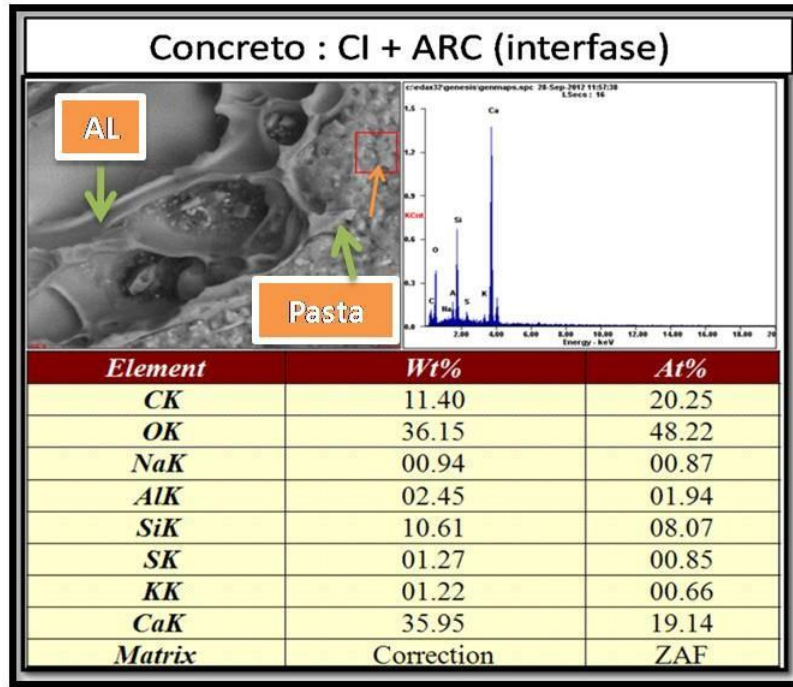


Fig. 142 Microanálisis por EDS del concreto CI + ARC (Interfase).

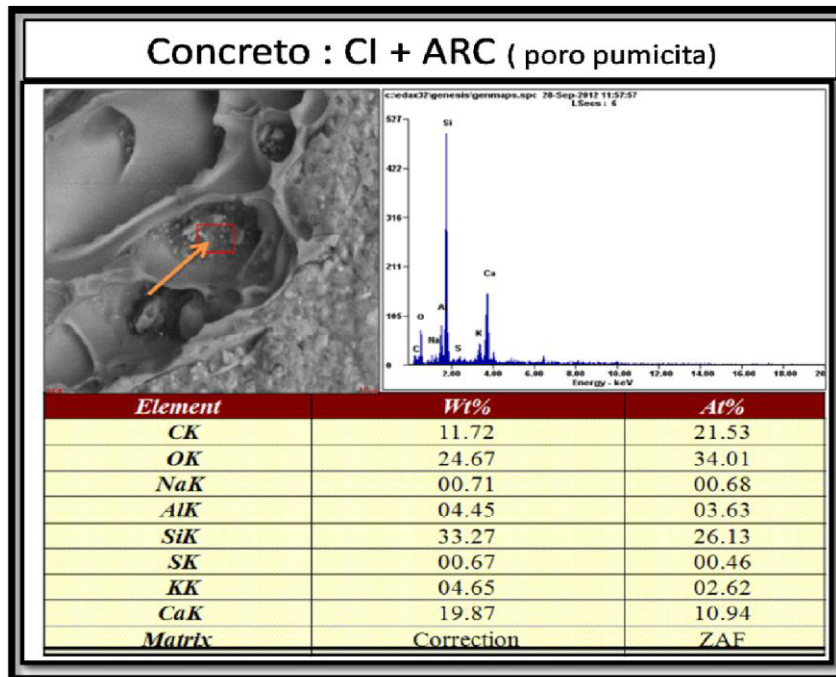


Fig. 143 Microanálisis por EDS del concreto CI +ARC (dentro de la pumicita).

