

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de  
Recursos Naturales

## INGENIERÍA

---

Evaluación del efecto de adiciones industriales y naturales en la  
resistencia a la penetración de cloruros en concreto hidráulico.

---

Tesis que para obtener el grado de:  
Maestro en ciencias  
Presenta:

Alejandro Martínez Hernández

Directores de tesis:  
Dr. Pedro Montes García.  
Dr. Eric Iván Moreno.



SIP-14

**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 03 del mes de diciembre del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **“Evaluación del efecto de adiciones industriales y naturales en la resistencia a la penetración de cloruros en concreto hidráulico”**.

Presentada por el alumno:

**Martínez**  
 Apellido paterno

**Hernández**  
 materno

**Alejandro**  
 nombre(s)

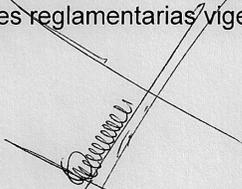
Con registro: 

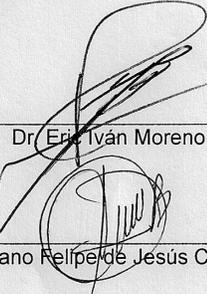
B	0	6	1	4	6	9
---	---	---	---	---	---	---

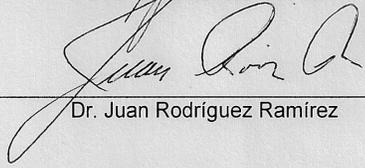
Aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

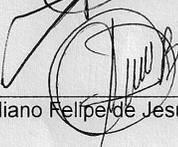
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA  
 Directores de tesis:

  
 Dr. Pedro Montes García

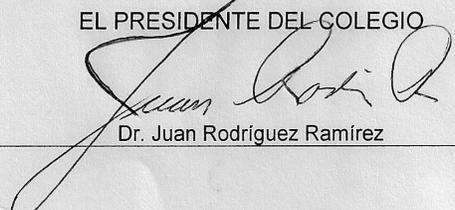
  
 Dr. Eric Iván Moreno

  
 Dr. Juan Rodríguez Ramírez

  
 Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

  
 Dra. Yadira Gochi Ponce

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
 Dr. Juan Rodríguez Ramírez



INSTITUTO POLITÉCNICO  
 NACIONAL  
 CIIDIR-UNIDAD-OAXACA



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESION DE DERECHOS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 03 del mes diciembre del año 2008, el (la) que suscribe Martínez Hernández Alejandro alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B061469**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Pedro Montes García y del Dr. Eric Iván Moreno, cede los derechos del trabajo titulado: **“Evaluación del efecto de adiciones industriales y naturales en la resistencia a la penetración de cloruros en concreto hidráulico”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradoax@ipn.mx](mailto:posgradoax@ipn.mx) ó [alexblacko@gmail.com](mailto:alexblacko@gmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

MARTÍNEZ HERNÁNDEZ ALEJANDRO

## **Resumen**

En el presente trabajo se evaluó el efecto de la adición de arcilla y ceniza volante como material cementante suplementario de origen natural e industrial en las propiedades de concreto de alto desempeño y ordinario. El porcentaje de sustitución para evaluar la influencia de la arcilla fue de 20% y para la ceniza volante de 20 y 40%, respectivamente. El estudio comprendió pruebas en estado fresco, tales como revenimiento, temperatura, peso volumétrico y contenido de aire; en estado endurecido fueron resistencia a la compresión, índice de actividad puzolánica obtenido de los resultados de resistencia, velocidad de pulso ultrasónico y coeficiente de difusión de cloruros. Los resultados indican que la adición de arcilla natural como material suplementario no afecta de manera importante las propiedades del concreto en estado fresco. Sin embargo, en estado endurecido las pruebas indican que la incorporación de dicho material promovió la disminución de resistencia a la compresión de los concretos estudiados y también afectó desfavorablemente su resistencia a la penetración de iones cloruros.

## **Abstract**

The present study evaluated the effect of clay and fly ash as a supplementary cementing material of natural and industrial origin on the properties in high-performance and ordinary concretes. The addition rate to evaluate the influence of the clay was 20% and for fly ash 20 to 40%, respectively. The study included tests in fresh concrete, such as slump, temperature, bulk density and air content; in hardened state compressive strength, Pozzolanic Activity Index from compressive strength results, ultrasonic pulse velocity and chloride diffusion coefficients. The results indicate that the addition of natural clay as supplementary material do not affect the properties of concrete in fresh state. However, in hardened state tests suggests that the incorporation of such material promoted the reduction of compressive strength of the studied concretes and adversely affected its resistance to chloride ion penetration.

## Dedicatoria

A mi madre, **Aurelia** a quien debo todo lo que soy y he logrado... no tengo palabras para poder expresarte mi sentir, lo que te diga, lo que te regale sería poco para poder compensar el gran amor que tú me has dado.

A mi familia.

## Agradecimientos

Al **Dr Pedro Montes García**, director de tesis, consejero estudiantil, investigador, catedrático, pero sobre todo al amigo.

A los siguientes **proyectos de investigación** mediante los cuales se hizo posible el presente trabajo de tesis.

“Desperdicios agrícolas e industriales como fuente alternativa para la producción de materiales suplementarios en concreto” Clave SIP-20070633.

“Estabilización química y mecánica del adobe compactado” Clave SIP-20080209.

“Análisis de la condición en el acero y de la matriz del concreto en el dominio tiempo-frecuencia” Clave SIP-20080554.

“Corrosión del acero en concreto ordinario y de alto desempeño conteniendo puzolanas obtenidas de desperdicios agrícolas” Clave SEP-CONACYT CIENCIA BÁSICA P47937-Y.

Al cuerpo docente y administrativo del **CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca**.

En especial al comité revisor de esta tesis por el respaldo y tiempo dedicado a la misma.

A los compañeros y amigos que convirtieron las jornadas interminables de trabajo en momentos para recordar.

Fernando, Samuel, Roberto, Xitlalli y Hayde.

Al **Instituto Politécnico Nacional (IPN)**. Por brindarme el honor de cursar en sus aulas y dejarme tatuado en el corazón “La técnica al servicio de la patria”.

A las siguientes entidades por el apoyo económico recibido directa o indirectamente para la realización de estudios de posgrado y trabajo de tesis.

**Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**.

**Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas (COFAA)**.

**Secretaría de investigación y Posgrado (SIP)**.

**Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI)**.

Grupo financiero **Santander**.

A los siguientes centros e investigadores, por abrirme las puertas y compartir sus conocimientos.

**Universidad Autónoma de Yucatán (UADY)**

Dr Eric Iván Moreno

**Instituto Mexicano del Transporte (IMT)**

Dr Andres Torres Acosta

**Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) Unidad Mérida**

Dr Pedro Castro Borgues

## Tabla de Contenido

<b>CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	14
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.3 ANTECEDENTES.....	18
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	25
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	27
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
1.7 HIPÓTESIS.....	28
<b>CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>29</b>
2.1 BREVE HISTORIA DEL CEMENTO.....	29
2.2 GENERALIDADES SOBRE EL CONCRETO.....	31
2.3 TIPOS DE CONCRETO.....	32
2.4 MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO.....	34
2.4.1.1 Método de Duff Abrams.....	34
2.4.1.2 Método de volúmenes absolutos (ACI).....	35
2.4.1.3 Método de diseño para concreto de alto desempeño (HPC).....	35
2.5 INTERACCIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL CONCRETO Y EL ACERO.....	36
2.6 ADITIVOS MINERALES.....	36
2.7 CENIZAS VOLANTES.....	38
2.8 ESCORIA.....	40
2.9 HUMO DE SÍLICE.....	41
2.10 PUZOLANAS NATURALES.....	42
2.11 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO.....	44
2.12 LA TÉCNICA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU).....	45
2.13 LA CORROSIÓN EN EL CONCRETO REFORZADO.....	47
2.14 MECANISMOS DE PENETRACIÓN DE CLORUROS.....	49
2.15 CORROSIÓN CAUSADA POR IONES CLORURO.....	49
2.16 NIVELES DE CLORURO INICIADORES DE LA CORROSIÓN.....	50
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>55</b>
3.1 DIFUSIÓN DE CLORUROS EN CONCRETO.....	55
3.1.1 <i>Difusión en estado estacionario</i> .....	55
3.1.2 <i>Difusión en estado no estacionario</i> .....	55
3.2 MÉTODOS DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO.....	57
3.2.1 <i>Métodos de prueba por difusión</i> .....	57
3.2.1.1 Método de prueba de difusión en estado estacionario.....	57
3.2.1.2 Método de prueba de difusión en estado no estacionario (NT Build 443).....	58
3.2.2 <i>Métodos de prueba de migración (también llamada prueba rápida de permeabilidad de cloruros)</i> .....	58
3.2.2.1 Métodos de prueba de migración en estado no estacionario.....	59

3.2.2.1.1	ASTM C1202 Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.....	59
3.2.2.1.2	Nordtest Method NT Build 492.....	59
3.2.2.2	Métodos de prueba de migración en estado estacionario.....	60
3.2.3	Método de conductividad.....	61
3.3	DISCUSIÓN SOBRE LOS MÉTODOS DE PRUEBA PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO.....	61
3.4	MODELOS COMPLEMENTARIOS A LA 2DA LEY DE FICK PROPUESTOS POR DIVERSOS AUTORES.....	64
3.4.1	Arvind y colaboradores.....	64
3.4.2	Modelo Boltzman- Matano de difusión de cloruros.....	64
3.4.3	Modelo de Mangat y Molloy .....	65
3.5	MÉTODOS DE AJUSTE DE DATOS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS POR LA SEGUNDA LEY DE FICK.....	65
3.5.1	Método de simplificación lineal basado en la función error (SLEM).....	66
3.5.2	Método gráfico.....	67
3.5.3	Métodos de Newton-Raphson y ajuste de mínimos cuadrados.....	68
3.6	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CONCRETO.....	68
3.6.1	Ecuación de onda.....	69
3.6.2	Longitud y frecuencia de onda en concreto.....	70
<b>CAPÍTULO 4.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>72</b>
4.1	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	72
4.2	MATERIALES.....	77
4.2.1	Características de los agregados.....	77
4.2.2	Características del agua.....	77
4.2.3	Características del cemento.....	78
4.2.4	Características de la arcilla natural.....	78
4.2.5	Características de la ceniza volante.....	79
4.2.6	Características del súper plastificante.....	79
4.2.7	Elaboración de mezclas de concreto.....	80
4.3	DOSIFICACIÓN DE MATERIALES.....	80
<b>CAPÍTULO 5.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>82</b>
5.1	PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.....	82
5.2	PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.....	85
5.2.1	Resistencia a la compresión.....	85
5.2.2	Velocidad de pulso ultrasónico .....	90
5.2.3	Coeficientes de difusión de cloruros.....	92
5.2.3.1	Comparación de mediciones de contenido de cloruros en concreto mediante las normas NT Build 2008 y FM 5-516.....	95
5.2.3.2	Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión.....	96
5.2.3.3	Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y coeficiente de difusión de cloruros .....	99
<b>CAPÍTULO 6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>101</b>

6.1	BIBLIOGRAFÍA.....	103
6.2	ANEXOS.....	112
6.2.1	<i>Diseño de concretos.....</i>	<i>112</i>
6.2.2	<i>Resultados de pruebas en concreto en estado fresco.....</i>	<i>120</i>
6.2.3	<i>Resultado de pruebas en concreto en estado endurecido.....</i>	<i>121</i>
6.2.3.1	Resistencia a compresión.....	121
6.2.3.2	Velocidad promedio de pulso ultrasónico.....	122
6.2.3.3	Contenido de cloruros.....	125
6.2.3.4	Coefficientes de difusión.....	127
6.2.3.5	Predicción de coeficientes de difusión desde el proporcionamiento de mezclado de concretos.....	129

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1:	Microfotografía de la forma de partículas de ceniza volante con aumento de 5000X (SEM).....	39
Ilustración 2:	Microfotografía de la distribución de partículas de ceniza volante con aumento de 2500X (SEM).....	39
Ilustración 3:	Microfotografía de partículas de escoria con aumento de 2100X (SEM).....	41
Ilustración 4:	Microfotografía de partículas de humo de sílice con aumento de 80,000X (SEM).....	42
Ilustración 5:	Microfotografía de partículas de arcilla con aumento de 50000X (SEM).....	43
Ilustración 6:	Prueba de revenimiento.....	82
Ilustración 7:	Obtención de temperatura.....	82
Ilustración 8:	Obtención del peso volumétrico.....	83
Ilustración 9:	Determinación del contenido de aire.....	83
Ilustración 10:	Detalle de la falla de un espécimen.....	86
Ilustración 11:	Prueba de resistencia a la compresión.....	86
Ilustración 12:	Medición de velocidad de pulso ultrasónico.....	90
Ilustración 13:	Obtención de cloruros mediante NT Build 208.....	92
Ilustración 14:	Obtención de cloruros mediante FM 5-516.....	92

## Índice de Figuras

Figura 1:	Volúmenes relativos de hierro y sus productos de reacción durante el proceso de la corrosión. ....	48
Figura 2:	Agentes que provocan la corrosión.....	48
Figura 3:	Efecto de la relación agua-cemento en la penetración de iones cloruro.....	52
Figura 4:	Efecto de consolidación inadecuada en la penetración de iones cloruro.....	53
Figura 5:	Efecto de la relación agua-cemento y la profundidad de recubrimiento en el tiempo relativo para la corrosión.....	54
Figura 6:	Propagación de ondas en el concreto.....	71

Figura 7: Diagrama metodológico de la investigación.....	73
Figura 8: Desarrollo de la resistencia a la compresión en concretos a diferentes edades (MPa).....	88
Figura 9: Velocidad de pulso ultrasónico para todos los concretos.....	91
Figura 10: Perfiles de cloruros para todos los concretos a 63 días.....	93
Figura 11: Correlación entre VPU y f'c para la mezcla HPC 0.41.....	97
Figura 12: Correlación entre VPU y f'c para la mezcla HPC 0.41-20% C.V.....	97
Figura 13: Correlación entre VPU y f'c para la mezcla HPC 0.41-20% ARC.....	97
Figura 14: Correlación entre VPU y f'c para la mezcla HPC 0.41-40% C.V.....	97
Figura 15: Correlación entre VPU y f'c para la mezcla ACI 0.48.....	97
Figura 16: Correlación entre VPU y f'c para la mezcla ACI 0.40.....	97
Figura 17: Correlación entre VPU y f'c para la mezcla ACI 0.48-20% ARC.....	98
Figura 18: Correlación entre VPU y f'c para la mezcla ABRAMS 0.55.....	98
Figura 19: Correlación entre VPU y f'c para todas las mezclas.....	99
Figura 20: Correlación entre VPU y D para todas las mezclas.....	100

## Índice de Tablas

Tabla 1: Predicción de valores de D, según Luciano y Miltenberger (1999).....	23
Tabla 2: Concretos diseñados por el método de Abrams.....	24
Tabla 3: Concretos diseñados por el método de ACI.....	24
Tabla 4: Concretos diseñados por el método de HPC sin adiciones.....	24
Tabla 5: Concretos diseñados por el método de HPC conteniendo 20% de ceniza volante.....	25
Tabla 6: Concretos diseñados por el método de HPC conteniendo 40% de ceniza volante.....	25
Tabla 7: Clasificación de la calidad del concreto por medio de la velocidad de pulso ultrasónico....	47
Tabla 8: Niveles de cloruros iniciadores de la corrosión en el concreto reforzado según varios investigadores y límites máximos de contaminación de los materiales usados en la mezcla de acuerdo a reglamentos de algunos países.....	51
Tabla 9: Factores, niveles y respuestas consideradas en el presente estudio.....	72
Tabla 10: Mezclas elaboradas en el presente estudio y número de especímenes utilizados para cada prueba.....	76
Tabla 11 Características de los agregados empleados en los concretos.....	77
Tabla 12: Densidad y composición química del cemento.....	78
Tabla 13: Densidad y composición química de ceniza volante y arcilla.....	79
Tabla 14: Características del aditivo fluidificante.....	80
Tabla 15: Resumen de materiales utilizados para elaborar 1 m3 de concreto de las mezclas en estudio.....	81
Tabla 16: Propiedades de los concretos en estado fresco.....	84
Tabla 17: Resistencia a la compresión de concretos a diferentes edades (MPa).....	86
Tabla 18: Índices de actividad puzolánica a diferentes edades en %.....	89
Tabla 19: Valores promedio de coeficientes de difusión de cloruros.....	94
Tabla 20: Contenido de cloruros medidos por NT Build 2008 y FM 5-516.....	95

<i>Nomenclatura utilizada</i>	
%Cl ppc	Porcentaje de cloruros por peso de cemento
%Cl ppco	Porcentaje de cloruros por peso de concreto
%hum	Porcentaje de humedad
a/c	Relación agua-cemento
ABR 0.55	Mezcla diseñada por el método de Abrams con a/c 0.55
ACI 0.40	Mezcla diseñada por el método de ACI con a/c 0.40
ACI 0.48	Mezcla diseñada por el método de ACI con a/c 0.48
ACI 0.48-20%ARC	Mezcla diseñada por el método de ACI teniendo un reemplazo de material cementante de 20% por arcilla natural con a/c 0.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de aluminio o Alúmina
ASTM	Norma internacional (Sociedad Americana de pruebas de materiales)
C <sub>0</sub>	Condición de frontera en la superficie expuesta
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminato tetracálcico
CaO	Óxido de calcio
CaOH	Hidróxido de calcio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CP	Cemento portland
CPC	Cemento portland compuesto
CPO	Cemento portland ordinario
CPP	Cemento portland puzolánico
CV	Ceniza volante
D	Coeficiente de difusión de cloruros (m <sup>2</sup> /s)
f'c	Resistencia a la compresión del concreto (MPa)
Fe	Hierro
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de hierro (III)
FeO	Óxido de hierro
g.e	Gravedad específica
HPC	Concreto de alto desempeño
HPC 0.41	Mezcla diseñada por el método de HPC con a/c 0.41
HPC 0.41-20%ARC	Mezcla diseñada por el método de HPC teniendo un reemplazo de material cementante de 20% por arcilla natural con a/c 0.41

<i>Nomenclatura utilizada</i>	
HPC 0.41-20%CV	Mezcla diseñada por el método de HPC teniendo un reemplazo de material cementante de 20% por ceniza volante con a/c 0.41
HPC 0.41-40%CV	Mezcla diseñada por el método de HPC teniendo un reemplazo de material cementante de 40% por ceniza volante con a/c 0.41
K <sub>2</sub> O	Óxido de potasio
m.f	Módulo de finura
MgO	Óxido de magnesio
MK	Metacaolín
MnO	Óxido de manganeso
MPa	Megapascal
mV	Milivoltios
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Oxido de fósforo (V)
pH	Potencial de hidrógeno
pvsc	Peso volumétrico seco compacto (kg/m <sup>3</sup> )
pvss	Peso volumétrico seco suelto (kg/m <sup>3</sup> )
PxC	Perdida por calcinación
SEM	Scanning Electron Microscope
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de silicio (también llamado sílice)
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titanio
tma	Tamaño máximo de agregados
VPU	Velocidad de Pulso Ultrasónico
µm	Micras (1x10 <sup>-6</sup> m)

## **Capítulo 1. Planteamiento de la investigación**

El presente capítulo contiene una breve introducción donde se contemplan diversos aspectos del concreto y del cemento; seguido del planteamiento del problema, antecedentes y justificación del presente estudio, así como los objetivos generales y específicos; finalmente se presentan las hipótesis.

### **1.1 Introducción**

En un artículo citado por Mehta y Monteiro publicado por el Scientific American en 1964, S. Brunauer y L.E Copeland, dos eminentes científicos en el campo del cemento y el concreto escribieron lo siguiente: “El material de construcción más extensamente usado es el concreto. En muchos países la proporción del consumo del concreto excede diez a uno el del acero, el consumo mundial total de concreto se ha estimado el año pasado en tres mil millones de toneladas, es decir una tonelada por cada ser humano viviente. El hombre no consume otro material, con la excepción del agua, en tan tremendas cantidades”(Mehta y Monteiro, 1998).

En su libro, Clyde E. Kesler (1980) dice: “el concreto como material de construcción, ha sido importante en el pasado, es útil actualmente, y se pronostica justamente que será indispensable en el futuro”.

Para 1998 el ritmo con el que se utilizaba el concreto no era muy diferente. Se calculó que el consumo anual del concreto en el mundo era del orden de cinco mil quinientos millones de toneladas (Mehta y Monteiro, 1998).

Actualmente, a nivel mundial el concreto es el material más utilizado en la construcción, y a menos que haya una revolución en los materiales de la construcción seguirá siéndolo (Hernández y Mendoza, 2006).

El actual uso masivo del concreto deja ver, cada vez más, los costos de reparación y de sustitución de las estructuras que se requieren por fallas del material, que se han

vertido en una parte importante del presupuesto total de la construcción de la infraestructura en diversos países.

Por ejemplo, se calculó que en los países industrialmente desarrollados, más de 40% de los recursos totales de la industria de la construcción se aplican a la reparación y al mantenimiento de las estructuras existentes, y menos de 60% a la generación de instalaciones (Mehta y Monteiro, 1998).

Es por ello que surge la necesidad de mejorar el desempeño del concreto en estado fresco y endurecido, buscando la mejora en cuanto a trabajabilidad, resistencia y sobre todo durabilidad, además de minimizar el impacto ambiental que conlleva el consumo de cemento portland. Las adiciones puzolánicas permiten al productor mejorar la mezcla de concreto para satisfacer la aplicación deseada a la vez que permite una importante reducción en el consumo de cemento portland por unidad de volumen del concreto.

Las adiciones puzolánicas pueden ser subproductos industriales o puzolanas naturales. En el primer caso permiten a la industria del concreto utilizar grandes cantidades de subproductos que de otra forma serían vertidos al ambiente como desechos; en el segundo, se emplean productos que se encuentran en la naturaleza y que requieren un mínimo de tratamiento para su empleo.

La fabricación de cemento portland es una operación intensiva de energía. En toda la Unión Europea, la producción de cemento asciende a aproximadamente 170 millones de toneladas por año. Con un consumo medio de energía equivalente a la combustión de 120 kg de carbón por tonelada de cemento, en este nivel de producción se utiliza el equivalente de 20 millones toneladas de carbón. Por consiguiente una gran cantidad de emisiones dañinas son emitidas al ambiente en el proceso de producción; un total de 0.83 tonelada de CO<sub>2</sub> es emitido por tonelada de producto terminado (80% de clinker) (CEMBUREAU,1999).

Este consumo energético al igual que las emisiones disminuyen cuando se reduce la cantidad de cemento portland utilizado en el concreto. Con el uso de materiales suplementarios puzolánicos es posible impactar en forma positiva la durabilidad inadecuada en la infraestructura existente, que se manifiesta en sí misma por el deterioro

que puede ser producto ya sea de factores externos o de causas internas en el concreto mismo. Dentro del ataque externo, la corrosión del acero de refuerzo causada por iones cloruro es una de las mayores causas de deterioro de las estructuras de concreto reforzado en muchas partes del mundo (Neville, 1999).