**MICROANÁLISIS DE LOS CONCRETOS V Y V+CV**

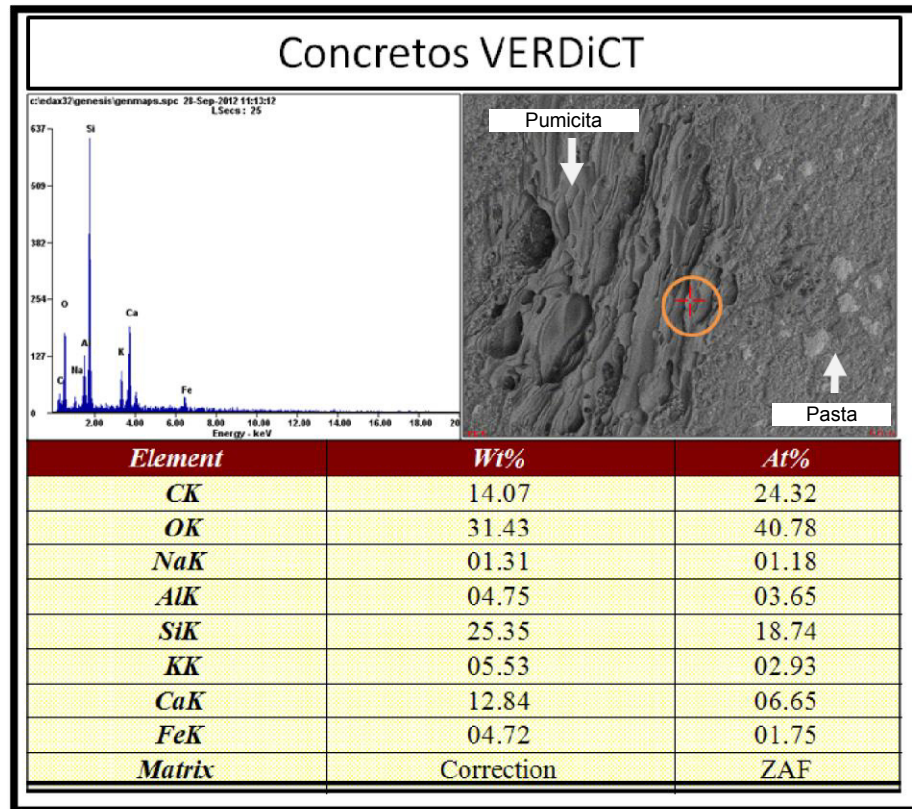


Fig. 144 Microanálisis por EDS del concreto VERDiCT.