Por lo tanto, es necesario evaluar el efecto de adiciones industriales y naturales en el concreto como método para prevenir el ingreso de cloruros, que redunde en el desarrollo de concretos durables y que además en su producción impacten en menor medida al medio ambiente. El análisis de difusión de cloruros forma parte de los estudios de durabilidad del concreto el cual es el objeto del presente trabajo.

La presente tesis tiene como principal aportación, evaluar y estudiar el comportamiento de la adición de arcilla sin tratamiento térmico alguno en concreto; en cuanto a sus propiedades en estado fresco y endurecido, dando mayor importancia a la difusión de cloruros.

El documento está compuesto por seis capítulos. En el capítulo I se encontrará lo referente al planteamiento de la investigación, en los capítulos II y III el marco conceptual y teórico respectivamente. En el capítulo IV se abordará la descripción de materiales y métodos utilizados, y en el capítulo V se muestran los resultados. Finalmente, en el capítulo VI se presentan las conclusiones y recomendaciones.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Las estructuras de concreto reforzado son regularmente consideradas como estructuras durables con un bajo costo de mantenimiento. Sin embargo, en las últimas décadas se ha observado en el ámbito mundial, un incremento en agrietamientos y delaminaciones de elementos de concreto relacionados con la corrosión del acero de refuerzo ya sea por carbonatación o por penetración de iones cloruro. Los costos generados por el fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo en concreto utilizado en la construcción de la infraestructura, por ejemplo en los EU, para el año de 1975 fue aproximadamente de 70 billones de dólares americanos (Mehta y Monteiro, 1998); en 1991

incrementó un 42.8%, es decir, a 100 billones (Broomfield 1997); 10 años más tarde, el incremento fue de 37% dando un monto total de 137 billones (Koch, Bromgers y Thomson, 2001). Esto indica que el problema lejos de resolverse, incrementa año con año, y que los esfuerzos encaminados a resolverlo son insuficientes.

Sin embargo, los costos económicos no son los únicos generados por este problema en particular. Este fenómeno también abarca los daños ecológicos debido al alto consumo energético y grandes emisiones dañinas asociadas a la producción de cemento que deberá utilizarse en la reparación o reemplazo de las estructuras dañadas, y por supuesto la falla de una estructura implica generalmente pérdida de vidas humanas, toda vez que las edificaciones son realizadas para satisfacer necesidades humanas.

Cuando el acero embebido en concreto se corroe, se reduce la sección de la barra de acero de refuerzo, debido a que el hierro contenido en el acero reacciona con el oxígeno presente y se forma una capa de productos de corrosión (óxido o hidróxido de hierro) en el perímetro de la barra. El volumen ocupado por dicho óxido (o hidróxido) es mayor que el que ocupaba el acero original creando presiones contra el concreto que rodea al acero, esto propicia la formación de grietas y desprendimientos del concreto. Estas grietas y/o desprendimientos del recubrimiento de concreto, además de ser antiestéticas, pueden disminuir el anclaje del acero y, potencialmente, la resistencia del elemento estructural.

La situación de mayor agresividad que puede desencadenar la corrosión localizada en el acero de refuerzo del concreto es la presencia de cloruros. Existen otros iones depasivantes como los sulfuros y sulfatos, pero son menos frecuentes y peligrosos que los cloruros. El ingreso de los cloruros puede ocurrir de varias formas: del exterior a través de los poros del concreto, por la adición en la fabricación (mediante el uso de aditivos que lo contengan) o por el uso de materiales contaminados.

En México, la principal fuente de contaminación de cloruros es la sal proveniente del aerosol marino. México destaca entre los países del mundo por la extensión de sus litorales, que es de 11,122 km, exclusivamente en su parte continental, sin incluir litorales

insulares (INEGI, 2008), situación a la cual no escapa el Estado de Oaxaca sede del presente estudio con 598.7 kilómetros de litoral (INEGI, 2008).

Por otra parte en el estado de Oaxaca, el desconocimiento generalizado concerniente a la magnitud de los daños generados por el fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado es evidente. Por esta razón, el fenómeno es considerado de poca importancia tanto por constructores civiles como por personal de dependencias estatales y federales encargadas de la construcción, supervisión y mantenimiento de dichas estructuras. Por este motivo se puede encontrar con gran facilidad en diversos lugares del Estado de Oaxaca, estructuras de concreto reforzado de reciente construcción con problemas de corrosión derivados principalmente de la selección inadecuada de los componentes del concreto; así como de recubrimientos insuficientes que resistan la penetración de los iones cloruros en ese ambiente de exposición en específico.

### **1.3 Antecedentes**

Al ser la industria del cemento un alto consumidor de energía y una fuente importante de emisión de dióxido de carbono, ha creado enorme preocupación ambiental. Esto aunado a un incremento en el número de incidentes, donde las estructuras de concreto experimentan severo deterioro en medio ambientes extremos (Kuber et al.,2006), han contribuido a la reducción del consumo de cemento, y la intensificación de las investigaciones para explorar las posibilidades de aumentar la resistencia, durabilidad y reducción de la corrosión a través del uso de puzolanas y materiales cementantes suplementarios.

En el presente trabajo únicamente se analizan dos tipos; arcilla natural y ceniza volante el primer caso se desarrolla a continuación.

Los estudios sobre metacaolín en concreto son recientes. Sin embargo, su utilización como material puzolánico precede al uso del cemento. La calcinación de arcilla de caolinita es el principal origen de esta clase de material. Los romanos usaron un

material puzolánico derivado de la molienda de azulejos de arcilla y tejas cuando las tobas y las cenizas volcánicas no estaban disponibles (Papadikis y Venuat, 1968).

Mas tarde hace su aparición el suelo cemento que no es otra cosa que tierra (arcilla) apisonada a la que se le ha agregado una pequeña cantidad de cemento, alrededor del 10%. El cemento le aporta a la tierra un aumento de su resistencia y una reducción de la contracción.

Según como se mire, al suelo cemento se le puede considerar como una tierra apisonada resistente o como un concreto débil. En los 40's surge un gran interés por esta técnica constructiva, en especial a partir de las viviendas construidas en Lawrence, Kansas, en 1942. Algunos de estos edificios se levantaron con muros compactos o con bloques fabricados a mano o con unas sencillas máquinas de autoconstrucción.

Con el paso del tiempo el concreto se convirtió en el material dominante en la industria de la construcción. En años recientes la utilización de adiciones minerales en concreto, ya sean industriales (ceniza volante, escoria de alto horno y el humo de sílice) o naturales han tenido un enorme auge. En esta última clasificación la utilización de metacaolín (MK) como una puzolana para el concreto ha recibido considerable interés (Kostuch, et al, 1993). El metacaolín es un valioso material puzolánico, es un material térmicamente activado de aluminio-silicato obtenido mediante la calcinación de la arcilla caolín dentro de un rango de temperatura de 700 a 850°C (Kostuch et al, 1993). El caolín desde su forma natural puede ser notablemente impuro, incluso después de la reducción. Durante el calentamiento es esencial convertir el caolín no reactivo a metacaolín reactivo. Esta actividad puzolánica permite a este material reemplazar parte del cemento en el concreto, para incrementar su durabilidad y resistencia.

El metacaolín típicamente contiene 50-55% de  $\text{SiO}_2$  y 40-45% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y es altamente reactivo (Kuber, et al, 2006). Ha sido reportado que el reemplazo de cemento por 5-20% de MK resulta en un incremento significativo en la resistencia a la compresión para concretos de alto desempeño y morteros por encima de los 28 días, particularmente a edades tempranas (Caldarone, et al, 1994). La sustitución también resulta en una mejora en las propiedades de durabilidad del concreto, incluyendo la resistencia a la penetración

de cloruros, congelamiento, deshielo y desconchado por sales de deshielo (Caldarone, et al, 1994).

Desde 1993, Ash Grove Cement Company ha desarrollado y dirigido la manufactura de puzolanas incluyendo varias arcillas y materiales de esquisto para mejorar la durabilidad del concreto. El procesamiento de estas puzolanas para su aumento de rendimiento es conseguido por tratamiento térmico y conversión de los materiales arcillosos cristalinos a silicatos de aluminio amorfos (Barger, et al, 2001).

En el noroeste de Brasil se estudió la laterita (una variante de arcilla), como material de reemplazo de cemento, mediante la calcinación de laterita a diferentes temperaturas posteriormente mezclada con hidróxido de calcio. Los efectos de la calcinación en las fases mineralógicas así como la caracterización de los productos de hidratación fueron verificados y 700 y 800°C fueron dadas como las mejores temperaturas para la calcinación (Torres, et al, 1999).

Las arcillas calcinadas contribuyen a los cambios en la micro estructura que resulta en una muy baja permeabilidad de la matriz cementante (Barger et al., 2001).

En Bauchi, Nigeria se estudió la arcilla de los montículos de termitas (CSAMC) como material cementante de reemplazo. El estudio mostró que CSAMC es un material débilmente puzolánico (índice de actividad 77%), y puede reducir el calor de hidratación alrededor del 17% cuando el cemento fue reemplazado con 40 % con CSAMC y de igual forma mostró disminuir el tiempo de fraguado del concreto así como un incremento en la trabajabilidad. La resistencia a la compresión de mortero de mezclas conteniendo 10 % de CSAMC de reemplazo superó la mezcla de referencia cuando fue curada alrededor de 60 días. La proporción de esfuerzo a la tensión, resistencia y flexión es de aproximadamente 0.33 (Elinwa, 2005).

Kuber et al., investigó las propiedades mecánicas y el desempeño de la corrosión de acero al carbono usando metacaolín como reemplazo parcial en cemento portland ordinario (CPO). Se evaluaron la resistencia a la compresión, resistividad, velocidad de pulso ultrasónico, potencial de circuito abierto, absorción de agua y pérdida de peso; la adición tuvo un buen efecto en las propiedades mecánicas del concreto. Mediante la

incorporación de 5, 10, 15 y 20% de metacaolín, se encontró que la resistencia a la compresión aumenta con valores superiores a un 15% de sustitución, más allá de 20% disminuye. Los resultados obtenidos relacionados al estudio del comportamiento de la corrosión mostraron que como la relación de sustitución aumenta la probabilidad de corrosión disminuye. Se encontró que el porcentaje de corrosión es más bajo con una sustitución mayor a 15 % de MK; más allá del 20% mostró un ligero aumento en los valores. Se concluyó que 15% de sustitución de MK por cemento mostró tener buenas propiedades de resistencia a la corrosión, absorción de agua, resistividad y valores de VPU. Las barras de acero al carbón permanecen en condición pasiva con valores superiores al 15% de sustitución de MK, pero las barras se comportan en condición activa con 20% de adición de MK (Kuber et al., 2006).

Otro trabajo se realizó en Brasil, en donde se estudió el uso de dos tipos de arcillas: caolinita y caolín de productos originados por la industria del papel, mediante su activación para incorporarlas como puzolanas para concreto. En este estudio se encontró que el uso de las puzolanas derivadas de estos productos industriales, promueven un incremento de 40% en la resistencia mecánica de los morteros producidos con un reemplazo de 35% de cemento por metacaolin, comparado con su mortero de referencia. Ambos morteros tuvieron la misma relación  $a/(c+MK)$ . Estos resultados muestran claramente el potencial de este material para obtener concreto de alta resistencia con bajo uso de cemento (Lima y Dal, 2005).

En Oaxaca, México, se desarrolló un estudio en pastas y morteros elaborados con arcilla natural y arcilla tratada térmicamente. Se reencontró que la matriz desarrollada a la edad de siete días presentaba contracción plástica, grietas distribuidas aleatoriamente generando una matriz uniforme con un alto contenido de partículas de cemento sin hidratar como consecuencia de que las arcillas en la superficie de sus partículas fijan agua teniendo una competencia mayor con respecto a las partículas de cemento. Lo que permitió observar que la relación  $a/c$  es un condicionante al trabajar con materiales terrosos por la demanda de agua. También se encontró que la distribución del tamaño de partículas de la arcilla, influyen positivamente en la reactividad de los productos de

hidratación y en la homogeneidad de la matriz de la pasta de cemento; el comportamiento desarrollado en morteros y pastas de arcilla tratada térmicamente con niveles de incorporación del 20 y 50%, generaron un impacto positivo en el desarrollo de resistencias a 28 días. Los especímenes de pastas y mortero elaborados con arcilla natural con un 20% de incorporación presentaron una posible regresión con respecto a su resistencia mecánica (Martínez, 2007).

Por otra parte la incorporación de ceniza volante en concreto ha sido extensamente estudiada debido a los buenos resultados obtenidos. Dichos resultados se resumen a continuación desglosados en propiedades en estado fresco y endurecido.

#### *Propiedades en estado fresco*

Las mezclas de concreto que contienen ceniza volante requieren normalmente menos agua (cerca de 1 a 15% menos agua para dosis normales de cenizas) que un concreto que contenga sólo cemento portland, para un mismo asentamiento (revenimiento) del cono de Abrams (Ravina 1996b, Rahhal et al., 2004, Kosmatka et al., 2004 y Neville, 1999). Esto redundo en una mejora en la trabajabilidad, además que los concretos con ceniza volante normalmente presentan menos sangrado (exudación), segregación y un calor de hidratación más bajo que el concreto conteniendo únicamente cemento portland; el concreto que contiene la ceniza volante se puede acabar de manera igual o más fácil que el concreto que no la contiene. La influencia de la ceniza volante sobre las propiedades del concreto en estado fresco está vinculada con la forma esférica de las partículas de la ceniza volante (Ravina 1996b, Rahhal et al 2004 Neville, 1999).

El uso de ceniza volante normalmente retarda el tiempo de fraguado. El grado de retardo depende de factores como la cantidad de cemento portland, la demanda de agua, el tipo, la reactividad, dosis de ceniza volante empleada y la temperatura del concreto (Ravina 1996b, Rahhal et al., 2004, Kosmatka et al., 2004).

#### *Propiedades en estado endurecido*

La ceniza volante tiene un efecto físico de mejoramiento de la microestructura de la pasta de cemento hidratado (Rahhal et al., 2004, Neville, 1999); esto propicia el aumento de la resistencia del concreto que las contiene y su característica principal es su retraso en

el desarrollo de resistencia. Debido a su reacción puzolánica lenta el curado húmedo continuo y con temperaturas favorables puede ser necesario por periodos más largos que los normalmente requeridos, hay presencia de tanto como 50 por ciento de ceniza volante sin reaccionar después de un año (Neville, 1999). La ceniza volante generalmente reduce la permeabilidad y la absorción del concreto bien curado (Ravina 1996a, Kosmatka et al., 2004, Rahhal et al., 2004).

Una consecuencia de la reacción lenta de la ceniza volante en el concreto es que, inicialmente, éste tiene una permeabilidad más alta que el concreto referencia conteniendo únicamente cemento portland. Si embargo, con el tiempo, el concreto con ceniza volante adquiere una permeabilidad muy baja (Ravina 1996a, Chindapresirt et al., 2007, Neville, 1999). Con el paso del tiempo, productos adicionales se difunden continuamente y se precipitan dentro del sistema de poros capilares; esto da por resultado una reducción de la porosidad capilar y, consecuentemente, una estructura más fina de poros; a causa de la menor permeabilidad del concreto maduro que contiene ceniza volante, se reduce el ingreso de cloruros dentro del concreto.

A continuación se presenta en la Tabla 1 una predicción del coeficiente de difusión basada en la ecuación establecida por Luciano y Miltenberger (1999) para estimar el coeficiente de difusión de cloruros desde el conocimiento de las proporciones de mezclado y otros valores fácilmente obtenibles.

Tabla 1: Predicción de valores de  $D$ , según Luciano y Miltenberger (1999).

	<b>Mezcla</b>	<b><math>D(m^2/s)</math></b>
1	HPC 0.41	$1.43 \times 10^{-12}$
2	HPC 0.41-20% C.V.	$1.36 \times 10^{-12}$
3	HPC 0.41-20% ARC.	No aplica
4	HPC 0.41-40% C.V.	$1.30 \times 10^{-12}$
5	ACI 0.40	$1.27 \times 10^{-12}$
6	ACI 0.48	$2.01 \times 10^{-12}$
7	ACI 0.48-20% ARC.	No aplica
8	ABR 0.55	$2.81 \times 10^{-12}$

Fuente: Elaboración propia.

Esta ecuación fue desarrollada mediante análisis estadístico de una base de datos conteniendo coeficientes de difusión de cloruros para concreto obtenidos de pruebas de

migración; y tiene un uso potencial como herramienta ingenieril para optimizar el proporcionamiento de mezclas de concreto para satisfacer los criterios de diseño de vida de servicio por corrosión durante un análisis preliminar costo/beneficio (Luciano y Miltenberger, 1999).

Con base en literatura afín, se presentan en las Tablas 2 a 6 una recopilación de valores de coeficientes de difusión de cloruros basados en pruebas experimentales realizados en ambientes naturales de mezclas similares para los métodos HPC, ACI y Abrams.

Tabla 2: Concretos diseñados por el método de Abrams.

<b>Autores</b>	<b>a/c</b>	<b>D (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>CP (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Chavez, M. J. A., Buendía. R. H. (2003).	0.55	4.00x10 <sup>-11</sup>	350
Chavez, M. J. A., Buendía. R. H. (2003).	0.55	4.80x10 <sup>-11</sup>	350
Bamforth, P. (2003).	0.55	5.10x10 <sup>-11</sup>	345
Torres, A. A. (1999).	0.55	2.87x10 <sup>-11</sup>	360
Castro, Moreno y Torres (2003).	0.55	3.15x10 <sup>-11</sup>	355
Castro, Moreno y Torres (2003).	0.55	2.17x10 <sup>-11</sup>	360
Castro, Moreno y Torres (2003).	0.55	3.50x10 <sup>-11</sup>	350

Fuente: Adaptada de Flores, 2008.

Tabla 3: Concretos diseñados por el método de ACI.

<b>Autores</b>	<b>a/c</b>	<b>D (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>CP (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Chian, C., She, S. C. (2006).	0.40	1.72x10 <sup>-12</sup>	474
Chian, C., She, S. C. (2006).	0.40	1.52x10 <sup>-12</sup>	474
Chian, C., She, S. C. (2006).	0.40	1.78x10 <sup>-12</sup>	474
Chian, C., She, S. C. (2006).	0.40	2.80x10 <sup>-12</sup>	550
González, de la costera M. (1999).	0.40	1.00x10 <sup>-12</sup>	500
González, de la costera M. (1999).	0.40	2.80x10 <sup>-12</sup>	500
Luping, T., Nilsson, L. O. (1992).	0.40	1.10x10 <sup>-12</sup>	550
Luping, T., Nilsson, L. O. (1992).	0.40	2.00x10 <sup>-12</sup>	530
Yang, Chi y Huang (2002).	0.40	1.60x10 <sup>-12</sup>	530
Yang, Chi y Huang (2002).	0.40	1.73x10 <sup>-12</sup>	450
Yang, Chi y Huang (2002).	0.40	1.86x10 <sup>-12</sup>	450

Fuente: Adaptada de Flores, 2008.

Tabla 4: Concretos diseñados por el método de HPC sin adiciones.

<b>Autores</b>	<b>a/c</b>	<b>D (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>CP (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Polder, R. B. (1995).	0.41	2.00x10 <sup>-12</sup>	450
Polder, R. B. (1995).	0.41	4.40x10 <sup>-12</sup>	420
Diab, Bentur and Ben-Dor, L., (1998).	0.41	5.40x10 <sup>-12</sup>	450
Diab, Bentur and Ben-Dor, L., (1998).	0.41	2.80x10 <sup>-12</sup>	480

<b>Autores</b>	<b>a/c</b>	<b>D (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>CP (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Diab, Bentur and Ben-Dor, L., (1998).	0.41	5.00x10 <sup>-12</sup>	420
Diab, Bentur and Ben-Dor, L., (1998).	0.41	2.80x10 <sup>-12</sup>	500

Fuente: Adaptada de Flores, 2008.

Tabla 5: Concretos diseñados por el método de HPC conteniendo 20% de ceniza volante.

<b>Autores</b>	<b>a/c</b>	<b>D (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>CP (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	6.40x10 <sup>-12</sup>	340
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	3.50x10 <sup>-12</sup>	350
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	4.50x10 <sup>-12</sup>	350
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	3.40x10 <sup>-12</sup>	350
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	4.80x10 <sup>-12</sup>	350
Hooton, Pun, Kojundic, Fidjestol (1997)	0.41	4.00x10 <sup>-12</sup>	345
Hooton, Pun, Kojundic, Fidjestol (1997)	0.41	4.13x10 <sup>-12</sup>	345
Pedersen, Arnsten (1998)	0.41	4.40x10 <sup>-12</sup>	350
Pedersen, Arnsten (1998)	0.41	4.30x10 <sup>-12</sup>	350

Fuente: Adaptada de Flores, 2008.

Tabla 6: Concretos diseñados por el método de HPC conteniendo 40% de ceniza volante.

<b>Autores</b>	<b>a/c</b>	<b>D (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>CP (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	7.10x10 <sup>-12</sup>	265
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	9.60x10 <sup>-12</sup>	260
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	8.10x10 <sup>-12</sup>	265
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	8.30x10 <sup>-12</sup>	265
Yang. (2006).	0.41	7.10x10 <sup>-12</sup>	270
Yang. (2006).	0.41	7.10x10 <sup>-12</sup>	270

Fuente: Adaptada de Flores, 2008.

## 1.4 Justificación

México no escapa a la tendencia mundial en cuanto al uso de concreto como material dominante en la industria de la construcción. Un tipo de estructuras de gran importancia con las que cuenta un país son los puentes, y en México el Sistema Integral de Puentes Mexicanos (SIPUMEX) reporta la distribución de puentes por tipo de material en la siguiente forma: 68% concreto reforzado, 18% concreto presforzado, 8% concreto y acero, 4% acero, 2% mampostería y 1% estructura espacial. Estos datos arrojan que prácticamente la totalidad de esta infraestructura es factible a ser afectada por el fenómeno de la corrosión (SIPUMEX, 2008).

La dirección general de conservación de carreteras (DGCC) perteneciente a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) por medio del SIPUMEX reporta que,

los estados de la república con infraestructura de puentes más importantes, tomando en cuenta la longitud total de puente por estado (estados con longitud total mayor a 15,000 m), son Veracruz, Guerrero, Oaxaca y Michoacán, en ese orden (SIPUMEX, 2008).

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) basado en el inventario del SIPUMEX reporta a nivel nacional 330 puentes con potencialidad alta a la corrosión por cloruros (44 pertenecen al Estado de Oaxaca), 3604 puentes con potencialidad media y 2131 puentes con potencialidad baja (Martínez y Torres, 2002).

El estudio de la corrosión en estructuras de concreto reforzado en México cobra importancia, si se toma en cuenta que está prácticamente rodeado por agua de mar. Se tienen avances importantes sobre este tópico en la zona del Golfo de México; sin embargo, en la zona del Pacífico no se cuentan con estudios suficientes a la fecha (Montes, 2005).

En años recientes el concreto, material que en un momento pareció ser tan resistente y eterno como la misma roca, demostró que puede ser sensible al ataque de determinados agentes agresivos entre ellos el más importante es el ión cloruro, cuyo resultado puede llevar a la destrucción de la matriz completa de cemento. Esta deficiencia impacta enormemente en la durabilidad en conjunto de la masa de concreto reforzado y por consiguiente de la estructura en turno generando grandes daños debido a la complejidad de las edificaciones actuales.

Por otro lado el alto consumo energético y los grandes volúmenes de emisiones de gases de invernadero se convierten en amenazas a la sostenibilidad de la producción del cemento portland en los tiempos actuales. El sostenido incremento del precio de los combustibles fósiles a corto plazo, el previsible reforzamiento a escala global de las políticas impositivas a productos o producciones que contribuyan al calentamiento global (impuestos ecológicos), harán que el incremento de costos de la producción llegue a niveles prohibitivos para la industria.

De esta manera presiones de tipo ecológico, económico y de desempeño mecánico, han propiciado un desarrollo acelerado del empleo de adiciones tomando en cuenta estos aspectos para producir múltiples mejoras al desempeño del concreto en todos los ámbitos.

Este fenómeno ha generado un voluminoso trabajo de investigación sobre la durabilidad de concretos ante el ataque de sulfatos, cloruros y ácidos, así como su impacto ecológico.

Aunque los esfuerzos de la comunidad científica han dado como resultado la identificación de materiales residuales de diversas actividades industriales con gran potencial como reemplazo de material cementante (cemento portland) tales como la ceniza volante, escoria de alto horno y humo de sílice. Desafortunadamente estos materiales dejan de ser viables económicamente en zonas donde no existe dicha actividad industrial. Es por ello que surge la necesidad de buscar materiales alternativos como lo son arcillas, caolinita, caolin y metacaolin entre otros. Estos esfuerzos presentan un buen desempeño en los objetivos de trabajabilidad, resistencia y durabilidad, sin embargo tienen una característica en común, olvidan el factor ecológico debido a que en la mayoría de los estudios se considera, la activación térmica. Esto a grandes rasgos equivale a hacer cemento que indudablemente conlleva un alto consumo energético y elevadas cantidades de emisiones contaminantes. El presente trabajo colabora en ese vacío, mediante el estudio del efecto de una adición natural como es la arcilla, sin ningún proceso de activación térmica, enfocado principalmente a la resistencia a la penetración del ion cloruro. Una herramienta fundamental para evaluar esta propiedad son los perfiles de cloruros que proporcionan parámetros para predecir la vida útil de servicio de una estructura de concreto, así como para programar acciones de mantenimiento (Troconis de Rincón et al, 2004).

## **1.5 Objetivo general**

Evaluar el efecto de adiciones de origen industrial y natural en la penetración de cloruros en concreto por medio de pruebas aceleradas para determinar su posible utilización en la construcción de estructuras de concreto que sean durables.

## 1.6 Objetivos específicos

- Diseñar y elaborar concreto mediante los métodos de diseño Abrams, ACI y HPC.
- Evaluar revenimiento, temperatura, peso volumétrico y contenido de aire de cada uno de los concretos elaborados.
- Evaluar el desarrollo de la resistencia a compresión e índice de actividad puzolánica para cada concreto en estudio.
- Estimar los coeficientes de difusión de cloruros para los concretos en estudio al someterlos a un ambiente agresivo simulado.
- Estimar la velocidad de pulso ultrasónico para cada concreto elaborado.
- Validar la correlación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico.
- Establecer la correlación entre el coeficiente de difusión de cloruros y la velocidad de pulso ultrasónico.

## 1.7 Hipótesis

- La adición de arcilla como reemplazo del cemento no afecta las propiedades en estado fresco del concreto.
- La adición de arcilla como reemplazo del cemento no afecta la resistencia a la compresión del concreto que las contiene.
- El uso de arcilla como material suplementario en concreto no influye negativamente en su resistencia a la penetración de iones cloruros.
- Mediante el uso de la velocidad de pulso ultrasónico es posible estimar el coeficiente de difusión de cloruros en concreto.

## **Capítulo 2. Marco conceptual**

El presente capítulo comprende una breve recopilación de datos históricos del cemento, seguido por generalidades del concreto, clasificaciones, métodos de diseño, interacción del binomio concreto-acero y diversos aditivos empleados en su fabricación. Se presentan los conceptos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico, finalmente se contempla el fenómeno de la corrosión de concreto reforzado causado por iones cloruro así como sus niveles iniciadores evaluados por diversos autores y reglamentos.

### **2.1 Breve historia del cemento**

Los principios de la historia de los cementos se remontan hacia el año 700 a.C., los Etruscos utilizaban mezclas de puzolanas y cal para hacer un mortero; más tarde, los egipcios utilizaron yeso impuro calcinado. Los griegos y los romanos utilizaron caliza calcinada. Vitrubio, en su tratado de arquitectura, publicado un siglo a.C da una receta de un cemento “Romano”, que se obtenía, mezclando dos partes de puzolana y una parte de cal apagada. Las puzolanas procedían de las cenizas volcánicas (tobas) que se encontraban al pie del Vesubio en la región de Puzzoli, de donde proviene el término de puzolana. Los griegos utilizaban las tobas de Santorin. Posteriormente, aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas trituradas. Ese fue el primer concreto de la historia (Escalante, 2002).

Un mortero de cal no endurece bajo el agua; por lo tanto, para construcciones sumergidas en agua, los romanos mezclaban cal con ceniza volcánica o con tejas de arcilla quemada, finamente trituradas. La sílice activa y la alúmina que se encuentran en las cenizas y en las tejas se combinaban con la cal para producir lo que se conoce como cemento puzolánico (Escalante, 2002). El nombre del cemento puzolánico se utiliza hasta nuestros días para describir cementos obtenidos simplemente de moler materiales naturales a temperatura ambiente. Algunas de las estructuras romanas en las cuales la mampostería se unió con morteros, tales como el Coliseo en Roma y el Pont du Gard,

cerca del Nímes; y estructuras de concreto como el Phanteon en Roma han sobrevivido hasta la época actual, con su material cementante en buenas condiciones a pesar del tiempo transcurrido. En las ruinas de Pompeya, a menudo el mortero se encuentra menos dañado por la intemperie que la piedra blanda (Neville, 1999).

En la edad media hubo una disminución en la calidad y el uso del cemento, y sólo en el siglo XVIII se observó un progreso en el conocimiento de los cementos. En 1756, John Smeaton fue comisionado para reconstruir el faro de Eddystone, en la costa de Cornish, Inglaterra, y descubrió que el mejor mortero se obtenía cuando se mezclaban puzolanas con calizas que contenían una alta cantidad de material arcilloso. Al darse cuenta del importante papel de la arcilla, que hasta entonces no se consideraba conveniente, Smeaton fue el primero en conocer las propiedades químicas de la cal hidráulica, un material que se obtiene al quemar una mezcla de cal y arcilla. A partir de esto, se desarrollaron otros tipos de cemento hidráulico, tal como el “cemento romano” que obtuvo James Parker por calcinación de nódulos de caliza arcillosa; que vinieron a culminar en la patente del “cemento portland” que obtuvo en 1824 Joseph Aspdin. Este cemento fue preparado calentando una mezcla de arcilla finamente triturada y caliza dura en un horno, hasta eliminar el  $\text{CO}_2$ ; esta temperatura era mucho más baja que la necesaria para la formación de clinker. El prototipo del cemento moderno lo obtuvo en 1845 Isaac Johnson, quien quemó una mezcla de arcilla y caliza hasta formar clinker, con lo cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto cementante.

El nombre de cemento portland, concebido originalmente debido a la semejanza de color y calidad entre el cemento endurecido y la piedra de Portland una caliza obtenida en una cantera de Dorset, se ha conservado en todo el mundo para describir un cemento que se obtiene al mezclar minuciosamente materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina, u óxidos de fierro, quemándolos a una temperatura de formación de clinker que finalmente es molido para obtener el producto.

## **2.2 Generalidades sobre el concreto**

Las siguientes definiciones se basan en el ASTM C 125 (Standard Definition of Terms Relating to Concrete and Concrete Aggregates) y en el informe del comité ACI 116 (A Glossary of Terms in the Field of Cement and Concrete Technology): El concreto es un material compuesto que consiste esencialmente de un medio conglomerante dentro del cual se hallan embebidas partículas o fragmentos de agregados. En el concreto de cemento hidráulico, el medio conglomerante está formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua.

El agregado es el material granular, tal como la arena, la grava, la piedra triturada o la escoria de acero de alto horno, la cual además puede ser utilizada como un medio cementante para formar concreto o mortero de cemento hidráulico. El término agregado grueso, se refiere a las partículas de agregado mayores de 4.75 mm (Malla No.4) y el término agregado fino, se refiere a las partículas de agregado menores de 4.75 mm pero mayores de 75  $\mu\text{m}$  (Malla No. 200). La grava es el agregado grueso que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesamiento de concreto residual. El término arena es comúnmente utilizado para el agregado fino que resulta de la desintegración natural y de la abrasión de la roca o del procesamiento de piedra caliza deleznable. La piedra triturada es el producto que resulta del triturado industrial de piedras bola y de masas rocas.

El mortero es una mezcla de arena, cemento y agua. El mortero fluido es un material cementante y agregado, generalmente agregado fino al cual se le ha añadido suficientemente agua para producir una consistencia fluida sin segregación de sus componentes. El concreto lanzado se refiere a un mortero o concreto que se transporta neumáticamente a través de una manguera y que se proyecta sobre una superficie a alta velocidad.

El cemento es un material finamente pulverizado que no es en sí mismo conglomerante, sino que desarrolla la propiedad conglomerante como resultado de la hidratación (es decir, por las reacciones químicas entre los minerales del cemento y el

agua). Un cemento es llamado hidráulico cuando los productos de la hidratación son estables en un medio acuoso. El cemento hidráulico más comúnmente usado para hacer concreto es el cemento portland, que consiste principalmente de silicatos de calcio hidráulico. Los hidratos de silicato de calcio que se forman con la hidratación del cemento portland son los responsables principales de sus características adherentes y son estables en un medio acuoso (Mehta y Monteiro, 1998).

La definición de concreto expresada en párrafos anteriores como una mezcla del cemento hidráulico, agregados y agua, no incluye un cuarto componente: los aditivos, que casi siempre se utilizan en la práctica moderna.

Los aditivos se definen como materiales diferentes a los agregados, el cemento y el agua, que se agregan a las mezclas de concreto inmediatamente, antes o durante el mezclado. El uso de aditivos en el concreto es muy extenso en la actualidad debido a los muchos beneficios que se obtienen en su aplicación. Por ejemplo, los aditivos químicos pueden modificar el fraguado y las características de endurecimiento de la pasta de cemento al influir en la velocidad de hidratación de éste (Mehta y Monteiro, 1998).

Los aditivos para la reducción de agua pueden hacer más plástica la mezcla de concreto fresco al reducir la tensión superficial del agua; los aditivos para incluir aire pueden mejorar la durabilidad del concreto expuesto a climas fríos (Mehta y Monteiro, 1998).

## **2.3 Tipos de concreto**

Con base en su peso unitario, el concreto se puede clasificar en tres grandes categorías. El concreto que contiene arena natural y grava o agregados de roca triturada, que pesa aproximadamente  $2400 \text{ kg/m}^3$ , es conocido como concreto de peso normal y es el concreto más comúnmente utilizado para propósitos estructurales. Para aplicaciones donde se desea una relación más alta de resistencia contra peso, es posible reducir el peso unitario del concreto usando ciertos agregados naturales o procesados que tienen una densidad de masa más baja. El término concreto ligero se utiliza para un concreto

que pesa menos de  $1,800 \text{ kg/m}^3$ . Por otra parte, el concreto pesado, que se utiliza por ejemplo para escudos contra radiación, es un concreto producido con agregados de alta densidad y pesa en general más de  $3200 \text{ kg/m}^3$ .

La clasificación por resistencia del concreto que prevalece en Europa y en muchos otros países, no se practica en los Estados Unidos. Sin embargo, desde el punto de vista de diferencias distintivas en las relaciones estructura – propiedades, es útil dividir el concreto en tres categorías generales basadas en su resistencia a la compresión (Mehta y Monteiro, 1998):

- Concreto de baja resistencia: menos de 20 MPa ( $204 \text{ kgf/cm}^2$ ) de resistencia a la compresión.
- Concretos de resistencia moderada: de 20 a 40 MPa ( $204$  a  $408 \text{ kgf/cm}^2$ ) de resistencia a la compresión.
- Concreto de alta resistencia: más de 40 MPa ( $408 \text{ kgf/cm}^2$ ) de resistencia a la compresión.

El concreto de resistencia moderada es un concreto ordinario o normal, que se utiliza en la mayor parte de los trabajos estructurales. El concreto de alta resistencia se utiliza para aplicaciones especiales.

Hay numerosos concretos modificados con nombres apropiados, por ejemplo concreto reforzado con fibra, concreto de cemento expansivo y concreto modificado con latex (Mehta y Monteiro, 1998).

A su vez, el concreto se puede dividir en ordinario y de alto desempeño, el primero debe su nombre a su composición que es la de uso común la cual incluye cemento, agua, agregado fino y agregado grueso. En lo que respecta al concreto de alto desempeño se fabrica utilizando cemento, arena y agregado grueso cuidadosamente seleccionados, además de un control de calidad muy riguroso. Durante la producción el requisito principal es la baja relación agua–cemento; en ocasiones se adicionan aditivos minerales, los cuales pueden ser humo de sílice, cenizas volantes y aditivos químicos, incluyendo inhibidores de corrosión, así como acelerantes, retardantes y plastificantes. De ambos concretos en combinación o por separado está hecha la gran mayoría de la infraestructura

a nivel mundial; tal infraestructura sufre día con día diversos tipos de deterioro como puede ser mecánico, por su naturaleza del concreto y debido a agentes externos del medio. Y es aquí en este último problema en donde se enfoca el presente trabajo, esto es la corrosión causada por penetración de iones cloruros.

## **2.4 Métodos de diseño de mezclas de concreto**

Los métodos de diseño de mezclas aunque persiguen un mismo fin, que es el determinar las características requeridas del concreto que se puedan especificar, no toman en cuenta los mismos factores, es por ello que es importante conocer los fundamentos de los tres métodos más utilizados en la actualidad y más aún comparar sus ventajas y desventajas para formar una idea clara del uso apropiado de cada método en particular. Para el diseño de las mezclas de concreto en la presente investigación se utilizaron tres métodos diferentes. Los dos primeros Duff Abrams y Diseño de concreto por el método de Volúmenes absolutos (ACI) son de empleo común en el estado de Oaxaca, el tercer método de diseño, concreto de alto desempeño (HPC), se propone para estructuras de concreto con criterios de durabilidad.

### **2.4.1.1 Método de Duff Abrams**

Este método de diseño propuesto por Duff Abrams en 1918, está basado en la resistencia de diseño, en su metodología no especifica condiciones de exposición del concreto a diseñar por tanto no considera condiciones de durabilidad. El método original está basado en el uso de agregado triturado y aunque hay modificaciones de las curvas, han sido alteradas sin control; por otro lado no toma en cuenta el uso de adiciones minerales ni aditivos químicos. Además, omite la naturaleza de las partículas (forma, porosidad, textura superficial) que tiene una influencia importante en el proporcionamiento. Su empleo es práctico, debido a su simplificada metodología gráfica; sin embargo esto conlleva a la inexactitud en la determinación de las cantidades de los ingredientes. Este

método se enseña en muchas universidades y es el de mayor empleo por los profesionistas del área para diseñar mezclas en el estado de Oaxaca (López, 1999).

#### **2.4.1.2 Método de volúmenes absolutos (ACI)**

El método de diseño de volúmenes absolutos (ACI), está basado en la resistencia de diseño, tomando en cuenta las condiciones de exposición a las que estará el concreto, es decir a diferencia del método anterior tiene un enfoque de durabilidad (plantea requisitos mínimos para cada condición de exposición). Además, permite el uso de aditivos químicos como son retardantes, acelerantes y reductores de agua. El método de diseño proporciona una exactitud adecuada debida a su metodología empleada; sin embargo, tiene algunos puntos en contra como lo es el que fue diseñado para agregados triturados. Tampoco toma en cuenta la naturaleza de las partículas (forma, porosidad, textura superficial) que tienen una influencia importante en el proporcionamiento y aunque tiene algunos factores de corrección empíricos, no están bien sustentados. Esto genera deficiencias al emplear otro tipo de agregados. Su empleo es práctico, aunque es laborioso, presenta una secuencia simple y fácil de llevar a cabo (ACI 211, 1993).

#### **2.4.1.3 Método de diseño para concreto de alto desempeño (HPC)**

El método de diseño HPC es relativamente nuevo y está basado en la impermeabilidad del concreto y su estabilidad dimensional. El método considera criterios de durabilidad y permite la adición de materiales suplementarios y aditivos químicos, además este método considera para su diseño un solo tamaño de agregado sin importar la forma. En cuanto a la practicidad es bueno debido a su simplificada metodología (Mehta y Aitcin, 1990).

## 2.5 Interacción fisicoquímica del concreto y el acero

La interacción del concreto con el acero de refuerzo (o pre-esfuerzo) se basa en que el concreto provee al refuerzo una protección tanto química como física en contra de la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido (del orden de un par de nanómetros) en la superficie del acero impidiendo que el acero continúe corroyéndose (Castro, 2001). A este fenómeno se le denomina pasividad, ya que la capa de óxido evita la propagación de la corrosión del acero. Esta alcalinidad del concreto, es debida principalmente al hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{HO})_2$ ) que se forma durante la hidratación de los silicatos ( $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ) del cemento y a los álcalis (sodio y potasio), que pueden estar incorporados como sulfatos en el clinker (Mindess y Young, 1981). Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros del concreto en valores entre 12.6 y 14, es decir, en el extremo más alcalino de la escala de pH (Andrade et al., 1990). El concreto también funciona como una capa física protectora en contra de los agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) que puedan depasivar al acero e iniciar su corrosión. Sin embargo en un ambiente marino los iones cloruro del agua de mar se acumulan en la superficie del concreto y lentamente se transportan a través del recubrimiento de concreto hasta llegar al acero de refuerzo. Cuando la concentración de los iones cloruro en la superficie del acero de las armaduras alcanza valores que exceden un nivel crítico, la protección de la armadura corre el peligro de desaparecer y la corrosión puede desencadenarse (Torres y Martínez, 2001).

## 2.6 Aditivos minerales

Los aditivos minerales finamente divididos son materiales pulverizados que se agregan al concreto antes del mezclado o durante éste para mejorar o transformar algunas de las propiedades del concreto de cemento portland en estado plástico o endurecido. Estos aditivos son generalmente materiales naturales o subproductos industriales. Aunque las puzolanas en estado natural o después de activación térmica se han usado en

algunas partes del mundo, debido a razones de economía, muchos subproductos industriales se están volviendo rápidamente la fuente principal de aditivos minerales en el concreto.

Las unidades generadoras de energía que utilizan carbón como combustible y los hornos metalúrgicos que producen fierro vaciado, metal de silicio y aleaciones de ferrosilicio, son la fuente principal de subproductos que se están produciendo a razón de millones de toneladas cada año en muchos países industrializados (Kosmatka et al., 2004). No utilizar estos sub-productos representa un desperdicio del material y causa serios problemas de contaminación ambiental. Disponer de ellos como agregados para el concreto y en la construcción de bases de pavimento de carreteras, es de poco valor pues no utiliza el potencial de estos materiales puzolánicos y cementantes. Por medio de un adecuado control de calidad, grandes cantidades de varios subproductos industriales pueden incorporarse al concreto, ya sea en la forma de sustitución o como aditivos minerales. Cuando las propiedades puzolánicas y/o cementantes de un material son tales que pueden usarse como sustitución parcial de cemento portland en el concreto, esto da como resultado un ahorro significativo de energía y de costos.

Los aditivos minerales son clasificados de acuerdo a sus propiedades químicas o físicas de la siguiente manera.

**Materiales cementantes:** Los materiales cementantes son sustancias que por sí solas tienen propiedades hidráulicas cementantes (fragan y endurecen en presencia de agua). Los materiales cementantes incluyen a la escoria granulada de alto horno molida, al cemento natural, a la cal hidráulica hidratada, y a las combinaciones de estos y otros materiales.

**Puzolanas:** Una puzolana es un material silíceo o aluminosilíceo que por sí mismo posee poco o ningún valor cementante pero que, en forma finamente molida y en presencia del agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento portland para formar compuestos que poseen propiedades cementantes (Kosmatka et al., 2004). Como puzolanas se emplean un gran número de

materiales naturales; las tierras diatomáceas, los horsteno opalinos, las arcillas, las pizarras, las tobas volcánicas y la piedra pómez.

**Materiales cementantes y puzolánicos:** Algunas escorias granuladas de alto horno molidas y también algunas cenizas volantes, exhiben propiedades tanto puzolánicas como cementantes.

**Materiales nominalmente inertes:** Los materiales nominalmente inertes tienen pocas o nulas propiedades cementantes. Algunos de estos son el cuarzo en bruto finamente dividido, las dolomitas, varios tipos de calizas, el mármol, el granito y otros materiales (Kosmatka et al., 2004).

## 2.7 Cenizas volantes

La ceniza volante es un subproducto de la combustión de carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad y es el material suplementario más utilizado en los Estados Unidos (Kosmatka et al., 2004). La ceniza volante es un polvo finamente dividido parecido al cemento portland. La mayoría de las partículas de ceniza volante son esféricas y algunas son cenosferas huecas. También se pueden presentar en la forma de plerosferas, que son esferas que contienen esferas de menor tamaño en su interior (Ilustración 1). Los materiales molidos, como el cemento portland, tienen partículas sólidas angulares. Los tamaños de las partículas de la ceniza volante varían de menos de 1  $\mu\text{m}$  hasta más de 100  $\mu\text{m}$  (Ilustración 2), siendo el tamaño de una partícula típica de 20  $\mu\text{m}$ ; sólo del 10 al 30% de la masa de las partículas es mayor que 45  $\mu\text{m}$  (Kosmatka et al., 2004). La ceniza volante es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Los constituyentes menores son magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono. Los compuestos cristalinos están presentes en pequeñas cantidades. La gravedad específica de la ceniza volante normalmente varía de 1.9 a 2.8 y el color es generalmente gris o marrón (Kosmatka et al., 2004).