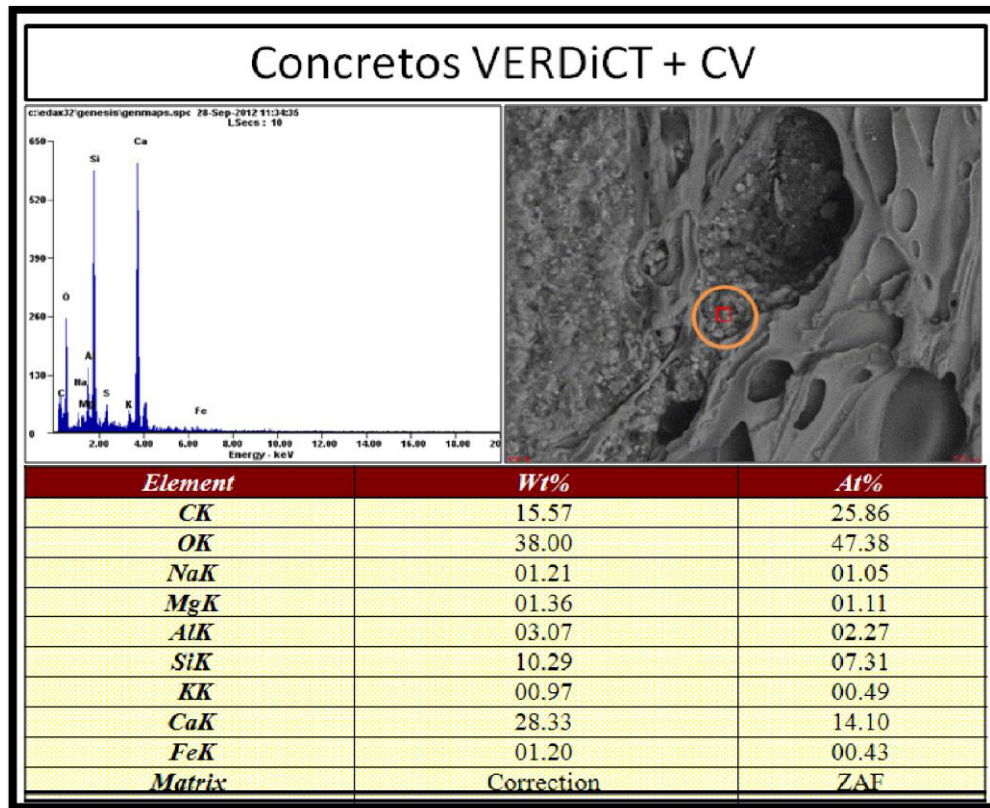


Fig. 145 Microanálisis de los concretos V + CV.

En la zona del microanálisis (fig. 145) se puede deducir por el contenido de Ca, Si y O<sub>2</sub>, que la zona es un C-S-H en la ITZ entre la pasta y el AL.