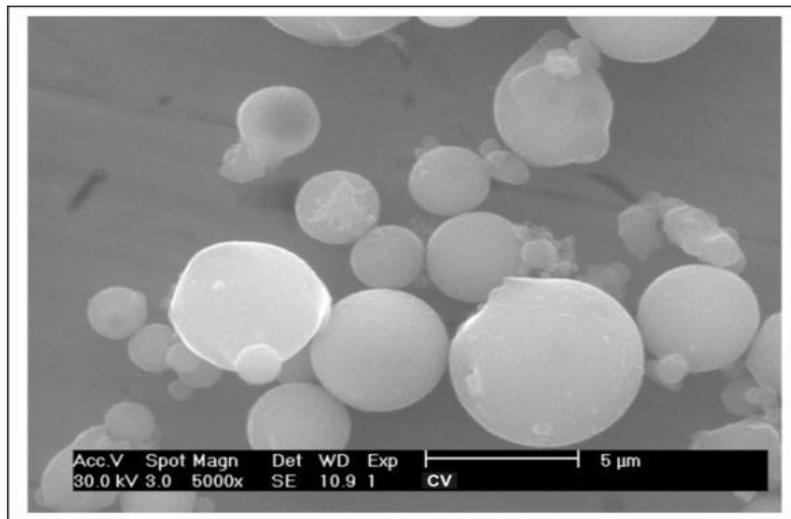


Ilustración 1: Microfotografía de la forma de partículas de ceniza volante con aumento de 5000X (SEM).

Fuente: Martínez, 2007.

Las cenizas volantes Clase F y Clase C de acuerdo a la norma ASTM C 618 se emplean comúnmente como aditivos (adiciones) puzolánicos en concretos de uso universal. Los materiales de Clase F son normalmente cenizas volantes con bajo contenido de calcio (menos del 10% de CaO) y contenido de carbono menor que 5%, pero algunas pueden contener hasta 10% de este último.

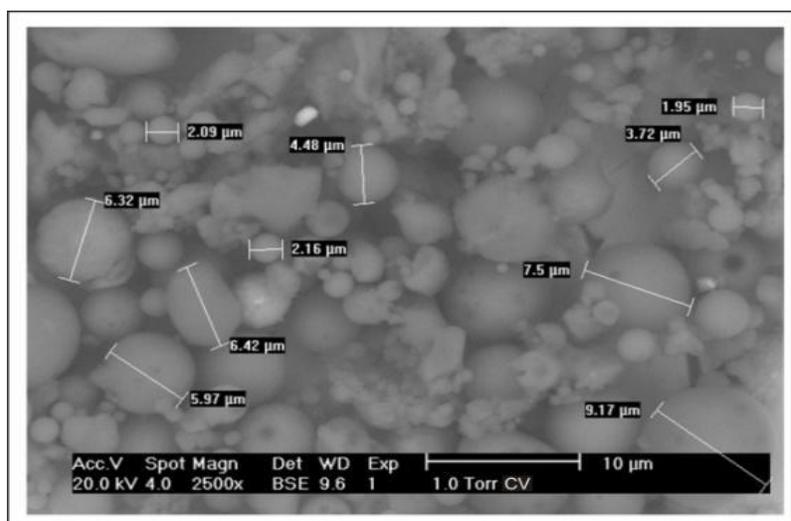


Ilustración 2: Microfotografía de la distribución de partículas de ceniza volante con aumento de 2500X (SEM).

Fuente: Martínez, 2007.

Los materiales de la Clase C normalmente presentan alto contenido de calcio (del 10% al 30% de CaO) y contenido de carbono menor que 2%. Muchas de las cenizas volantes de la Clase C cuando se exponen al agua, se hidratan y se endurecen en menos de 45 minutos. Algunas cenizas volantes se encuadran en ambas Clases F y C. La ceniza volante se emplea en cerca del 50% de los concretos premezclados de los Estados Unidos (Kosmatka et al., 2004).

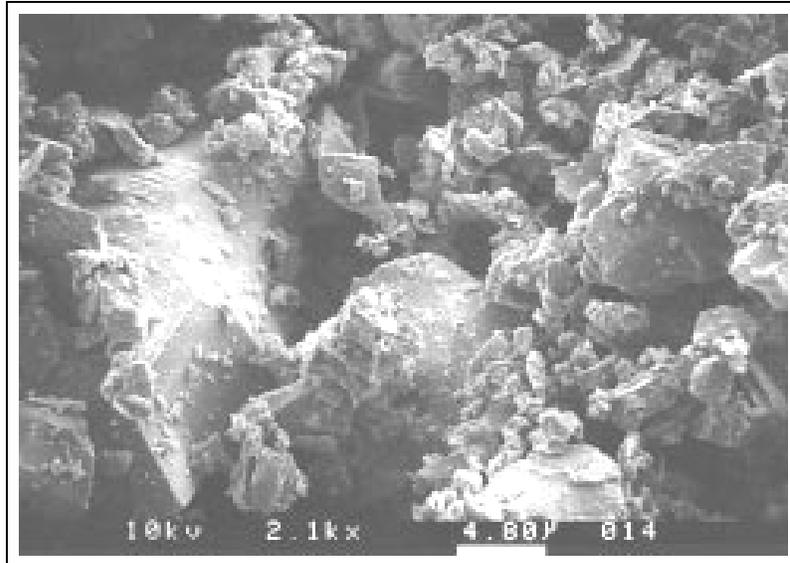
La ceniza volante Clase F se usa con una dosis del 15% al 25% de la masa del material cementante y la ceniza volante Clase C con una dosis del 15% al 40% de la masa del material cementante. La dosificación varía con la reactividad de la ceniza volante y con los efectos deseados en el concreto (Helmuth 1987, ACI 232 1996).

## **2.8 Escoria**

La escoria granulada de alto horno molida, también llamada cemento de escoria, se produce de la escoria siderúrgica de alto horno, la cual es un cemento hidráulico no metálico que consiste básicamente en silicatos y aluminosilicatos de calcio. Este producto se desarrolla en el estado fundido simultáneamente con el acero en un horno.

La escoria fundida a una temperatura cercana de 1500°C (2730°F) se enfría rápidamente y se apaga en el agua para formar un material granulado vítreo, el cual es molido hasta menos de 45 µm. La gravedad específica para la escoria granulada de alto horno molida es de 2.85 a 2.95 y la masa unitaria varía de 1050 a 1375 kg/m<sup>3</sup> (66 a 86 lb/pie<sup>3</sup>) (Kosmatka et al., 2004). La escoria granulada es áspera y tiene forma angular (Ilustración 3). En presencia del agua y de un activador, NaOH o CaOH, ambos suministrados por el cemento portland, la escoria se hidrata y se endurece de una manera similar al cemento portland. Sin embargo, las escorias enfriadas al aire no presentan las propiedades hidráulicas de las escorias enfriadas por agua. La escoria granulada de alto horno molida, cuando es empleada en los concretos para uso general en los Estados Unidos, normalmente constituye del 30% al 45% de la masa del material cementante en la

mezcla, pero algunos concretos de escoria tienen 70% o más de escoria (Kosmatka et al., 2004).



*Ilustración 3: Microfotografía de partículas de escoria con aumento de 2100X (SEM).*

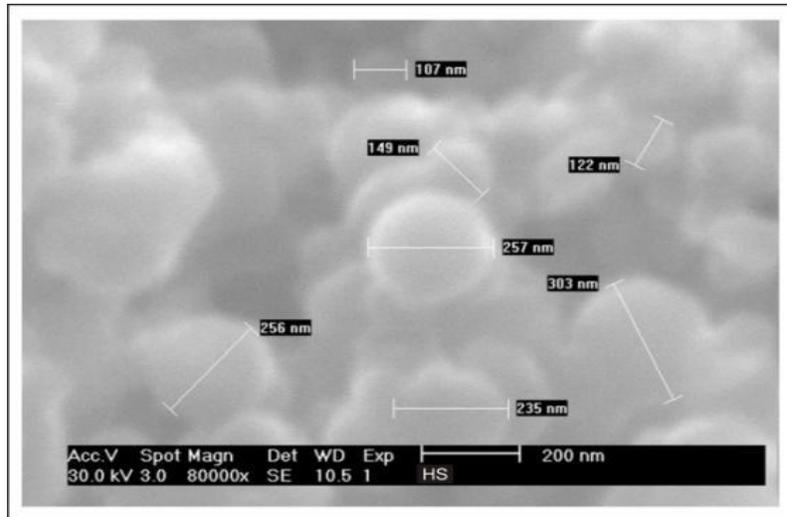
*Fuente: Kosmatka et al., 2004.*

## 2.9 Humo de sílice

El humo de sílice, también llamado microsílíce, humo de sílice condensado o sílice activa, es un subproducto que se usa como una puzolana. Este subproducto es el resultado de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferrosilicio.

El humo de sílice se desprende como un vapor oxidado de los hornos a 2000°C (3620°F). Cuando se enfría, el humo se condensa y se colecta. El humo de sílice condensado se procesa para removerle las impurezas y para controlar el tamaño de las partículas. El humo de sílice condensado es básicamente dióxido de silicio (normalmente más del 85%) en una forma no cristalina (amorfa). Por ser un material transportado por el aire, tal como la ceniza volante, presenta una forma esférica (Ilustración 4). Se trata de un material extremadamente fino, con partículas con menos de 1 mm. de diámetro y con

diámetro promedio de cerca de 0.1  $\mu\text{m}$ , aproximadamente cien veces menor que el promedio de las partículas de cemento (Kosmatka et al., 2004).



*Ilustración 4: Microfotografía de partículas de humo de sílice con aumento de 80,000X (SEM).*

*Fuente: Martínez, 2007.*

La gravedad específica del humo de sílice es generalmente de 2.20 a 2.5, mientras que la masa gravedad específica del cemento portland es aproximadamente de 3.15. La masa unitaria del humo de sílice varía de 130 a 430  $\text{kg}/\text{m}^3$  (8 a 27  $\text{lb}/\text{pie}^3$ ) y se vende en forma de polvo pero es más comúnmente encontrado en la forma líquida en Estados Unidos. El humo de sílice se usa en cantidades que varían del 5% al 10% de la masa total de material cementante. Se emplea donde sea necesario un alto grado de impermeabilidad y alta resistencia del concreto (Kosmatka et al., 2004).

## 2.10 Puzolanas naturales

Las puzolanas naturales (Ilustración 5) son utilizadas en forma general para controlar el aumento de la temperatura en concreto masivo y actuar como material cementante, también se usan para mejorar la resistencia al ataque de sulfatos así como para controlar, la reacción álcali-agregado y reducir la permeabilidad. Las puzolanas naturales comúnmente empleadas son materiales tratados por altas temperatura en

hornos y después se muelen hasta que se transformen en un polvo fino. Estos materiales incluyen arcillas calcinadas, esquisto calcinado y metacaolinita. Las arcillas calcinadas se emplean en construcciones en concreto para uso universal, de la misma manera que las otras puzolanas.

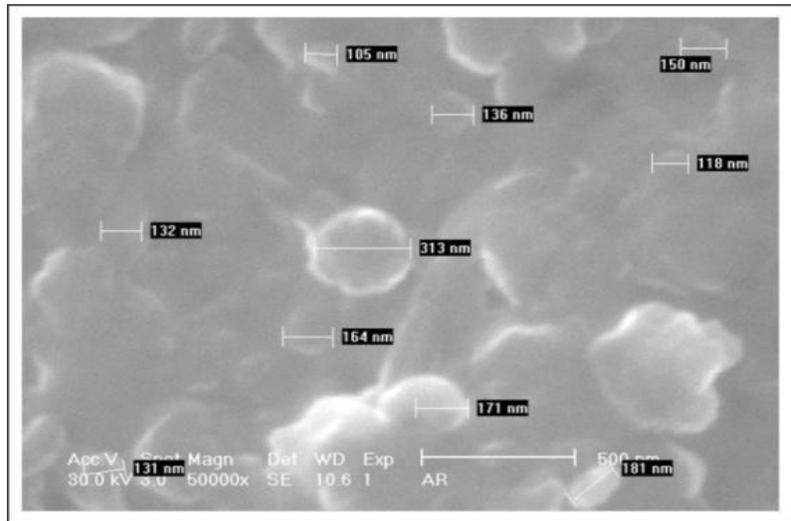


Ilustración 5: Microfotografía de partículas de arcilla con aumento de 50000X (SEM).

Fuente: Martínez 2007.

Su gravedad específica es de 2.40 a 2.61. El esquisto calcinado puede contener del 5% al 10% de calcio, resultando en un material con alguna propiedad cementante o hidráulica. Debido a la cantidad de calcita residual, la cual no es totalmente calcinada, y a las moléculas de agua adsorbida en el mineral de arcilla, el esquisto calcinado tiene una pérdida por ignición del 1% al 5%. La pérdida por ignición del esquisto calcinado no es una medida o indicación de la cantidad de carbono, como podría ser en la ceniza volante. La metacaolinita, una arcilla calcinada especial, se produce por la calcinación a baja temperatura de la arcilla caolin de alta pureza. El producto se muele hasta un tamaño de partícula promedio de 1 a 2 micrómetros. La metacaolinita se usa en aplicaciones especiales, donde se necesite baja permeabilidad y muy alta resistencia. En estas aplicaciones, la metacaolinita se usa mucho más como un aditivo (adición) al concreto que como un sustituto del cemento. La adición típica es de aproximadamente 10% de la masa del cemento (Kosmatka et al., 2004).

## **2.11 Resistencia a la compresión del concreto**

La resistencia a la compresión del concreto es la propiedad más apreciada por los diseñadores y por los ingenieros de control de calidad, por la importancia intrínseca de la resistencia a la compresión del concreto en el diseño estructural.

La resistencia de un material se define como la habilidad para resistir esfuerzos sin fallar. La falla se identifica algunas veces con la aparición de grietas. Sin embargo, debe hacerse notar que a diferencia de la mayoría de los materiales estructurales, el concreto contiene grietas finas aún antes de estar sujeto a esfuerzos externos. En el concreto por lo tanto, la resistencia se relaciona con el esfuerzo requerido para causar fractura y es sinónimo del grado de falla en el que el esfuerzo aplicado alcanza su valor máximo. En la compresión, la pieza probada se considera que ha fallado cuando, no habiendo señas de fractura externa visibles, el agrietamiento interno es tan avanzado que el espécimen es incapaz de soportar una carga mayor sin fracturarse (Mehta y Monteiro, 1998).

En el diseño del concreto y en el control de calidad, la resistencia es la propiedad que mayormente se especifica. Esto es debido a que en comparación con la mayoría de las otras propiedades, la prueba de resistencia es relativamente fácil. Además, muchas propiedades del concreto, tales como el módulo de elasticidad, el hermetismo al agua o impermeabilidad, y la resistencia a los agentes ambientales incluyendo las aguas agresivas, están directamente relacionadas con la resistencia y pueden por lo tanto ser deducidas de los datos de resistencia (Mehta y Monteiro, 1998).

Aunque en la práctica los elementos de concreto en una estructura son sometidos en forma simultánea a una combinación de esfuerzos de compresión, tensión y cortante en dos o más direcciones; las pruebas a la compresión uniaxial son las más fáciles de realizar en el laboratorio, y la resistencia del concreto a la compresión a los 28 días determinada por una prueba estándar uniaxial a la compresión, es aceptada universalmente como un índice general de la resistencia del concreto (Mehta y Monteiro, 1998).

Los resultados de las pruebas de resistencia pueden ser afectados por variaciones en el tipo del espécimen de prueba; tamaño del espécimen; tipo de molde; curado; preparación de la superficie del extremo; rigidez de la máquina de pruebas; y rapidez de la aplicación de esfuerzo. Por esta razón, las pruebas deberán seguir una norma individual, sin desviación de los procedimientos prescritos (Neville, 1999).

Las pruebas de resistencia a la compresión en especímenes cargados de manera normal a su eje, las cuales incluyen compactación completa y curado húmedo durante un período especificado, arrojan resultados que representan la calidad potencial del concreto. Por supuesto, el concreto en la estructura puede ser inferior en realidad, por ejemplo, a causa de una compactación inadecuada, segregación, o un curado pobre. Estos efectos tienen importancia si se quiere saber cuándo debe removerse la cimbra, o cuándo puede continuar la construcción posterior, o cuándo se debe poner en servicio la estructura. Para este propósito, los especímenes de prueba deben ser curados en condiciones tan cercanamente similares como sea posible a aquéllas existentes en la estructura real. Incluso entonces, los efectos de temperatura y de humedad no serían los mismo en un espécimen de prueba que en una masa de concreto relativamente grande. La edad en la cual los especímenes en evaluación se ponen a prueba está regida por la información requerida por el diseñador. Por otro lado, los especímenes estandarizados se prueban a edades prescritas, generalmente a los 28 días con pruebas adicionales hechas con frecuencia a 3 y 7 días, y comúnmente realizadas en cubos y cilindros.

## **2.12 La técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU)**

Los ensayos no destructivos son una herramienta útil para determinar la calidad del concreto endurecido. En el caso de estructuras de dudosa calidad, ya sea afectadas por esfuerzos o ataques de elementos agresivos al concreto, es común aplicar la técnica de velocidad de pulso ultrasónico con el fin de efectuar un diagnóstico preliminar del elemento en estudio y de esta forma emitir una opinión fundada sobre la estructura, para que de ser necesario se corroboren los resultados con otro tipo de pruebas.

La medición de la velocidad de pulso ultrasónico como una alternativa de prueba no destructiva para evaluar la calidad del concreto se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años. La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman en Canadá (Malhotra y Carino 1991) y se utilizó con gran éxito desde la década de los sesentas para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas; casi simultáneamente Jones desarrolló en Inglaterra una técnica basada en el mismo principio (Solís et al., 2004).

Con dicha técnica, se pueden investigar zonas dañadas en una estructura de concreto, es posible determinar el grado de homogeneidad, la presencia de fisuras (la técnica permite determinar su profundidad e inclinación), los huecos, los cambios en el concreto debidos a diferentes causas como ataques del fuego y bioquímicos, así como también su resistencia. Para realizar la prueba de velocidad de pulso ultrasónico en un espécimen de concreto existen tres formas los cuales son por: transmisión directa, semidirecta e indirecta. Mientras sea posible deberá utilizarse la transmisión directa, ya que proporciona la máxima sensibilidad y provee una longitud de trayectoria bien definida (Solís et al., 2004).

La resistencia a la compresión del concreto puede ser obtenida con la velocidad de pulso ultrasónico obtenida en un espécimen; sin embargo, la correlación se ve afectada por el tipo de agregado, relación agregado/cemento, edad del concreto, tamaño máximo de agregado y condiciones de curado. La velocidad de pulso ultrasónico como la resistencia a la compresión del concreto disminuyen cuando se incrementa la relación agua/cemento, así mismo cuando se disminuye la relación grava/arena (Zega y Di Maio 2007).

Por otra parte, las lecturas de VPU proporcionan valores cualitativos basados en diferentes criterios existentes aplicables a concretos. Algunos de estos criterios de clasificación de calidad se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Clasificación de la calidad del concreto por medio de la velocidad de pulso ultrasónico.

Velocidad de la onda longitudinal m/seg	Condición del concreto
Más de 4575	Excelente
De 3660 a 4575	Bueno
De 3050 a 3660	Cuestionable
De 2135 a 3050	Pobre
Menos de 2135	Muy pobre

Fuente: Malhotra, 1985.

El método de velocidad de pulso ultrasónico es afectado por algunos factores, entre los que se pueden mencionar los siguientes:

**Contacto entre superficies del concreto y transductores.** Debe haber un íntimo contacto acústico; las superficies moldeadas, en general no presentan problemas y si presentan alguna rugosidad, se puede eliminar frotando con piedra de pulir. Los transductores deben apretarse contra el concreto y, para mejorar el contacto, se suele colocar una película de vaselina entre concreto y transductor.

**Longitud del recorrido.** Debido a la heterogeneidad del concreto y, para evitar sus efectos, es conveniente que el recorrido sea extenso. Para un mismo concreto, se han encontrado diferencias de velocidad de propagación, al medir distintos espesores.

**Humedad del concreto.** En general, la velocidad de propagación del sonido en el concreto aumenta a medida que su contenido de humedad es mayor.

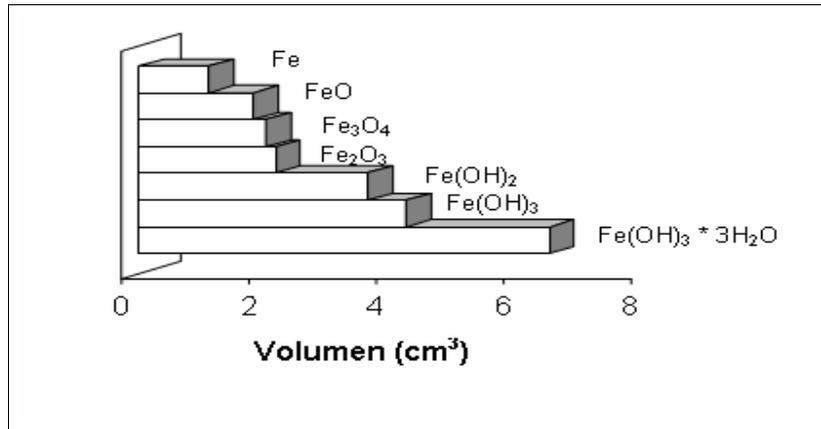
**Acero de refuerzo.** El acero de refuerzo presente en el concreto, afecta considerablemente las medidas de velocidad, debido a que en el acero la velocidad de propagación puede ser hasta 2 veces mayor que en el concreto.

En vista de la influencia de éstos, y otras variables, este método no es recomendable para determinar la resistencia del concreto. Sin embargo, es posible utilizarlo exitosamente para evaluar la uniformidad del concreto.

## 2.13 La corrosión en el concreto reforzado

La terminología del ACI define la corrosión como “la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente, que produce un deterioro del material y de sus propiedades”(ACI 222.2R-01, 2001). Para el acero

embebido en el concreto, la corrosión da como resultado la formación de óxidos que tienden a ser aproximadamente de 2 a 6 veces el volumen del acero original, y con ello la pérdida de sus propiedades mecánicas óptimas. Estos productos se muestran en la Figura 1.

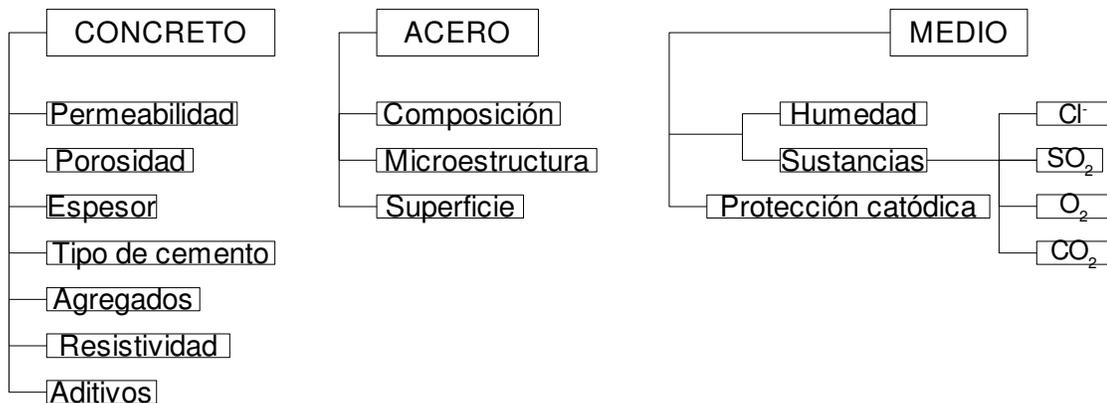


**Figura 1:** Volúmenes relativos de hierro y sus productos de reacción durante el proceso de la corrosión.

Fuente: Adaptada de ACI 222.2R-01, 2001.