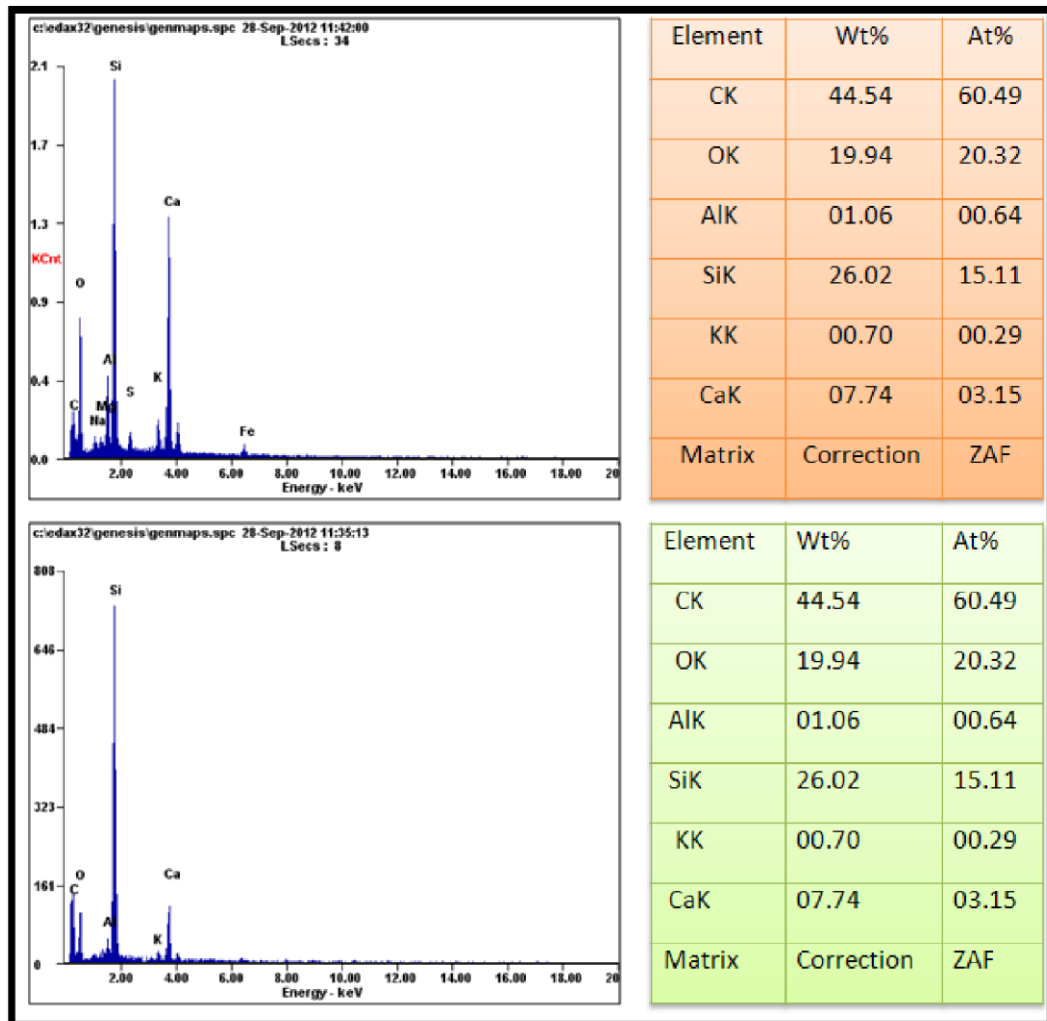


Fig. 146 Microanálisis por EDS de los concretos V + CV.

En la (fig. 146) se pueden observar las variaciones del Ca y Si, con presencia de Al, que forman compuestos silicoaluminosos debido a la CV, silicatos de calcio, y a los compuestos hidratados del cemento.



# **CURRICULUM VITAE**

## CURRICULUM VITAE

### DATOS PERSONALES

<b>Nombre:</b>	 <p>Francisco Javier Vázquez Rodríguez</p>
<b>Fecha de nacimiento:</b>	29-Septiembre-1987
<b>Lugar de Nacimiento:</b>	Monterrey, NL.
<b>e-mail:</b>	<a href="mailto:fcofimeuanl@gmail.com">fcofimeuanl@gmail.com</a> <a href="mailto:francisco.vazquezrd@uanl.edu.mx">francisco.vazquezrd@uanl.edu.mx</a>



## FORMACIÓN ACADÉMICA.

### **Especialidad.- Metalurgia, Cerámica y Nanomateriales.**

Universidad Autónoma de Nuevo León-Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
***Doctorado en Ingeniería de Materiales (2013).***

Universidad Autónoma de Nuevo León - Facultad de Ingeniería Civil  
***Máster en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales de Construcción (2010-2012).***

Universidad Autónoma de Nuevo León-Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
***Ingeniero en Materiales (2005-2010) titulado.***

Universidad Autónoma de Nuevo León-Preparatoria No. 16  
***Bachiller Técnico en Sistemas Computacionales (2002-2005) titulado.***

## EDUCACIÓN EXTRACURRICULAR

### **Universidad Autónoma de Nuevo León**

- Seminario de Subestaciones Eléctricas -FIME- Agosto 2008
- Síntesis de Nanopartículas - FCFM - CIIDIT UANL – Marzo 2008
- Seminario de Calderas Industriales-FIME – Enero 2007
- Seminario de Refrigeración Industrial-FIME – Agosto 2006.

## MANEJO DE EQUIPOS Y SOFTWARE

- Equipos de Laboratorio:  
Microscopio Óptico, Microscopio Electrónico de Barrido, , Máquina Universal de Pruebas Mecánicas, Difractómetro, Analizador Termogravimétrico, Recubridora de Grafito, Recubridora de Oro, Manejo de equipo de laboratorio, etc.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) **Bentz, Dale P, et al.** “VERDICT; viscosity enhancer reducing diffusion in concrete technology ; a new approach to decreasing transport concrete, concrete international, 2009.
- 2) **Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, an William C. Panarese** “Diseño y control de Mezclas de Concreto”. S.I.: Portland Cement Association, 2004
- 3) **Taylor F.** “Chemistry of cement” 1era Ed. Urmo. 1971
- 4) **A. M. Neville;** "Properties of Concrete", Fourth Edition, Wiley, 1996
- 5) **P. Kumar Mehta and Paulo J. M. Monteiro;** "Concrete: Microestructure, Properties and Materials", Indian Edition, Indian Concrete Institute, 1999;
- 6) **Askeland Donald et. al,** “ciencia e ingeniería de los materiales”,4ed McGraw-Hill, 2001.
- 7) **APASCO,** Manual técnico ”Manual de construcción de apasco”, Holcim,2004
- 8) **ACI 318-05** Reglamento de concreto para uso estructural
- 9) **Aitcin, Pierre Claude,** ”concreto de alto desempeño”, E&FN SPON, 2006.
- 10) **Lynam, C.G. 1-139, s.I. :** Oxford University Press, London, UK, 1934. “Growth and movement in Portland Cement Concrete”.
- 11) **M. Suzuki, M. Seddik Meddah, R. Sato.** Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete. 373-381, s.I.: Cement and Concrete Research, Vol. 39.
- 12) **ACI 116R.** Reglamento del American concrete Institute
- 13) **ACI 212-3R.** Reglamento del American concrete Institute
- 14) **IMCYC** Aditivos para el concreto, ACI,1993
- 15) **Basf Chemical Company,** ficha técnica del uso del aditivo reductor de la contracción. 2010
- 16) **Richard Morin,** Gilbert Haddad an Pierre Claude Aitcin, Crack – Free 2. High performance. 2002.
- 17) **San Juan-Barbudo, Miguel-Angel, Castro-Borges, Pedro,** “Acción de los agentes químicos y físicos del concreto “ IMCYC, 2001.