La corrosión produce además descascaramiento y vacíos en la superficie del acero de refuerzo, reduciendo la capacidad resistente como resultado de la reducción de la sección transversal. La corrosión del acero de refuerzo en concreto es provocada por diversos agentes mostrados en la Figura 2 (López et al., 2006).

FACTORES QUE INTERACTÚAN PARA EL DESARROLLO DE LA CORROSIÓN



**Figura 2:** Agentes que provocan la corrosión.

Fuente: López et al., 2006.

## **2.14 Mecanismos de penetración de cloruros**

Los cloruros pueden penetrar al concreto por succión capilar del agua salada en el concreto más o menos seco a través de la red de poros. Por medio de este proceso, el agua salada puede penetrar con gran rapidez produciendo daños severos por corrosión en poco tiempo. En cambio, en las estructuras parcialmente sumergidas, los cloruros pueden penetrar principalmente por difusión, debida al gradiente de concentraciones de la solución de poro (Castro, 2001).

La exposición de concretos puede ser agrupada en dos condiciones de exposición primaria de humedad: cíclica o constante. La exposición cíclica es cuando el concreto es expuesto a ciclos de humedecimiento y secado. Bajo las condiciones de exposición cíclicas, los iones cloruro penetran en el concreto principalmente por succión capilar. Entonces la difusión se hace un mecanismo secundario de ingreso de cloruros. Para concreto expuesto a humedad constante, la difusión es el mecanismo primario para el ingreso de cloruros. Muchas estructuras están expuestas a una combinación de estas dos condiciones (Miller y Mitenberger, 2004).

## **2.15 Corrosión causada por iones cloruro**

La causa más común de la iniciación de la corrosión del acero en concreto es la presencia de los iones cloruros. Las fuentes de cloruros puede ser adiciones, contaminantes, ambientes marinos, salmuera industrial, o sales descongelantes.

Sin importar el medio de penetración de las sales, una vez presentes en el concreto, los iones cloruros se encuentran en los siguientes estados (Del Valle et al., 2001):

1. Químicamente enlazados
2. Físicamente absorbidos
3. Disueltos en agua

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

Valle et al., 2001). De esta forma se debe evaluar la situación más desfavorable es decir cloruros totales, lo cual sera llevado a cabo en la presente investigación.

## **2.16 Niveles de cloruro iniciadores de la corrosión**

Para que los cloruros rompan la capa pasivante del acero de refuerzo y comience el proceso de corrosión requieren estar en una concentración llamada nivel iniciador de la corrosión. Este valor depende de numerosos factores, por esta razón no se puede determinar un valor fijo general para todos los tipos de concreto.

Esta falta de precisión es debida a la existencia de varios parámetros que influyen el proceso, por ejemplo: proporcionamiento de la mezcla de concreto, humedad contenida en el concreto, temperatura, contenido de  $C_3A$  en el cemento, materiales de mezclado, los cuales pueden afectar en diferentes maneras, la habilidad de unión con el cemento y por lo tanto, la cantidad de cloruros libres capaces de depasivar el acero, también como el ph de la solución de poro (Alonso et al., 2000).

Otras razones para esta falta de precisión pueden ser relacionadas a la definición de umbral. Algunos autores consideran que la depasivación es producida cuando un cierto cambio en los potenciales de corrosión es producido; otros autores usan la inspección visual e identifican la depasivación con la aparición de manchas de óxido en la superficie del acero; finalmente otros autores relacionan la depasivación con un cierto nivel de corriente de corrosión. Entre éstos, algunos usan la detección del incremento en la corriente galvánica como el indicador de la depasivación y otros usan mediciones directas del valor de la corrosión para indicar la pérdida de pasividad (Alonso et al, 2000).

Sin embargo, se han desarrollado varias investigaciones para conocer el nivel de cloruros iniciadores de la corrosión. Así mismo en algunos países se han establecido límites en sus normas o reglamentos de construcción para los materiales usados en la mezcla. La Tabla 8 muestra los resultados y los niveles límite establecidos por algunos reglamentos y diversos autores (Castro, 2001).

El contenido límite de cloruros se expresa comúnmente en porcentaje por peso de cemento (%CL ppc), en porcentaje por peso de concreto (%CL pp de concreto) o en kg de Cl por m<sup>3</sup> de concreto.

Tabla 8: Niveles de cloruros iniciadores de la corrosión en el concreto reforzado según varios investigadores y límites máximos de contaminación de los materiales usados en la mezcla de acuerdo a reglamentos de algunos países.

Autor o reglamento	Año	Contenido de cloruros límite	
		(Kg/m <sup>3</sup> de concreto)	(% por peso de cemento)
Hausmann	1967	0.2-2.8	-
Clear	1976	0.81	0.2
Everett y Treadway	1980	-	0.4-1
Berke. Gau	1982	0.6-0.9	-
Comité Euro-Internacional du Beton (Europa)	1982	-	0.35-1
FHWA (Estados Unidos)	1985	-	0.3
BS-8110-1985 (Reino Unido)	1985	-	0.2-0.4*
RILEM (Francia)	1987	-	0.4
EH-88 (España)**	1988	-	0.4
Pr EN-206 (España)**	-	-	0.4
ACI-318-89 (Estados Unidos)	1989	-	0.15-0.3-1**
Roy, Liam y Northwood	1993	-	0.4
Mustafa y Yusof	1994	0.376	-
Castro y Maldonado	1994	1.0-2.0	-

Fuente: Castro, 2001.

\*El límite varía en función del tipo de cemento.

\*\*El límite varía en función de la agresividad ambiental.

El mecanismo detallado real de la disrupción de la película pasiva no se sabe debido a las dificultades en examinar el proceso en una escala atómica en las capas pasivas extremadamente delgadas. Se cree que en las películas más gruesas, los iones del cloruro se incorporan en la película en los puntos débiles localizados, creando defectos iónicos y permitiendo el transporte iónico fácil. En el caso de pasividad sub-monocapa, los iones cloruro puede competir con los iones oxidrilo en la superficie del metal, evitando en estos sitios la pasivación (ACI 222R-01, 2001).

Por otra parte los efectos de la relación agua-cemento y del grado de consolidación en el índice del ingreso de los iones de cloruros se muestran en las Figuras 3 y 4. Se encontró que el concreto con una relación agua-cemento de 0.40 resiste la penetración por

sales de descongelamiento perceptiblemente mejor que los concretos con relaciones agua-cemento de 0.50 y 0.60 (ACI 222.2R-01, 2001).

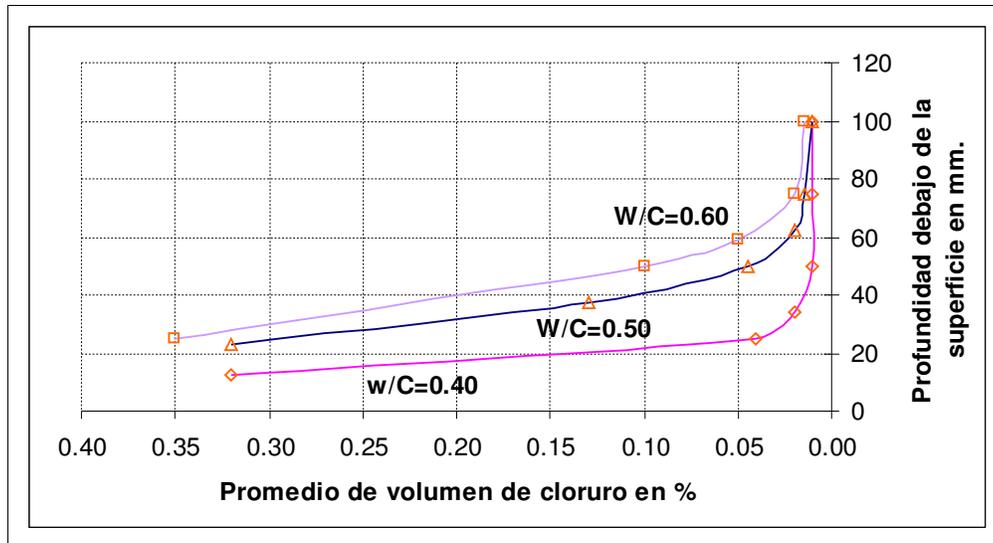


Figura 3: Efecto de la relación agua-cemento en la penetración de iones cloruro.

Fuente: Adaptada de ACI 222.2R-01, 2001).

Una relación agua-cemento baja no es, sin embargo, suficiente para asegurar una permeabilidad baja. Según lo mostrado en la figura 4, un concreto con una relación agua-cemento de 0.32 pero con una consolidación pobre es menos resistente a la penetración de iones cloruros que un concreto con una relación agua-cemento de 0.60 pero consolidado adecuadamente. El efecto combinado de relación agua-cemento y espesor de recubrimiento se muestra en la figura 5, que ilustra el número de días de rocío de sal antes de que el contenido de cloruros alcance el valor crítico (0.20 por ciento soluble en ácido) a varias profundidades. Así, 40 milímetros de recubrimiento en un concreto con una relación a/c de 0.40 son suficientes para proteger contra la corrosión el acero de refuerzo embebido en el concreto para 800 días de rocío de sal.

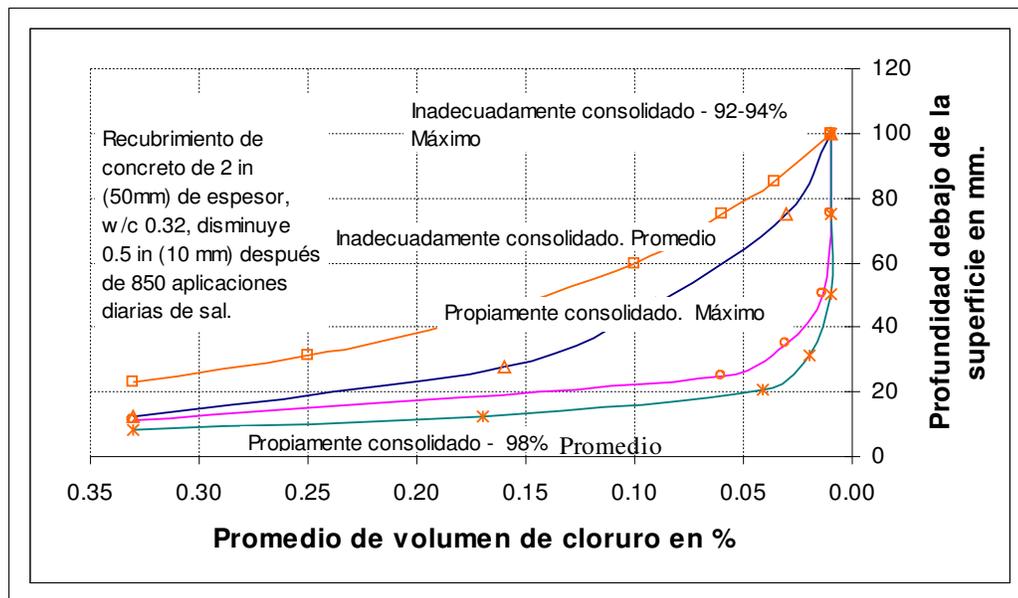


Figura 4: Efecto de consolidación inadecuada en la penetración de iones cloruro.

Fuente: Adaptada de ACI 222.2R-01, 2001.

La protección equivalente fue producida por 70 milímetros de concreto con una relación de agua-cemento de 0.50 ó 90 milímetros de concreto para una relación agua-cemento 0.60. Con base en este trabajo, el ACI 201.2R recomienda un mínimo de 50 milímetros de recubrimiento para las cubiertas de puentes si la relación agua-cemento es 0.40, y 65 milímetros si el cociente de agua-cemento es 0.45.

En algunos ambientes se puede requerir un mayor recubrimiento, o la disposición de tratamientos adicionales de protección contra la corrosión. Estas recomendaciones se pueden también aplicar a otros componentes de concreto reforzado expuestos a los iones cloruros incluso donde se especifica el recubrimiento recomendado, las prácticas de la construcción deben asegurar que la cubierta especificada se logre. La resistencia a la penetración del ión cloruro es uno de los parámetros críticos que se debe tener en cuenta en el estudio de la durabilidad de una estructura de concreto reforzado. Esta información es de gran utilidad cuando se evalúan nuevos materiales, distintas dosificaciones, el desempeño del concreto en obra, así como también para aceptar o rechazar nuevas especificaciones técnicas.

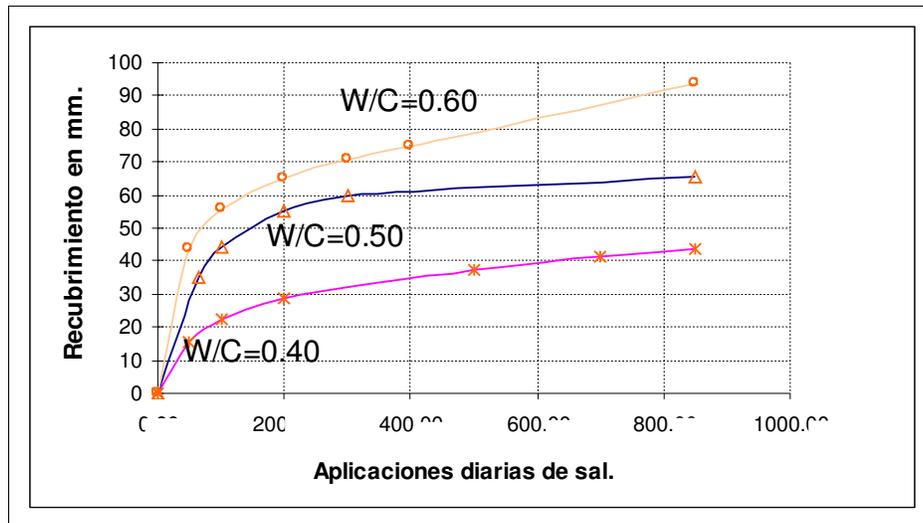


Figura 5: Efecto de la relación agua-cemento y la profundidad de recubrimiento en el tiempo relativo para la corrosión.

Fuente: Adaptada de ACI 222.2R-01, 2001.

Los cloruros que causan la corrosión del acero de refuerzo en estructuras son a menudo de origen externo durante la vida de servicio de la estructura. Por lo tanto hay una gran necesidad de evaluar la influencia de adiciones en cuanto a resistencia del concreto contra la penetración de iones cloruros y de esta forma encontrar mezclas de concreto económicas y durables, para aplicaciones medioambientales severas (Jiang et al., 2004).

## Capítulo 3. Marco teórico

El presente capítulo contiene lo referente a difusión de cloruros en concreto, así como diversos métodos de prueba para determinar la resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro; brevemente se discute acerca de todos ellos. También se presenta una recopilación de modelos complementarios a la 2da ley de Fick propuestos por diversos autores, así como métodos de ajuste de datos para determinar el coeficiente de difusión de cloruros. Finalmente se presenta la teoría referente a la velocidad de pulso ultrasónico en concreto.

### 3.1 Difusión de cloruros en concreto

Cuando en un sistema multicomponente como lo es el concreto existe un gradiente de concentraciones, se origina un flujo irreversible de materia, desde las altas concentraciones a las bajas. A este flujo se le llama difusión.

#### 3.1.1 Difusión en estado estacionario

La primera ley de Fick establece que el flujo difusivo  $J$  que atraviesa una superficie es directamente proporcional al gradiente de concentración  $dC/dx$ . El coeficiente de proporcionalidad  $D$  se llama coeficiente de difusión (Castro, 2001).

$$J = -D \frac{dC}{dx} \dots\dots\dots(1)$$

#### 3.1.2 Difusión en estado no estacionario

Si la situación es tal que la concentración varía con el tiempo, como es el caso de la gran mayoría de las estructuras de concreto, es necesario relacionar el gradiente de concentración y la velocidad con que éste varía. Esto se logra combinando la primera ley de Fick y un balance de materia de la cual surge la segunda ley de difusión de Fick.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

Donde C es la concentración de la especie, t es el tiempo de difusión, x es la distancia de difusión y D es el coeficiente de difusión de la especie a tratar.

Si la cantidad de masa a difundir por unidad de área M/A, es limitada, pequeña e inicialmente está concentrada en el origen, la distribución del material dentro de la muestra luego de un tiempo t, a una temperatura T, estará representada por la solución de la segunda ley conocida como “gaussiana” y es (Bockris y Reddy, 1979):

$$C(x, t) = \frac{M/A}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \dots \dots \dots (3)$$

Si durante todo el tiempo que dura la exposición, existe materia a difundir en la superficie de la muestra, “fuente infinita”, la distribución del material dentro de la muestra luego de un tiempo t, a una temperatura T, estará representada por la solución de la segunda ley de Fick conocida como “función error (erf)” y es (Bockris y Reddy, 1979):

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \dots \dots \dots (4)$$

Con base en ciertas hipótesis simplificadoras es posible modelar con una buena aproximación el fenómeno de difusión en el concreto con la 2ª ley de difusión de Fick (Castro, 2001).

El coeficiente obtenido mediante la segunda ley de difusión de Fick es aparente debido entre otras cosas a que en esta ecuación no se toma en cuenta la variación de la concentración en la superficie y el cambio del coeficiente de difusión con respecto al tiempo. Sin embargo la ecuación representa en forma realista el fenómeno difusivo en concreto, por lo que se emplea en la mayoría de las normas internacionales. El presente estudio no será la excepción.

La penetración de cloruros ocurre, por lo general, a través de la combinación de varios mecanismos, por lo que es importante que los modelos para simular los ataques por cloruros tengan en cuenta a la mayoría. Por ejemplo, además de un mecanismo de difusión que es relativamente lento, los cloruros pueden penetrar mucho más rápido por

fuerzas capilares, mecanismos muy propios de ambientes de brisa marina existente en climas cálidos marítimos, como el que existe en las zonas costeras del país, debido a que los cloruros están suspendidos en la niebla salina. En este fenómeno influyen mucho la dirección predominante del viento y la insolación.

## **3.2 Métodos de prueba para determinar la resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro**

Existen diversos métodos de prueba para evaluar la resistencia de penetración del ion cloruro en concreto, a continuación se presenta su clasificación, una breve descripción de su procedimiento así como sus ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

Los métodos existentes se clasifican en métodos de prueba por difusión, por migración y de conductividad.

### ***3.2.1 Métodos de prueba por difusión***

Las pruebas de difusión son el medio común para la evaluación de la difusión del ion cloruro dentro del concreto, porque este tipo de método simula un proceso de difusión natural. Basado en la naturaleza de su medida el método de prueba de difusión puede ser dividido en pruebas en estado estacionario y no estacionario.

#### **3.2.1.1 Método de prueba de difusión en estado estacionario**

Para el método de prueba en estado estacionario, un espécimen pequeño es colocado entre dos celdas. Una celda es llenada con una solución de cloruro, mientras que la otra celda es llenada con una solución saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  libre de cloruros, (celda de colección de cloruros). Durante la prueba la concentración de iones cloruro en la celda de colección es monitoreada, y la relación entre la concentración de cloruros y el tiempo es establecida cuando el estado estacionario es alcanzado, el coeficiente de difusión "D" puede ser calculado por la primera ley de difusión de Fick (Jiang et al., 2004).

### **3.2.1.2 Método de prueba de difusión en estado no estacionario (NT Build 443)**

Para el método de prueba en estado no estacionario (también llamado de acumulación o pruebas de inmersión), una superficie de un espécimen usualmente está en contacto con una solución de cloruros, las demás superficies permanecen controladas mediante impermeabilización para asegurar una difusión unidimensional. Después de un cierto periodo de tiempo, se determina el contenido de iones cloruro del concreto a diferentes profundidades desde la superficie de exposición, y el perfil de iones cloruros del espécimen de concreto es establecido. El coeficiente de difusión “D” es calculado con base en el perfil de iones cloruro, por medio de la solución propuesta por Crank a la segunda ley de difusión de Fick (Jiang et al., 2004).

En general, ambas pruebas de difusión mencionadas anteriormente, consumen demasiado tiempo y son apropiadas únicamente para investigaciones de laboratorio, y por lo tanto no son prácticas para la determinación rápida de la resistencia del concreto al ingreso de iones cloruro al emplearse en trabajos de construcción (Jiang et al., 2004).

### **3.2.2 Métodos de prueba de migración (también llamada prueba rápida de permeabilidad de cloruros)**

Para determinar la resistencia del concreto al ingreso de iones cloruro más rápidamente, se desarrolló un método de prueba (AASHTO), el cual ha ganado considerable aceptación en U.S.A. y desde entonces se han desarrollado varios otros métodos bajo el mismo principio de prueba. El principio de la prueba de migración es el movimiento acelerado de los iones cloruro por el uso de un campo eléctrico aplicado externamente (Jiang et al., 2004).

### **3.2.2.1 Métodos de prueba de migración en estado no estacionario**

#### **3.2.2.1.1 ASTM C1202 Electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**

Se usa para evaluar la resistencia del concreto a la penetración de iones cloruros. Este método de prueba mide la cantidad de carga eléctrica que ha pasado a través de un disco del espécimen de concreto saturado. La celda de origen es llenada con 3% de solución de NaCl y la celda colectora de cloruros es llenada con una solución de 0.3 N NaOH. Una diferencia de potencial de 60 V de corriente directa se mantiene atravesando del espécimen por 6 horas. Se calcula el total de carga que pasó, en coulombs. Los principales defectos de este método son:

Es sensible a la diferencia química de la solución de poro, y por lo tanto puede exagerar la eficacia de materiales cementantes suplementarios en la reducción de la permeabilidad. No hay una correlación directa entre la carga acumulada que pasa a través del espécimen y el comportamiento de transporte de cloruros. Un voltaje aplicado constantemente de 60 V puede producir una variación en la cantidad de calor dentro del espécimen y por lo tanto afectar los resultados de la prueba. Sin embargo los resultados de la prueba son razonablemente reproducibles y rápidos (Jiang et al., 2004).