- 18) **Corral, José Toirac., 2004.** Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón; origen y prevención; Ciencia y Sociedad. 72-114, Republica Dominicana : Instituto tecnológico de Santo Domingo, Vols. 29, número 001.
- 19) **Ei-ichi Tazawa, Shingo Miyazama and Tetsuruou Kasai., 1995,** “Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste”. 288-292, s.l. : Cement and Concrete Research , 1995, Vol. 25 No.2.
- 20) **Hoam Lam** “Effects of internal curing methods on restrained shrinkage and permeability, Portland Cement Association Research & Development Information Serial No. 2620.
- 21) **Tazawa Ei. Technical committee., 1999.** Autogenous shrinkage of concrete. report., London : s.n.
- 22) **T.C. Powers, T.L. Brownyard., 1948** Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. Chicago : Research Laboratories of the Portland cement Association, Vol. Bulletin 22.
- 23) **Richard Morin, Gilbert Haddad and Pierre Claude Aïtcin, Crack-Free. 2002.** High-Performance Concrete Structures
- 24) **IMCYC., 2008** Construcción y Tecnología. 35-36, s.l. : Vol. 246.
- 25) **ACI 224-01.** Control de fisuración de estructuras de concreto . 12-13, s.l.
- 26) **O.M. Jensen, P.F. Hansen., 2001.** Water-entrained cement-based materials: I. Principle and theoretical background. 647-654, s.l. : Cement and Concrete Research, Vol. 31.
- 27) **Bentz, Dale P. et al.** “capitalizing on self-desiccation for autogenous distribution of chemical admixtures , proceeding of the 4<sup>th</sup> international seminar on self desiccation and its importance in concrete technology (ed) B. Persson, Dale Bentz & L.O. Nilson, pp.189-196,2005.
- 28) **Bentz D.P, Snyder K.A; Cass,L.C; Peltz,L.A.,**”Doubling the service life of concrete structures , I. Reducing mobility using nanoscale viscosity modifiers, CCC, Vol.30,8,pp.674-678,2008.
- 29) **Kovler Konstantin, O.M Jensen** “internal curing of concrete” State of the art report RILEM TC 196-ICC, 2007.
- 30) **Bentz, Dale P. et al.** “Water movement during internal curing” Concrete international, pp (40-45) October, 2006.
- 31) **Lura Pietro, Bentz Dale, Konstantine Kovler,**”Pumice aggregates for internal water curing” Technical Paper