#### **3.2.2.1.2 Nordtest Method NT Build 492**

En esta prueba un espécimen de concreto es expuesto a una solución concentrada de cloruro de sodio en una cara y una solución de hidróxido de sodio en la otra cara. Un potencial externo desde 10 a 60 V es aplicado atravesando el espécimen para varios periodos de tiempo que van desde 6 a 96 horas. La fuerza del potencial externo y la duración del tiempo de prueba dependen de la calidad del concreto. Después de la prueba, el espécimen es dividido en dos piezas a lo largo de su eje. Se determinan la profundidad de penetración del ion cloruro y el contenido de iones cloruro del concreto a diferentes profundidades. Basado en la profundidad de penetración de iones cloruro y la ecuación de Nernst-Plank, se calcula la difusividad de cloruros. Este tipo de método tiene

una base teórica sana y buena precisión. La duración de la prueba es relativamente corta. Sin embargo el método tiene algunas desventajas tales como: los iones cloruros ligados químicamente pueden afectar el perfil de penetración de los cloruros dentro del espécimen; la concentración de iones cloruro en el origen, en una distancia  $x$ , y en el frente de penetración representan diferentes medios y las medidas de las profundidades de penetración pueden inducir algunos errores extra (Jiang et al., 2004).

### **3.2.2.2 Métodos de prueba de migración en estado estacionario**

El arreglo de la prueba es similar al que se usa en ASTM C1202. Sin embargo, el potencial externo aplicado es reducido desde 60 V a aproximadamente 10 a 15 V.

Durante la prueba, se monitorea la concentración de iones cloruros en la celda colectora hasta que se alcanza el estado estacionario, y la relación entre la concentración de ion cloruro y el tiempo se establece. Con base en la prueba de migración en estado estacionario y las relevantes bases teóricas tales como la relación de Einstein, la ecuación de Nernts-Einstein o la ecuación simplificada de Nernst-Plank, se calcula el coeficiente de difusión de iones cloruros.

El método de la prueba de migración en estado estacionario tiene ciertas ventajas sobre la prueba de migración en estado no estacionario. Sin embargo, hay todavía desventajas prácticas para este tipo de métodos y éstas son:

No se puede predecir la duración de la prueba lo cual ocasiona que la planificación de un programa de pruebas se dificulte en algunos casos. Para concreto de alto desempeño con baja relación  $a/c$  y material cementante suplementario incorporado, la prueba puede tomar varios meses antes que sea alcanzado el estado estacionario. Esto aumenta la edad real del concreto y hace difícil la comparación relativa.

Se requiere medir la concentración de iones cloruros en la celda de colección y conocer el número de transferencia de estos iones para calcular el coeficiente de difusión.

La concentración de los iones cloruros en la solución de origen cambia con el tiempo y es difícil mantener una concentración constante de cloruros en la solución de origen durante una prueba con una duración de varios meses, (Jiang et al., 2004).

### **3.2.3 Método de conductividad**

El método de conductividad está basado en la distribución iónica durante el estado estacionario. La conductividad y la difusividad son fácilmente medidas y calculadas bajo condiciones en estado estacionario. Para acortar el periodo de prueba y reducir el efecto de la química de la solución de poro, los especímenes son saturados con una solución concentrada de cloruros en este método, de modo que la condición en estado estacionario puede ser obtenida desde el principio. El espécimen se coloca en una celda con la solución de cloruros, y la corriente pasa a través del espécimen bajo una medición de voltaje externo dado. Se calcula la conductividad utilizando la corriente, voltaje externo y tamaño del espécimen y mediante la conductividad del espécimen y la conductividad del fluido del poro, se obtiene la relación de difusión. La difusividad es una constante del material, y está definida como el cociente entre la difusividad de un ion en un material poroso al del mismo ion en la solución de poro. Mediante la multiplicación de este número con la difusividad de iones cloruro en la solución de poro se obtiene la difusividad de cloruros del medio poroso. Puede haber dos efectos de este método:

La solución de poro puede tener algún efecto en los resultados porque el número de transferencia no es igual a 1.0 y de acuerdo a la teoría de Debye-Huckel, la difusividad puede ser afectada por la concentración de iones cloruro (Jiang et al., 2004).

## **3.3 Discusión sobre los métodos de prueba para determinar la resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro**

De los diversos métodos analizados anteriormente destaca el método de prueba de migración en estado no estacionario ASTM C1202, que aunque se ha criticado durante la última década debido a su falta de bases científicas y condiciones de la comprobación limitadas, su uso es común debido a su simplicidad y al reducido tiempo de prueba (Caijun, 2003).

Hay muchos factores que pueden afectar la exactitud del procedimiento de esta prueba. Se ha encontrado que la edad y curado del espécimen de prueba afectan los

resultados dramáticamente. En general, entre mayor edad del espécimen, los coulombs medidos son más bajos, asumiendo que la muestra se ha curado propiamente. Las investigaciones también indican que la presencia en el concreto de sales iónicas puede afectar los resultados obtenidos. La presencia de estas sales (nitrito de calcio, nitrato de calcio, cloruro de calcio y tiocyanato de calcio) incrementan la cantidad de Coulombs (Caijun, 2003). En teoría la función de las sales iónicas es como un medio de transporte adicional para la carga; esto produce un elevado nivel de Coulombs aunque la permeabilidad del concreto no presente cambios.

Se sabe que el uso de materiales cementantes suplementarios, como la escoria de alto horno, ceniza volante y humo de sílice, mejora la estructura del poro y reducen permeabilidad de concreto endurecido (Caijun, 2003). Estudios indican que ellos también pueden tener un efecto significativo en la química de solución de poro del concreto endurecido. El transporte de iones en concreto depende de la estructura del poro del concreto, mientras la conductividad eléctrica del concreto así como resultados de la ASTM C1202 dependen de las características de estructura de poro y la conductividad eléctrica de solución del poro que se determina por la composición de dicha solución.

De esta forma, no es correcto usar conductividad eléctrica en el concreto para encontrar resultados de penetración de cloruros en concretos que contienen materiales suplementarios como se hará en esta investigación.

En conclusión el procedimiento de prueba ASTM C1202 no es válido para el uso con concretos que contienen el humo de sílice, ceniza volante, escoria de alto horno, así como sales iónicas (Caijun, 2003).

Los expertos han revisado la mayoría de los procedimientos existentes para la determinación de parámetros de penetración para estimar la resistencia contra la penetración de iones cloruros dentro del concreto endurecido y consideran que la prueba de difusión en estado no estacionario estandarizada por NT Build 443 es un método de prueba fiable.

En programas de evaluación de pruebas en la Universidad de Toronto se encontró que los resultados del NT Build 443 no son afectados por los iones conductivos (sales) en

la solución del poro del concreto y muestra más baja variación que la prueba de penetración rápida de cloruros (RCPT) ASTM C1202 (Caijun, 2003). Por lo tanto, se recomienda que la NT Build 443 debe estandarizarse para reemplazar RCPT y así proporcionar una evaluación válida para los diferentes tipos de concreto. Con base en lo anterior, se decidió utilizar la prueba de difusión en estado no estacionario de cloruros recomendada por Nordtest (NT Build 443) para la presente investigación.

Ahora bien las formulaciones matemáticas empleadas por la norma NT Build 443 que describen el proceso de difusión en un material tal como el concreto tienen necesariamente limitaciones, la prueba de difusión en estado no estacionario, basada en la segunda ley de difusión de Fick y la solución de ésta propuesta por Crank, tiene una serie de hipótesis simplificadoras. Por ejemplo la ley de Fick no toma en cuenta la variación del coeficiente de difusión con respecto al tiempo, así mismo dicha ecuación es válida únicamente para una dirección de flujo (Arvind et al., 2002).

De esta forma el coeficiente de difusión de cloruros calculado se considera constante, sin embargo también puede variar con la composición (equivalente a la profundidad de penetración de cloruros del concreto y el medio) (Tumidajski et al., 1995).

Tampoco toma en cuenta la variación de la concentración de cloruros en la superficie, al igual que el cambio del coeficiente de difusión de cloruros en concreto con el paso del tiempo debido al cambio del sistema de poros capilares generado por los productos de hidratación (Nokken et al., 2004).

También omite el efecto del ligado de cloruros en concreto (Martín-Pérez, et al., 2000).

Por tales razones el uso de la ley de Fick puede aparentar no ser la mejor para ser usada en la industria de la construcción, sin embargo a pesar de estas limitaciones, es más realista y contribuye a un mejor entendimiento del rol de los cloruros en concreto que otros métodos. De esta forma se puede considerar que los modelos basados en la ley de Fick proporcionan una estimación realista y razonable del contenido de cloruros en concreto que otros métodos (Arvind et al, 2002).

Por otro lado con el fin de solventar las limitaciones planteadas anteriormente diversos autores han presentado algunas adecuaciones a la segunda ley de difusión de Fick los cuales se presentan brevemente a continuación.

### 3.4 Modelos complementarios a la 2da ley de Fick propuestos por diversos autores

#### 3.4.1 Arvind y colaboradores

Sugieren que en la práctica, muchos elementos estructurales están en estado de agrietamiento bajo cargas de trabajo, y esto genera probablemente vacíos, flujos y grietas existentes en la superficie y en el interior del concreto y que aparecen desde el proceso de fabricación debido a la humedad y gradientes térmicos. Por lo tanto, en realidad la penetración de cloruros en concreto debe ser evaluada en dos direcciones (Arvind et al, 2002). Con base en lo anterior la ecuación 5 y 6 son apropiadas para estimar el coeficiente de difusión de concreto (Arvind et al, 2002).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots(5)$$

$$C(x,y,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \operatorname{erf} \left( \frac{y}{\sqrt{4Dt}} \right) \right\} \dots\dots\dots(6)$$

Donde C es la concentración de cloruros, D el coeficiente de difusión, t el tiempo de difusión, x y y la difusión en sus correspondientes sentidos, y erf la función error.

#### 3.4.2 Modelo Boltzman- Matano de difusión de cloruros

La ecuación fue inicialmente usada por Matano para calcular coeficientes de difusión en sistemas metalúrgicos.

$$D(C^*) = \frac{-1}{2t} \left( \frac{dx}{dC} \right)_{C^*} \int_0^{C^*} x dC \dots\dots\dots(7)$$

Donde: D(C\*) es el coeficiente de difusión dependiente de la concentración.

Gummerson, Hall, Hoff y Hawkes determinaron la difusión hidráulica para cemento portland ordinario usando morteros mediante la ecuación propuesta por Boltzman- Matano en el año de 1979. Esta metodología determina el coeficiente de difusión de cloruros como una función del tiempo y distancia/concentración para concreto expuesto a una solución de cloruros (Tumidajski et al., 1995).

### 3.4.3 Modelo de Mangat y Molloy

Esta ecuación toma en cuenta la influencia del tiempo en la difusividad. El coeficiente m en la ecuación es una constante y depende de variables tales como tipo de material cementante usado y el proporcionamiento de mezclado, y ha sido desarrollada para tomar en cuenta la tasa de reducción de la difusividad con el tiempo (Nokken et al., 2004).

$$D(t) = D_{ref} \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \dots\dots\dots(8)$$

Donde D(t) es el coeficiente de difusión en un tiempo t, D ref es el coeficiente de difusión en algún tiempo de referencia t ref, m es una constante (dependiente en las proporciones de mezclado)

Los valores de m para diferentes concretos en la literatura tienen que ser bien establecidos, aunque algunos valores han sido publicados (Nokken et al., 2004).

## 3.5 Métodos de ajuste de datos experimentales para determinar el coeficiente de difusión de cloruros por la segunda ley de Fick

De igual forma, cuando se emplea la prueba de difusión en estado no estacionario existen diversos métodos para ajustar los datos experimentales a la segunda ley de difusión de Fick y de esta forma determinar el coeficiente de difusión de cloruros D en concreto. Estos métodos aplican bajo los supuestos que D y C<sub>o</sub> (concentración inicial) son

constantes, es decir bajo la aplicación de la segunda ley de difusión de Fick sin modificaciones, dichos métodos se describen a continuación.

### 3.5.1 Método de simplificación lineal basado en la función error (SLEM)

El Método de simplificación lineal basado en la función error es estrictamente válido en situaciones donde ambos el coeficiente de difusión D y la concentración de cloruros  $C_0$  en la superficie del elemento estructural de concreto permanecen esencialmente como constantes (Arvind et al, 2002).

La ecuación se obtiene sustituyendo  $\alpha$  en la función error de la ecuación 9, en donde  $\alpha = \frac{1}{2\sqrt{Dt}}$ , es una constante.

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$C(x,t) = C_0 - C_0 \operatorname{erf}(\alpha x) \dots\dots\dots (10)$$

Se supone que  $C_0$  corresponde a la cantidad de cloruros solubles en ácido presentes en el concreto en el primer intervalo de muestra, y x es la distancia perpendicular desde la superficie al centro del intervalo de profundidad considerado en las demás muestras. El valor de t corresponde al tiempo total en segundos en el cual el espécimen fue mantenido con la solución acuosa de cloruro de sodio.

Ordenando términos de la ecuación 10, se obtiene la siguiente expresión:

$$\operatorname{erf}(\alpha x) = \frac{C_0 - C(x,t)}{C_0} \dots\dots\dots (11)$$

y sustituyendo

$$E(x) = \frac{C_0 - C(x,t)}{C_0}$$

Y

$$X = \alpha x$$

Se obtiene

$$\operatorname{erf}(X) = E(x) \dots\dots\dots (12)$$

El valor de E(x) se calcula entonces para todos los intervalos de profundidades.

### 3.5.2 Método gráfico

La estimación del coeficiente de difusión D desde la función error de la ecuación 9, es simplificada por el uso de las relaciones matemáticas entre la función error erf(x) y la función estándar de distribución acumulativa φ y está dada por la siguiente expresión.

$$1 - \varphi(\sqrt{2x}) = \frac{1}{2}(1 - erf(x)) \dots\dots\dots(13)$$

Reacomodando términos, esta ecuación puede ser reescrita como sigue

$$erf(x) = 2\varphi(\sqrt{2x}) - 1 \dots\dots\dots(14)$$

En forma similar, mediante un reacomodo de términos, la función error de la ecuación 9 puede también ser escrita como sigue

$$1 - erf\frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \frac{C(x,t)}{C_0} \dots\dots\dots(15)$$

Ahora, de la ecuación 14 y 15, bajo el supuesto que, el coeficiente de difusión D es una constante durante el periodo de tiempo t, y que la concentración de cloruros C(x,t) a diferentes intervalos de profundidad varían con la distancia x desde la superficie, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{C(x,t)}{2C_0} = 1 - \varphi\left(\frac{x}{\sqrt{2Dt}}\right) \dots\dots\dots(16)$$

La ecuación 16 representa la ecuación clásica y=mx+c, donde  $\frac{1}{\sqrt{2Dt}}$  representa la pendiente como una función de φ. Los valores calculados para el primer miembro de la ecuación 16, se grafican contra la distancia x en una gráfica normal de función de distribución. La pendiente (desviación estándar σ/x) de la línea resultante directamente en la gráfica es igual a

$$\frac{1}{\sqrt{2Dt}}$$

Por lo tanto, para cada distancia, la gráfica proporciona un valor de pendiente. Ahora bien, conociendo el periodo  $t$  de exposición del espécimen a la penetración de cloruros, y el valor de la pendiente de la gráfica, se calcula el valor de  $D$ .

### 3.5.3 Métodos de Newton-Raphson y ajuste de mínimos cuadrados

La solución a la segunda ley de difusión de Fick está dada por la ecuación 9 que puede ser reescrita en la forma de la ecuación 17 como sigue

$$-\left\{ \frac{C_0 - C(x,t)}{C_0} \right\} + \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = 0 \dots\dots\dots(17)$$

Sustituyendo

$$\left\{ \frac{C_0 - C(x,t)}{C_0} \right\} = B$$

$$\frac{1}{\sqrt{2Dt}} = A$$

Y

La ecuación 17 se transforma en

$$-B + \operatorname{erf}(Ax) = 0 \dots\dots\dots(18)$$

La cual puede ser resuelta por un programa, para estimar el valor del coeficiente de Difusión.

Para la presente investigación se optó por utilizar el método de ajuste de mínimos cuadrados debido a su precisión y simplicidad de aplicación en cualquier software estadístico.

## 3.6 Velocidad de pulso ultrasónico en concreto

La velocidad del pulso ultrasónico (VPU) es una herramienta que puede ser utilizada para evaluar la estructura interna de un material sólido como el concreto, la velocidad varía con respecto a las características del concreto y a la calidad de sus componentes (Solís et al., 2004). La VPU en teoría es rápida para un elemento homogéneo y lenta para un material anisótropo. En el concreto la VPU es muy variable y

depende de la densidad de la matriz del concreto, tipo de cemento, aditivos y dosificación del concreto. Es posible que la velocidad sea mayor en un concreto ordinario a edades tempranas pero menor a edades tardías comparada con un concreto de alto desempeño (Belíe et al., 2005).

### **3.6.1 Ecuación de onda**

En los métodos ultrasónicos se utilizan instrumentos que transmiten ondas por ciertos intervalos de frecuencia. La velocidad no es afectada por la frecuencia del pulso, de modo que la longitud de onda de la vibración de pulso es inversamente proporcional a la frecuencia. La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) generalmente depende solamente de las propiedades del material y las mediciones de velocidad ayudan a determinar las condiciones de tal material.

El principio teórico de la VPU es regido por la ecuación 19. La ecuación de onda describe el fenómeno ondulatorio, propagación de sonido, propagación de ondas electromagnéticas, vibración de cuerdas, barras y membranas, vibraciones producidas por terremotos, etc. Sabiendo que las ondas viajan a través de los distintos medios a una determinada velocidad (que depende de las propiedades del medio), el principio de la velocidad de pulso ultrasónico se rige mediante la ecuación general de onda de una sola dimensión.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (19)$$

Donde  $\partial^2 u / \partial t^2$  corresponde al desplazamiento con respecto al tiempo,  $\partial^2 u / \partial x^2$  al desplazamiento con respecto a un espacio y v a la velocidad.

En el presente trabajo únicamente se utilizaron los tiempos de arribo de la señal de un extremo a otro; por lo tanto, de la ecuación general que rige el fenómeno se establece una solución particular o simplificación para determinar la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto con dimensión conocida y tiempo definido por el dispositivo de medición.

Por lo tanto, para obtener dicha velocidad se utiliza la ecuación 20.

$$v = \frac{d}{t} \dots \dots \dots (20)$$

En donde v corresponde a la velocidad con la cual la señal atraviesa el concreto dada en metros/segundo, d es la longitud del espécimen de concreto dada metros y t el tiempo que tarda la señal para atravesar el espécimen de concreto en segundos.

Al utilizar ondas de sonido para detectar defectos o discontinuidades en un material se experimenta resistencia al paso de las ondas; en donde dichos límites o defectos actúan como sitios de reflexión parcial de las ondas. El concreto es un medio heterogéneo que tiene un gran número de fronteras internas y los pulsos son sometidos a atenuación incrementando el tiempo de recorrido de las señales a través del espécimen de concreto (Carrión et al., 1999).

### **3.6.2 Longitud y frecuencia de onda en concreto**

La longitud de onda es grande cuando un medio es completamente homogéneo, pero cuando existen discontinuidades dicha longitud se acorta. Por lo tanto, cuando un concreto es de menor calidad la longitud de onda es corta y el tiempo que recorre la señal de un extremo a otro es mayor.

La longitud de onda corresponde a un ciclo de onda asociada entre dos puntos máximos, hay una relación entre longitud de onda y la frecuencia producto de dicha relación es la velocidad con que se propaga la onda. Cuando la longitud de una onda es pequeña la frecuencia es grande y cuando la longitud es grande la frecuencia es pequeña.

$$\lambda = \frac{V}{F} \dots \dots \dots (21)$$

En donde  $\lambda$  corresponde a la longitud de onda, V es la velocidad y F la frecuencia. La frecuencia es el número de vibraciones o ciclos por segundo, todos los materiales tienden a actuar hasta cierto punto como un filtro al paso de la onda atenuándola o dispersándola. Las frecuencias altas se emplean comúnmente para obtener mayor información acerca de las propiedades de un material con menores dimensiones, en cambio las frecuencias bajas se emplean para obtener información en materiales de

grandes dimensiones; sin embargo no proporcionan mayor información (Santos y Vera 2005). La onda que se propaga en el concreto adquiere la forma mostrada en la Figura 6.

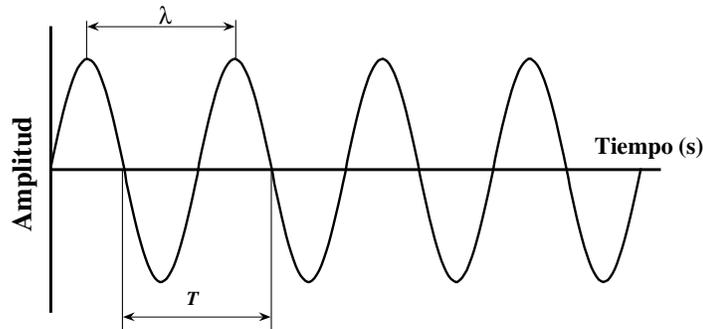


Figura 6: Propagación de ondas en el concreto.

Fuente: Carrión et al., 1999.

Cuando se realiza la prueba de VPU en el concreto la frecuencia es constante de 50 kHz la cual es proporcionada por el dispositivo empleado; de acuerdo a las propiedades de cada tipo de concreto lo que varía es la longitud de onda y como consecuencia la velocidad de arribo de la señal al otro extremo.

## Capítulo 4. Materiales y métodos

El presente capítulo describe la metodología empleada en el desarrollo de la investigación, iniciando con el diseño experimental, seguido de un diagrama metodológico. Se muestra la caracterización de materiales empleados para los especímenes de prueba y finalmente se presenta la dosificación de materiales para cada mezcla en estudio.

### 4.1 Diseño experimental

El diseño experimental que rige el presente estudio corresponde a un diseño factorial no balanceado, debido a que éste tipo de diseño es muy útil en investigaciones exploratorias en las que poco se sabe acerca de muchos factores como es el caso.

Los factores a estudiar en el desarrollo del presente trabajo así como niveles y respuestas analizadas son indicadas en la Tabla 9.

Tabla 9: Factores, niveles y respuestas consideradas en el presente estudio.

Factores	Niveles	Respuestas en estado fresco	Respuestas en estado endurecido
HPC	0.41 20% CV 20% ARC 40% CV	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revenimiento (ASTM C143/C143M-08)</li> <li>• Temperatura (ASTM C1064/C1064M-08)</li> <li>• Peso volumétrico (ASTM C138/C138M-08)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Índice de actividad puzolánica.</li> <li>• Resistencia a la compresión (ASTM C39/C39M-05e1 y C1231/C1231M-08a).</li> </ul>
ACI	0.40 0.48 0.48-20% ARC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contenido de aire (ASTM C231-08b)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C597-02).</li> </ul>
Abrams	0.55		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de difusión de cloruros (NT BUILD 208, 443 y FM 5-516).</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7 se presenta el diagrama metodológico de la investigación.

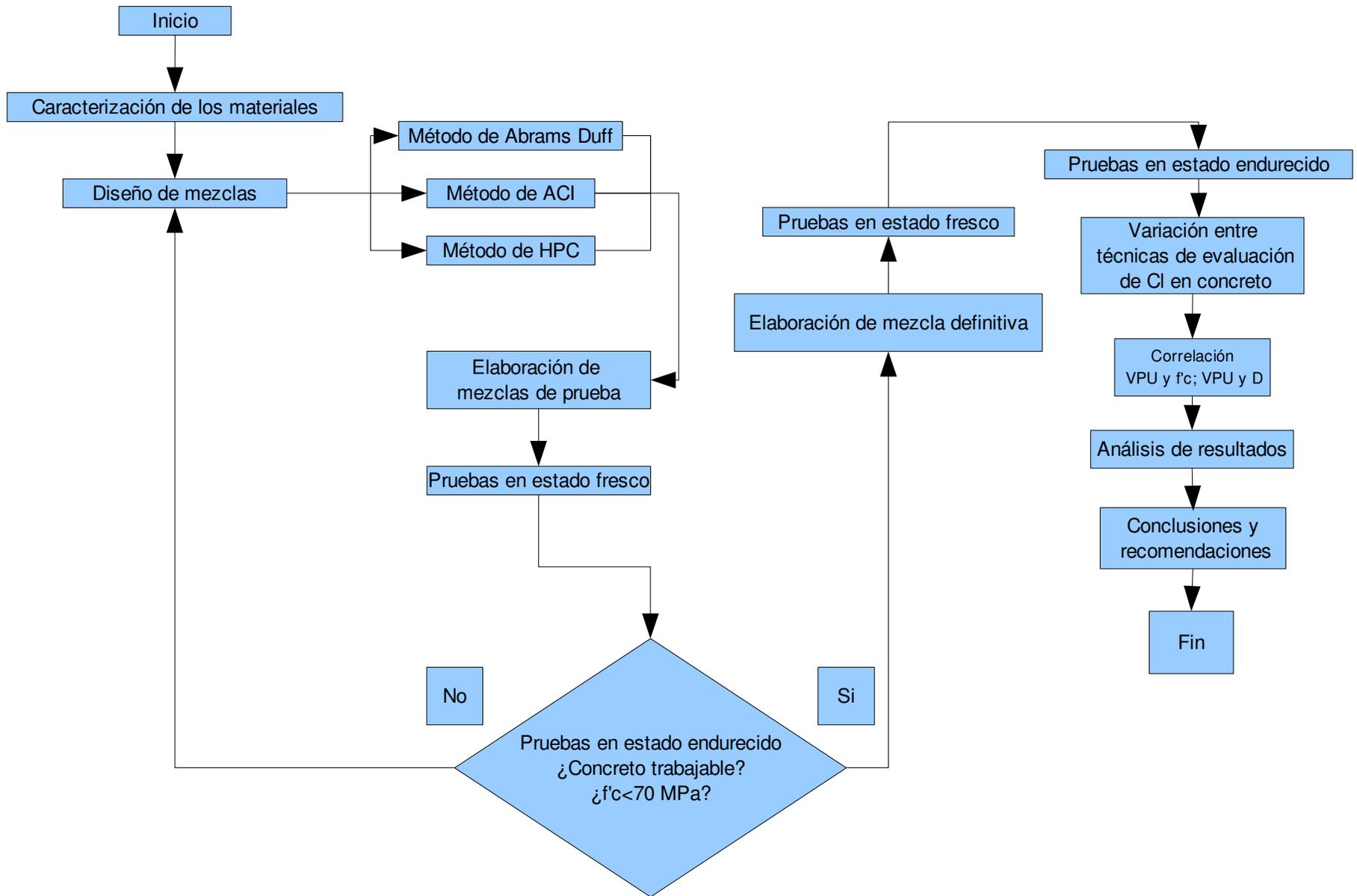


Figura 7: Diagrama metodológico de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

El diseño del experimento gira en torno a premisas que son de suma importancia al momento de evaluar el desempeño de un concreto, tales premisas son: durabilidad, resistencia, ecología y economía. Los métodos de diseño de mezclas de concreto, factores en esta investigación son los de mayor uso en la industria de la construcción actual, debido al respaldo experimental que los sustenta y que, por sus características pueden ser en lo particular la solución adecuada en función de los requisitos en un diseño en específico.

El factor HPC cumple con todas las premisas a evaluar, debido a esto es la base del presente estudio, el resto corresponde a factores referencia del mismo, En el caso del factor ACI presenta deficiencias en el apartado de economía y ecología. El factor Abrams tiene como único atributo la resistencia. El nivel 0.41(HPC) y 0.40 (ACI) corresponden a concretos de alta calidad, el nivel 0.48 (ACI) a un concreto de calidad regular, finalmente 0.55 (Abrams) a un concreto de baja calidad. Los niveles 0.41(HPC) y 0.40 (ACI) corresponden a concretos de alta calidad comparables entre métodos de diseño en cuanto a resistencia. Los niveles 20% ARC y 0.48-20% ARC corresponden a un concreto de alta calidad y a uno de calidad regular, el porcentaje de sustitución corresponde al óptimo para la ceniza volante que será tomado como base de comparación para el comportamiento de la arcilla. Finalmente Los niveles 20% CV Y 40% CV corresponden a concretos de alta calidad con una sustitución de cemento por ceniza volante de 20 y 40% respectivamente, y que ha demostrado en múltiples investigaciones un buen desempeño en cuanto a resistencia a la penetración de iones cloruro, así como de resistencia a la compresión (Neville, 1999).

Las relaciones a/c planteadas en los niveles obedecen a concretos de uso estructural de empleo en regiones sísmicas como es el caso de la sede del presente estudio; tales concretos deberán tener una resistencia menor a 70 MPa.

Los resultados de las pruebas en estado fresco se obtuvieron inmediatamente después de elaborar el concreto y sirvieron para validar los resultados finales de la investigación. Por otra parte, las pruebas en estado endurecido correspondientes a la resistencia a la compresión se efectuaron a las edades de 1, 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días; con

la finalidad de analizar a mayor detalle el comportamiento de las adiciones utilizadas en el presente estudio se establece el índice de actividad puzolánica para cada edad de prueba antes mencionada. En lo que concierne a la toma de velocidad de pulso ultrasónico, fue evaluada diariamente por un periodo de 90 días. El coeficiente de difusión de cloruros se determinó a una edad de 63 días siguiendo la norma NT Build 443, dicha norma establece como edad mínima de prueba 28 días, una vez cumplido este requisito un espécimen de concreto saturado en agua se expone a una superficie plana que contenga cloruro de sodio con una concentración de 16.5% de NaCl por litro. Después de un tiempo especificado de al menos 35 días de exposición se muelen capas delgadas del espécimen de 2 mm de espesor paralelas a la cara expuesta y se determina el contenido de cloruros de las capas mediante la norma NT Build 208; este método de Nordtest es utilizado para la determinación del contenido total de cloruros en concreto endurecido disolviendo el polvo del concreto en una solución del ácido nítrico seguida por la titulación de Volhard; por último se retoma NT Build 443 para determinar los perfiles de cloruros y coeficientes de difusión correspondientes.

Finalmente con el propósito de determinar la variación de los resultados obtenidos con la norma NT Build 208 (técnica colorimétrica) con otra técnica de evaluación, se optó por evaluar la capa 8 de cada espécimen en estudio según la norma FM 5-516 (técnica potenciométrica); esto se debe a que dicha capa es la de mayor susceptibilidad a errores de valoración, producto del bajo contenido de cloruros medidos.

Las mezclas elaboradas para el presente trabajo así como el número de especímenes empleados para cada prueba se señalan en la Tabla 10.

Tabla 10: Mezclas elaboradas en el presente estudio y número de especímenes utilizados para cada prueba.

	<i>Mezcla</i>	<i>Rel. a/c</i>	<i>f'c</i>	<i>VPU</i>	<i>D</i>	<i>Total</i>
1	HPC	0.41	21	2	3	26
2	HPC-20% C.V.	0.41	21	2	3	26
3	HPC-20% ARC.	0.41	21	2	3	26
4	HPC-40% C.V.	0.41	21	2	3	26
5	ACI	0.40	21	2	3	26
6	ACI	0.48	21	2	3	26
7	ACI-20% ARC.	0.48	21	2	3	26
8	Abrams	0.55	21	2	3	26
		Total	168	16	24	

Fuente: Elaboración propia.

Los especímenes utilizados para evaluar la resistencia a la compresión ( $f'c$ ), velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y coeficiente de difusión (D) fueron cilindros de 10x 20 cm.

## 4.2 Materiales

A continuación se muestran las características de los materiales empleados para la elaboración de los concretos en estudio. Los resultados fueron obtenidos en un laboratorio perteneciente al CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca. Otros más fueron determinados en el laboratorio del Servicio Geológico Mexicano sede Oaxaca empleando los métodos de gravimetría y plasma óptico.

### 4.2.1 Características de los agregados

El agregado grueso se obtuvo de un banco de caliza que se ubica en la comunidad de Santa María el tule, Oaxaca. El material es triturado con un tamaño máximo de agregado de  $\frac{3}{4}$ ". En lo que corresponde al agregado fino se adquirió de la comunidad de San Lorenzo Cacaotepec Oaxaca, dicho material proviene del lecho del Río Atoyac.

La caracterización de los agregados se realizó conforme a normas ASTM C29/C29M-07, C33-07, C70-06, C125-07, C127-07, C127-07, C128-07a y C136-06. En la Tabla 11 se presentan los resultados.

Tabla 11 Características de los agregados empleados en los concretos.

<b>material</b>	<b>pvss (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>pvsc (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>g.e</b>	<b>% abs.</b>	<b>% hum.</b>	<b>m.f.</b>	<b>tma</b>
grava	1354.55	1477.48	2.7	0.57	0.13		3/4
arena	1480.25	1644.01	2.64	1.83	1.48	3.05	

Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.2 Características del agua

Para el mezclado del concreto así como para el curado del mismo se utilizó agua destilada marca Hycel que cumple lo normado en ASTM C94/C94M-07. Bajo análisis del laboratorio de análisis de aguas perteneciente al CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca, se encontró 2.20 mg Cl/l. El método empleado para este análisis esta normado bajo NMX-AA-073-SCFI-2001.

### 4.2.3 Características del cemento

El aglomerante empleado para esta investigación corresponde al cemento portland compuesto Holcim Apasco clase resistente 30 de resistencia rápida (CPC 30R) de fabricación mexicana. Bajo el análisis de composición química (véase Tabla 12), se encontró un alto contenido de óxido de calcio (64.75 %) y bajo contenido de óxido de silicio (16.46 %). Para determinar la clasificación del cemento utilizado conforme ASTM se acudió a la literatura (Ramachandran y Feldman, 2000) y se comparó la cantidad de óxidos presentes en la composición química. La literatura establece un rango para establecer dichas clasificaciones, cuando el óxido de silicio se encuentra entre (16.4 a 22.0 %) y el óxido de calcio entre (60.6 a 66.3 %) se trata de un cemento puzolánico en donde el contenido de puzolanas es menor a 15 % de la masa del cemento final. Por lo tanto, de acuerdo al rango de óxidos recomendados el cemento utilizado fue puzolánico tipo I según ASTM C150-07 y se puede emplear en construcciones de concreto en general. Para evaluar la densidad del cemento se utilizó la norma ASTM C188-95.

Tabla 12: Densidad y composición química del cemento.

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe Total	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PxC a 950 °C	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
CPC	3.02	5.16	64.75	2	1.43	1.28	0.62	1.66	0.04	1.88	0.08	5.67	16.46	0.14

Fuente: Martínez, 2007.

### 4.2.4 Características de la arcilla natural

El material arcilloso fue extraído en situ en la comunidad de Ajalpan Puebla, la cual se localiza en la parte sureste del estado con las coordenadas geográficas en los paralelos 18° 21'12"y 18°30'00" de latitud norte, y los meridianos 96°58'00"y 97°18'18" de longitud occidental.

La composición química así como su densidad son mostradas en la Tabla 13. La suma de óxidos mayores (SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de la arcilla es de 65.83% valor muy cercano al 70% establecido en la norma ASTM C618-08 para considerar a un material con potencial puzolánico.

En el caso de ceniza volante fue de 84.46%. Lo anterior permite suponer el uso de la arcilla como material puzolánico.

Tabla 13: Densidad y composición química de ceniza volante y arcilla.

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe Total	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PxCa 950 °C	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
Arcilla cruda	2.9	10.09	13.45	2.5	0.82	2.47	1.46	2.28	0.01	2.64	0.13	11.06	54.92	0.52
Ceniza Volátil	2.6	20.58	4.83	3.50	2.78	2.11	1.3	1.2	0.05	1.28	0.22	3.69	61.1	0.72

Fuente: Martínez, 2007.

#### 4.2.5 Características de la ceniza volante

Según la tabla 13, la ceniza volante utilizada tiene un bajo contenido de óxido de calcio 4.83 % y alto contenido de óxido de silicio 61.1%. Con base en lo anterior es posible clasificarla como tipo F de acuerdo a la norma ASTM C618-08. La suma de los óxidos mayores (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) es igual a 84.46%, siendo mayor al 70% que marca a norma. Esto confirma que se trata de un material puzolánico, el cual contribuye a mejorar las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto, teniendo como característica propia del material la mejora a edades tardías.

#### 4.2.6 Características del súper plastificante

El superplastificante empleado corresponde al Plastol 4000 de la marca EUCO, es un aditivo hiperfluidificante a base de policarboxilatos formulado específicamente para concretos con baja relación agua/material cementante. Cumple con la norma ASTM C494/C494M-08 como reductor de agua de alto rango tipo F. Este aditivo no contiene iones cloruro adicionados y está formulado para cumplir con la especificaciones para aditivos de la norma ASTM C-494 y ASTM C1017/C1017M-07 como aditivo tipo I.

Tabla 14: Características del aditivo fluidificante.

Material	Generación	Tipo	Gravedad Específica (kg/l)	Contenido de sólidos	Contenido de líquido	Dosificación
Plastol 4000	4	F	1.09	30%	70%	2 a 15 cm <sup>3</sup> /kg de cemento

Fuente: Adaptada ficha técnica EUCO.

#### 4.2.7 Elaboración de mezclas de concreto

La elaboración de las mezclas de concreto se realizaron en instalaciones del laboratorio de materiales perteneciente al CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca, cumpliendo con la normatividad ASTM C172-08, C31/C31M-08a.

### 4.3 Dosificación de materiales

Para obtener la dosificación final de materiales se cuidaron dos aspectos importantes. El primero corresponde a lo planteado en las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal para el diseño y construcción de estructuras de concreto en zonas sísmicas. Este reglamento indica que la resistencia obtenida por un concreto a la edad de 28 días deberá ser menor a 70 Mpa (Arnal, 2005). Por otra parte se tomó como parámetro de control un revenimiento no menor a 60 mm, con la finalidad de proveer de un concreto trabajable que pueda ser transportado, colocado, moldeado y terminado con procedimientos constructivos convencionales.

En la Tabla 15 se muestran los resultados de las dosificaciones para cada mezcla de concreto en estudio; se observa la notable disminución del consumo de cemento portland que proveen las adiciones minerales, teniendo su mejor exponente en la mezcla 4 con 177.5 kg de sustitución de cemento portland por ceniza volante.

Tabla 15: Resumen de materiales utilizados para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto de las mezclas en estudio.

	<b>Mezcla</b>	<b>Rel. a/c</b>	<b>Cemento (Kg)</b>	<b>Puzolana (Kg)</b>	<b>Agua (Kg)</b>	<b>Grava (Kg)</b>	<b>Arena (Kg)</b>	<b>Super-plastificante (ml)</b>
1	HPC 0.41	0.41	443.8	-	183.0	1054.4	697.6	2498.5
2	HPC 0.41-20% C.V.	0.41	355.0	88.8	183.0	1054.4	697.6	1874.6
3	HPC 0.41-20% ARC.	0.41	355.0	88.8	183.0	1054.4	697.6	6252.2
4	HPC 0.41-40% C.V.	0.41	266.3	177.5	183.0	1054.4	697.6	1874.6
5	ACI 0.40	0.40	512.5	-	205.0	880.2	750.3	1250.5
6	ACI 0.48	0.48	427.1	-	205.0	899.5	820.3	-
7	ACI 0.48-20% ARC.	0.48	341.7	85.4	205.0	880.2	813.7	5002.0
8	ABR 0.55	0.55	343.2	-	188.8	1035.4	861.6	-

Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 5. Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados de las propiedades de los concretos en estado fresco y endurecido. En esta última categoría se encuentra la resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico y el coeficiente de difusión de cloruros objeto del presente estudio. Se establece como aportación adicional una comparación de valores obtenidos de dos técnicas distintas para evaluar el contenido de cloruros en concreto. Finalmente se presentan las correlaciones entre velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión, así como velocidad de pulso ultrasónico y coeficiente de difusión de cloruros.

### 5.1 Propiedades del concreto en estado fresco

A continuación se ilustran las pruebas realizadas en estado fresco a los concretos en estudio. En la Ilustración 6 se muestra la prueba de revenimiento o asentamiento mediante el cono de Abrams, la Ilustración 7 muestra la obtención de la temperatura, la Ilustración 8 y 9 corresponde al peso volumétrico y contenido de aire respectivamente.



Ilustración 6: Prueba de revenimiento.

Fuente: Toma propia.



Ilustración 7: Obtención de temperatura.

Fuente: Toma propia.



Ilustración 8: Obtención del peso volumétrico

Fuente: Toma propia.



Ilustración 9 Determinación del contenido de aire.

Fuente: Toma propia.

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados en concretos en estado fresco para las mezclas analizadas en el presente trabajo se muestran en la Tabla 16.

Los resultados indican que todas las mezclas fueron trabajables o llegaron a serlo con el uso del superplastificante. Por ejemplo la mezcla Abrams representa la rel a/c más alta 0.55, sin embargo el revenimiento medido es menor que la mezcla HPC con una rel a/c 0.41. El aumento en el revenimiento se debe a que el superplastificante polariza las partículas de cemento con carga negativa generando un rechazo entre ellas, de esta forma existe más agua disponible para lubricar la mezcla y alcanzar una mayor fluidez (Young et al., 1998). El mayor consumo de superplastificante en las mezclas control (1, 5, 6 y 8) corresponde a la mezcla HPC seguido por la mezcla ACI. En la Tabla 15 es posible notar que con la adición de ceniza volante como material cementante suplementario se reduce el consumo de superplastificante. En la literatura se reportan reducciones de un 5 a 15% en la demanda de agua del concreto que contiene ceniza volante, en comparación con una mezcla conteniendo únicamente cemento portland (Neville, 1999 y Kosmatka et al., 2004). Caso especial son las mezclas conteniendo arcilla que requieren una importante cantidad de superplastificante para ser trabajables, el excesivo consumo de

superplastificante en las mezclas antes mencionadas posiblemente se debe al incremento en la demanda de agua generada por los carbonatos de las partículas de arcilla (Martínez 2007).

Tabla 16: Propiedades de los concretos en estado fresco.

	<b>Mezcla</b>	<b>Revenimiento (mm)</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>Peso volumétrico (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Contenido de aire (%)</b>
1	HPC 0.41	90	24.8	2414.4	1.8
2	HPC 0.41-20% C.V.	77	23.7	2389.4	2.0
3	HPC 0.41-20% ARC.	65	24.8	2399.4	2.0
4	HPC 0.41-40% C.V.	87	24.5	2344.4	1.9
5	ACI 0.40	73	24.5	2319.4	2.0
6	ACI 0.48	79	25.8	2349.4	2.0
7	ACI 0.48-20% ARC.	72	24.0	2369.4	1.9
8	ABR 0.55	71	23.8	2369.4	1.9

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados también muestran el efecto de la ceniza volante en el revenimiento en las mezclas con 20% y 40% de sustitución, en donde se incrementa a medida de que aumenta la sustitución, sin que se produzcan cambios en el consumo de superplastificante (ver Tabla 16). La literatura atribuye este efecto a la forma esférica y tamaño de las partículas de ceniza volante que actúan como lubricante entre las partículas del cemento denominado como “efecto cojinete de bolas” (Neville, 1999).

Las temperaturas obtenidas al momento de la elaboración de todas las mezclas de concreto fueron similares debido a que el mezclado se llevó a la intemperie. Sin embargo los valores no sugieren un efecto anómalo, que propicie un retraso o aumento en el proceso de hidratación del cemento.

El contenido límite de aire atrapado en las mezclas de concreto analizadas va de 1.8 a 2%, lo cual es validado por la literatura que marca un rango de 1 a 3% en mezclas de concretos sin aire incluido (Kosmatka et al., 2004). En la tabla 16 es posible observar que los pesos volumétricos obtenidos también corresponden a los registrados en investigaciones previas; tales investigaciones establecen un peso volumétrico de 2,400 kg/m<sup>3</sup> para concretos de peso normal compuestos por arena natural y grava o agregados de

roca triturada como es el caso (Mehta y Monteiro, 1998). La variación de pesos volumétricos de las mezclas de concreto está en función del nivel y tipo de sustitución, esto es debido a la diferencia de densidades de cada material, también es afectado por el método de diseño al cual pertenecen.

Con base en los valores obtenidos de las propiedades de los concretos en estudio se puede descartar una interacción negativa entre el aditivo superplastificante y la ceniza volante, o entre el superplastificante y la arcilla; es decir, que alguna de estas combinaciones provoque el aumento del contenido de aire atrapado haciendo el concreto poroso.

## **5.2 Propiedades del concreto en estado endurecido**

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los concretos en estado endurecido.

### **5.2.1 Resistencia a la compresión**

En la Ilustración 10 y 11 es posible observar el proceso prueba de un espécimen y la falla del mismo después de la prueba. La Tabla 17 muestra los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión de las mezclas analizadas para todas las edades de prueba. Las desviaciones estándar obtenidas fueron bajas lo que corrobora un correcto procedimiento en el diseño, elaboración y prueba de concretos realizados para la presente investigación.

Como es bien conocido la relación agua/cemento influye en gran medida en la resistencia a la compresión (Kosmatka et al., 2004). Los concretos con relaciones a/c bajas, tales HPC y ACI con rel a/c 0.41 y 0.40 respectivamente, obtuvieron las resistencias más altas en todas las edades. Además las resistencias de estas mezclas continuó incrementándose más allá de los 28 días. La resistencia más baja correspondió al concreto Abrams con una relación a/c de 0.55, en este caso se observa que para resistencias mayores a 28 días, es decir 56 y 90 días no hay cambios significativos.



Ilustración 11: Prueba de resistencia a la compresión

Fuente: Toma propia.



Ilustración 10: Detalle de la falla de un espécimen.

Fuente: Toma propia.

Tabla 17: Resistencia a la compresión de concretos a diferentes edades (MPa).