- 32) **O.M.Jensen , P.F Hansen,** "autogenous deformation and rh-change in perspective ,1859-1865, s.l.Cement and concrete research.2011.
- 33) **Mustafa Shamaran, Mohamed Lachemi et al.** "internal curing of engineered cementitious composites for prevention of early age autogenous shrinkage cracking", cement and concrete research 39,pp.893-901,2009.
- 34) **Zhutovsky s, Kovler K, Benthur A,** "efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage, Mater, strct. 35(2)97-101, 2002.
- 35) **Henkeseifken,Castro J, Bentz Dale,** "water absorption in internally cured mortar made with water filled lightweight, aggregate, cem.concr.res.39, pp.883-892,2009.
- 36) **Jozwiak D, Niedzwiedzka et al,** "Sealing resistance of high performance concretes containing a small portion of prewetted lightweight fine aggregate, CCC 27, pp.709-715, 2005.
- 37) **Burcu Akcay** "Effects of distribution of light weight aggregates on internal curing of concrete, CCC 32, pp.611-616, 2010.
- 38) **De la varga Igor, Castro Javier, Bentz Dale, Weiss Jason,** "Application of internal curing for mixtures containing high volumes of fly ash " cement and concrete composites, 2012.
- 39) **Valdez-Tamez,P.L; Duran-Herrera,A; Fajardo-San Miguel, Gerardo; Juárez-Alvarado, Cesar,** "influencia de la carbonatación en morteros base cemento portland y Ceniza Volante, Ingenierías, Investigación y tecnología ; UNAM, Vol. X,1, p.31-41,2009.
- 40) **Sulpha,P;Wong,S.F; Wee, T.H; et al,** " carbonation of concrete containing mineral admixtures journal of materials in civil engineering , ASCE,p.p.134-143,2003.
- 41) **Kovler konstantin, Jensen O.M,** "Novel techniques for concrete curing", technical paper, Concrete international,2005
- 42) **Kulakowski,Marlova P et. al** "Carbonation –induced reinforcement corrosion in silica fume concrete ",construction and building materials, 23,pp189-195,2009.
- 43) **Instituto mexicano del transporte** Angélica del Valle Moreno Tezozómoc Pérez López Miguel Martínez Madrid

- 44) **Craeye, Bart, Geinaert Matthew, De Schutter Geert.** "Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early age cracking of high – performance concrete bridge decks, Construction and building materials, 25, pp.1-13, 2011.
- 45) **Andrade, Carmen et al,** "Relation between colourimetric chloride penetration depth and charge passed in migration test of the type of standard ASTM C1202-91" CCR, 29, pp.417-421, 1999.
- 46) **Dr. Ramón L. Carrasquillo, Dr. Brayan E. Barragán et al** ,2008.  
Tecnología del concreto sustentable; retos y tendencias, memorias.
- 47) **Castro Javier, Keiser Lucas, et al,** "Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures" CCR, 33, pp.1001-1008, 2011.
- 48) **ASTM C127 -12** Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- 49) **ASTM C128 -04,** Método de Ensayo Normalizado para Determinar la Densidad, la Densidad Relativa (Gravedad Específica), y la Absorción de Agregados Finos
- 50) **ASTM C138/C138M-09** Método de Ensayo Normalizado de Densidad (Peso Unitario), Rendimiento, y Contenido de Aire (Gravimétrico) del Concreto.
- 51) **ASTM C136-06** [Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.](#)
- 52) **Trujillo-Rodriguez, Raul;** "Uso de agregado ligero como medio de curado interno en concretos de alto comportamiento fabricado con puzolanas" Tesis, FIC-UANL, 2011.
- 53) **ASTM C185-01** Standard test for air content of hydraulic cement mortar.
- 54) **ASTM C33M-08** Standard specification for concrete aggregate. 55) **ASTM C150 / C150M - 12** Standard Specification for Portland Cement 56) **Cemex,**  
"Manual Técnicos del concreto en obra" ; recurso electrónico;  
2004
- 57) **ASTM C 618** [Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.](#)

- 58) **Bentz, Dale P., et al.** “Early Age properties of cement – based materials: I. Influence of cement finess; ASCE. J. Mat.Civ. Eng.20(7)5002-508.2008
- 59) **ACI** ”Manual del técnico para pruebas al concreto en obra” CP-1(01),2001
- 60) **ASTM C143** [Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete.](#)
- 61) **ASTM C642** [Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete](#)
- 62) **AASHTO T277** Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete
- 63) **ASTM C1202** [Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration](#)
- 64) **ASTM C 1556** [Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion](#)
- 65) **DURAR**, “Manual de inspección, evaluación y diagnostico de corrosión de estructuras de hormigón armado” CYTED.