	Mezcla	1d	3d	7d	14d	28d	56d	90d
1	HPC 0.41	22±1.0	37±1.0	43±1.6	47±1.5	51±1.0	54±3.4	60±1.3
2	HPC 0.41-20% C.V.	16±0.9	26±1.2	35±0.6	38±1.1	43±0.9	53±1.2	55±1.1
3	HPC 0.41-20% ARC.	20±0.9	28±2.3	33±1.3	35±1.4	40±0.8	39±0.7	46±1.5
4	HPC 0.41-40% C.V.	7±0.2	15±0.5	24±1.9	28±1.7	33±1.5	38±1.1	44±2.0
5	ACI 0.40	20±1.1	32±1.2	41±1.4	45±1.9	48±1.2	51±1.7	56±1.8
6	ACI 0.48	16±1.7	26±2.2	36±1.0	39±2.0	43±1.9	45±0.6	45±1.0
7	ACI 0.48-20% ARC.	15±0.6	25±0.9	30±1.0	34±0.4	36±2.0	37±0.3	38±1.4
8	ABR 0.55	9±0.3	20±2.0	26±2.5	30±4.7	35±3.4	33±1.6	37±2.0

Fuente: Elaboración propia.

Es importante considerar como referencia principal para el análisis de resultados la edad de 28 días, debido a que es el parámetro de resistencia a la compresión utilizado por los diseñadores y por los ingenieros de control de calidad en el diseño estructural. A tal edad, los resultados indican que la adición de ceniza volante y arcilla natural conducen a la disminución de la resistencia, siendo ésta mayor en el concreto conteniendo arcilla.

Para el método de diseño de mezclas HPC se encontró que cuando se utiliza la adición de 20% de ceniza volante, la reducción en resistencia fue de aproximadamente 16%, y para 40% de sustitución de cemento la reducción fue de 35%. Con 20% de arcilla

natural la reducción fue de 22%, esto es, mayor que cuando se utiliza ceniza volante. Para el método ACI se obtuvo una reducción de resistencia de 16% cuando se utiliza 20% de arcilla natural como reemplazo del cemento. Esto sugiere que la disminución de resistencia debida a la inclusión de arcilla tiene un mayor impacto en una relación agua cemento más baja.

A edades menores que 28 días se observa que la adición de materiales suplementarios, ceniza volante y arcilla natural en este caso, originan la disminución en la resistencia a la compresión de los concretos estudiados. Las mezclas conteniendo material suplementario presentan un aumento en sus resistencias, con respecto a las obtenidas a los 28 días, sin embargo, no superan a sus respectivos controles en el presente estudio.

Este aumento tardío en la resistencia coincide con lo reportado en la literatura en donde se menciona que a edades mayores a 28 días las adiciones puzolánicas mejoran la microestructura de la pasta de cemento hidratado y como consecuencia disminuye su porosidad. Al disminuir la cantidad de poros se incrementa el área de contacto que transmite las cargas aplicadas, evitando así concentraciones de esfuerzos causantes de la destrucción de las probetas de concreto (Neville, 1999).

En los concretos diseñados por el método ACI y HPC que contenían arcilla natural no se observa el fenómeno de regresión de resistencia como fue reportado en otros estudios (Martínez, 2007). Sin embargo, para el concreto preparado de acuerdo al método de Abrams se observa una ligera disminución de resistencia a los 56 días, no obstante a los 90 días la resistencia es ligeramente mayor.

En la Figura 8 se muestra el desarrollo de la resistencia a la compresión durante las edades de prueba designadas para las mezclas en estudio. Se identifican tres regiones claramente definidas, de 1-7, de 7-28 y de 28 a 90 días respectivamente. Las pendientes para la región de 1 a 7 días son significativamente mayores y comprenden el periodo más importante de actividad química que mediante los productos de hidratación propician el endurecimiento del concreto (Young et al., 1998). La disminución en la pendiente de 7-28 días indica una reducción importante en el proceso de hidratación debido a que se han

consumado cerca del 80% de las reacciones de hidratación, en consecuencia la pasta del concreto mejora por medio de la densificación. A edades mayores a 28 días, la actividad química disminuye considerablemente manteniéndose la resistencia de los concretos, o incrementándose ligeramente en función de las partículas restantes sin hidratar (Young et al., 1998).

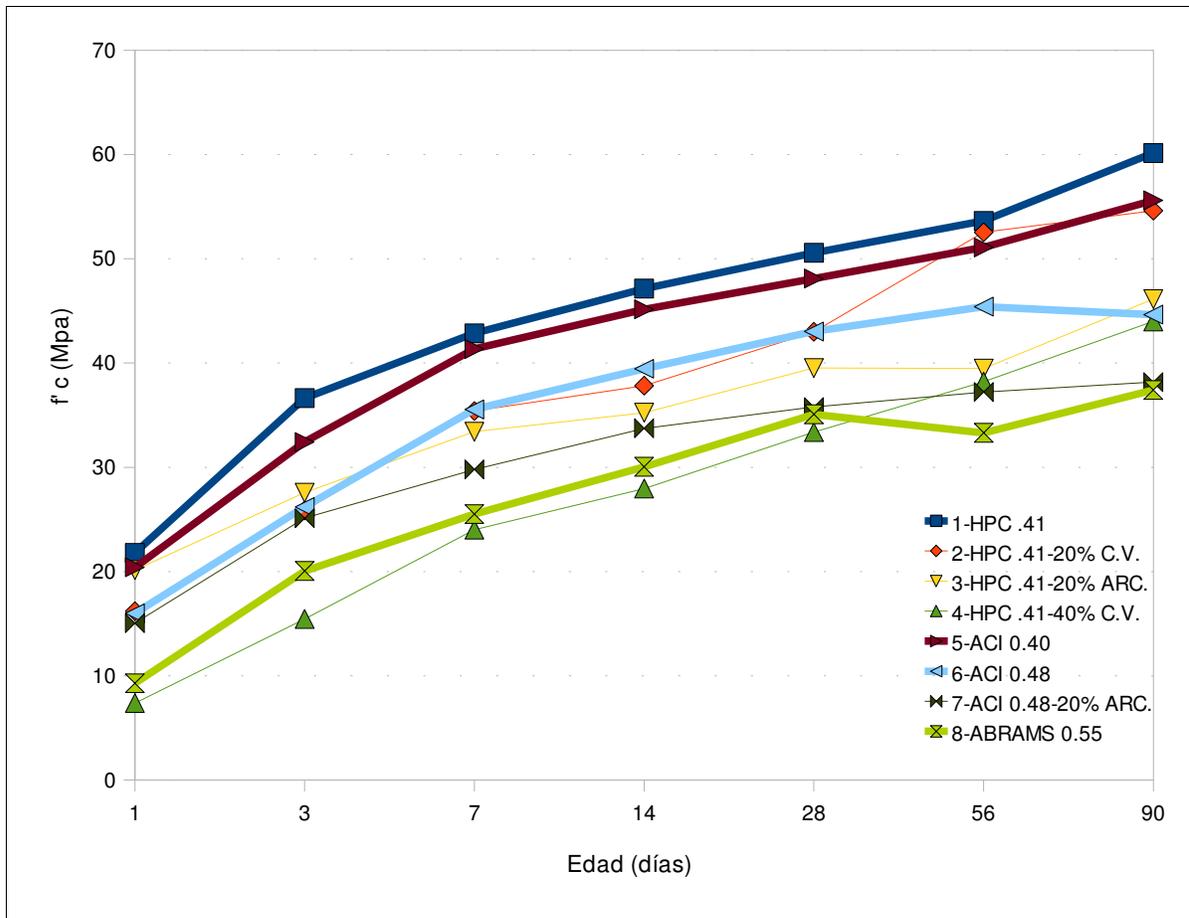


Figura 8: Desarrollo de la resistencia a la compresión en concretos a diferentes edades (MPa).

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma se observa el comportamiento descrito en la literatura para concretos conteniendo ceniza volante, dichos concretos presentan a edades tempranas una resistencia menor, sin embargo, a edades próximas a 28 días presentan un aumento considerable en su resistencia. Los valores de resistencia presentados a 90 días coinciden con lo reportado en la literatura donde se menciona que la sustitución de 20% de cemento

con ceniza volante no afecta considerablemente la resistencia a edades mayores a los 28 días, sin embargo con una sustitución mayor a 30% la resistencia decrece (Neville, 1999). En el presente estudio los concretos que contienen 20% y 40% de ceniza volante presentaron una variación del 8% y 27% respectivamente en el valor de resistencia a la compresión a 90 días, tomando como base su control.

Con la finalidad de analizar con mayor detalle el comportamiento de las adiciones puzolánicas del presente estudio, en la Tabla 18 se muestra la evaluación de la contribución de la reacción puzolánica en el desarrollo de la resistencia mecánica a compresión de los concretos que contienen material suplementario. Para tal efecto, se establece el índice de actividad puzolánica (Pozzolanic Activity Index, PAI) que puede ser calculado como el cociente entre la resistencia mecánica a compresión del concreto con puzolana ( $R_t$ ) y la resistencia del concreto control ( $R_o$ ) lo cual puede representarse por la siguiente expresión (Payá y Col. 2002):

$$PAI = \frac{R_t}{R_o} * 100 \dots\dots\dots (22)$$

Al calcular los índices de actividad puzolánica para los concretos en estudio se tiene lo siguiente:

Tabla 18: Índices de actividad puzolánica a diferentes edades en %.

	<b>Mezcla</b>	<b>1d</b>	<b>3d</b>	<b>7d</b>	<b>14d</b>	<b>28d</b>	<b>56d</b>	<b>90d</b>
2	HPC 0.41-20% C.V.	73	70	81	81	84	98	92
3	HPC 0.41-20% ARC.	91	76	77	74	78	72	77
4	HPC 0.41-40% C.V.	32	41	56	60	65	70	73
7	ACI 0.48-20% ARC.	94	96	83	87	84	82	84

Fuente: Elaboración propia

En el análisis de resultados de la Tabla 18 se tiene que el índice es mayor para el concreto HPC que tiene 20% de arcilla natural con respecto a su similar conteniendo ceniza volante, esto es válido a edades tempranas; sin embargo, a edades tardías, es decir mayores a 28 días, el índice para la ceniza volante es mayor.

En el caso de la adición de 40% de ceniza volante, se encontró que los índices son bajos comparados con los del concreto con 20% de ceniza volante, pero similares a los del concreto que contiene 20% de arcilla natural; esto sólo a edades tardías. Además, los

resultados confirman la ausencia del fenómeno de regresión de resistencia cuando se utiliza arcilla natural como material suplementario al cemento.

### 5.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico

En la Ilustración 12 se observa la medición de VPU a los especímenes. La Figura 9 muestra el desarrollo de la velocidad de pulso ultrasónico para todos los concretos en estudio.



*Ilustración 12: Medición de velocidad de pulso ultrasónico.*

*Fuente: Toma propia.*

Los valores observados describen el proceso de hidratación de los concretos tanto en edades tempranas como en tardías. En todos los casos se identifican nuevamente tres regiones que siguen la misma tendencia que el desarrollo de resistencia a la compresión (véase Figura 8). Las pendientes son de 1-7 días en donde se observa una gran actividad energética (reacciones químicas) dada por las elevadas pendientes de las curvas; de 7-28 días en donde las pendientes son menores en comparación con las observadas en la primera y finalmente la región comprendida entre 28 y 90 días. En esta última, aunque las lecturas consecutivas para una determinada mezcla son muy parecidas, no se observa la estabilización, lo cual es indicativo de que el cemento continúa hidratándose aún a edades tardías. Investigaciones afirman que hay hidratación aún después de varios años (Powers, 1949).

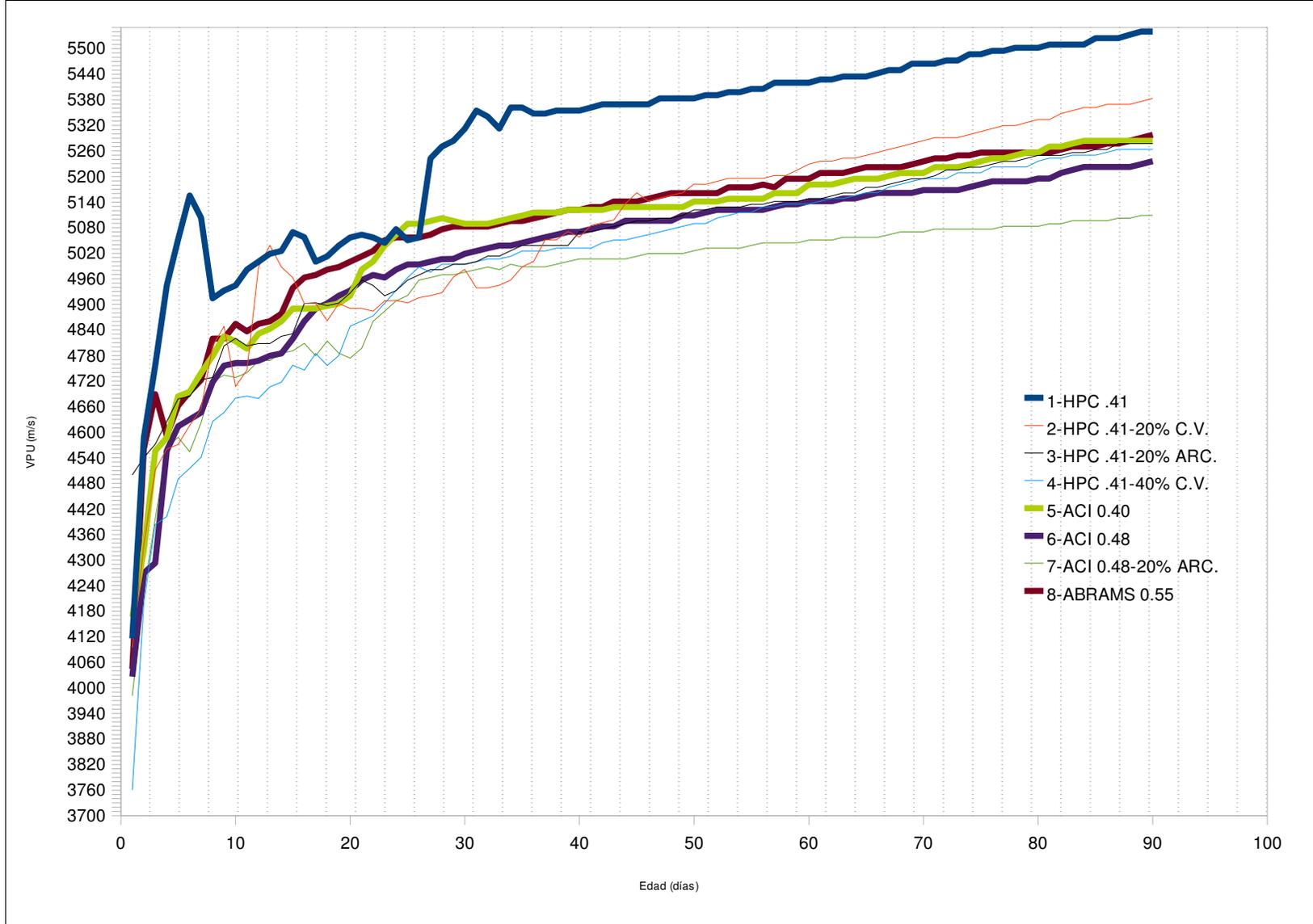


Figura 9: Velocidad de pulso ultrasónico para todos los concretos.

Fuente: Elaboración propia.

La tendencia mostrada en los resultados de VPU para todos los concretos coincide con la mostrada en la resistencia a la compresión. Tal hecho se reporta en la literatura, concluyendo que a mayores velocidades mayor será la densidad del concreto (Belie et al., 2005), de esta última propiedad depende en gran medida la resistencia que desarrolla un concreto.

Sin embargo para el concreto Abrams no se observa la tendencia descrita anteriormente, ya que este concreto presentó un valor de resistencia bajo, y en VPU presenta una velocidad media. Esto probablemente se deba a la densidad que presenta dicha mezcla (Tabla 16), derivada del alto consumo de agregado grueso propio del método de diseño, Tabla 15.

### 5.2.3 Coeficientes de difusión de cloruros

Las Ilustraciones 13 y 14 muestran los procedimientos normados por NT Build 208 y FM 5-516 para la determinación de cloruros en concreto. En la figura 10 se muestran los perfiles de cloruros de los concretos en estudio. Es posible observar la notable relación entre la resistencia a la compresión, VPU y la resistencia a la penetración de iones cloruros en concreto.



Ilustración 13: Obtención de cloruros mediante NT Build 208.

Fuente: Toma propia.



Ilustración 14: Obtención de cloruros mediante FM 5-516.

Fuente: Toma propia.

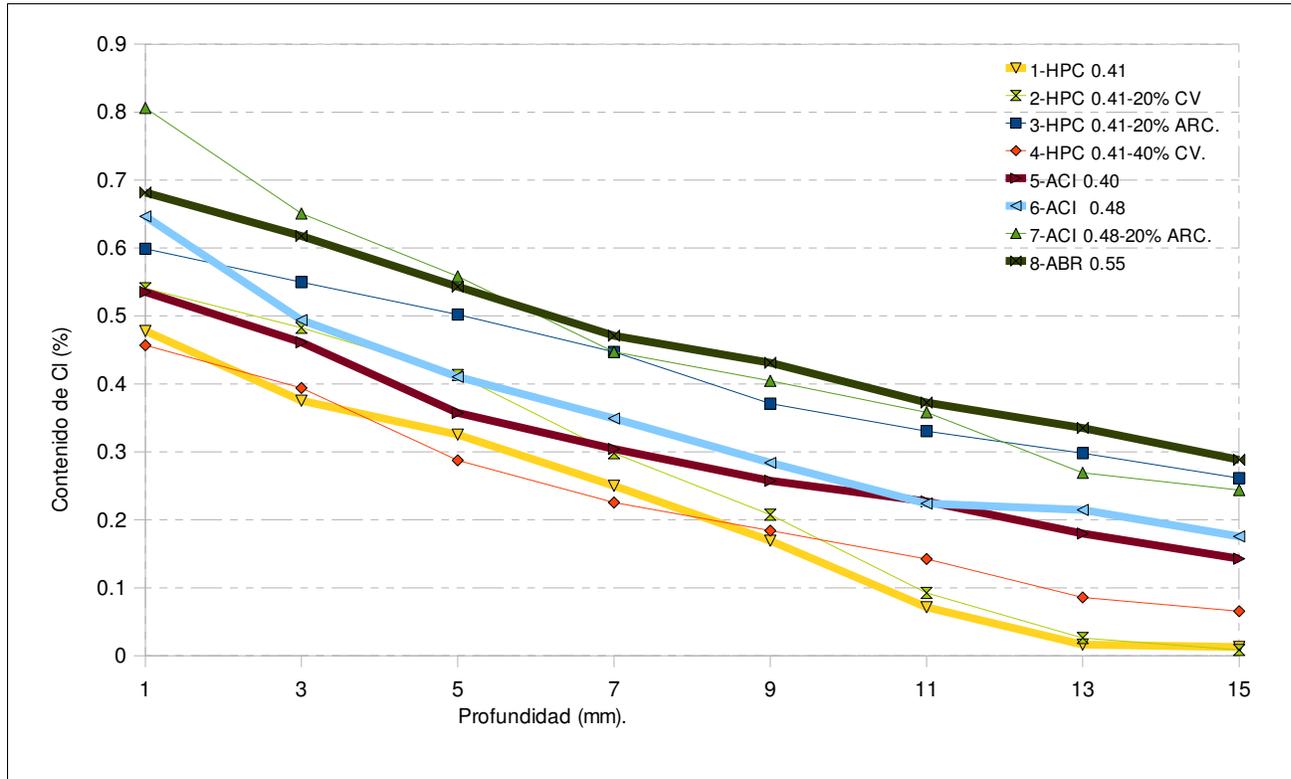


Figura 10: Perfiles de cloruros para todos los concretos a 63 días.

Fuente: Elaboración propia.

Como era de esperarse las mezclas diseñadas por el método HPC presentan la mayor resistencia a la penetración del ion cloruro, seguidas por las mezclas ACI y Abrams, en ese orden.

Comparando los valores de predicción y los obtenidos por diversos autores con los coeficientes de difusión en la presente investigación (véase apartado de antecedentes), es posible observar que los coeficientes de difusión del presente estudio muestran valores un poco mayores a los encontrados en la literatura. Una probable explicación consiste en el método utilizado para determinar la resistencia a la penetración del ion cloruro en concreto discutidas en el Capítulo 3. Además de la edad y del ambiente de exposición al que fueron sometidos los concretos de prueba, recuérdese que en la presente investigación las pruebas son aceleradas y la solución de exposición contiene un 16.5 % de NaCl, lo cual está muy por encima del valor promedio del agua de mar de 3.5%.

Las mezclas HPC conteniendo 20 y 40% de ceniza volante como adición puzolánica presentan un coeficiente de difusión de cloruros más bajo que el resto, teniendo un mejor desempeño HPC-20% que iguala a la mezcla referente sin adición. Sin embargo con la adición de arcilla esta propiedad se modifica desfavorablemente de tal forma que es comparable al concreto Abrams. Para la mezcla ACI conteniendo 20% de arcilla se presenta una ligera disminución en su resistencia a la penetración del ión cloruro.

En la Tabla 19 se presentan los valores promedio de los coeficientes de difusión obtenidos para cada concreto analizado. En forma general los coeficientes de difusión de menor magnitud corresponden a la mezcla HPC, seguidos por ACI y Abrams.

Los valores presentados en la tabla permiten corroborar los beneficios de la inclusión de ceniza volante en cuanto a la mejora de la penetración de iones cloruro en concreto. Por otra parte, la adición de arcilla independientemente del método de diseño genera un aumento en los valores del coeficiente de difusión.

Para el método de diseño de mezclas HPC se encontró que cuando se utiliza la adición de 20% de ceniza volante, la reducción del coeficiente de difusión fue de aproximadamente 4.26%, y para 40% de sustitución de cemento el aumento fue de 65.3 %. Mientras que con 20% de arcilla el aumento fue de 398%, con respecto a la mezcla HPC conteniendo únicamente cemento portland. Para las mezclas preparadas con el método ACI se obtuvo un aumento del coeficiente de difusión de 9.74% cuando se utiliza 20% de arcilla natural como reemplazo del cemento.

Tabla 19: Valores promedio de coeficientes de difusión de cloruros.

	<b>Mezcla</b>	<b>D(m<sup>2</sup>/s)</b>
1	HPC 0.41	1.01x10 <sup>-11</sup>
2	HPC 0.41-20% C.V.	9.67x10 <sup>-12</sup>
3	HPC 0.41-20% ARC.	5.03x10 <sup>-11</sup>
4	HPC 0.41-40% C.V.	1.67x10 <sup>-11</sup>
5	ACI 0.40	2.83x10 <sup>-11</sup>
6	ACI 0.48	3.08x10 <sup>-11</sup>
7	ACI 0.48-20% ARC.	3.38x10 <sup>-11</sup>
8	ABR 0.55	5.24x10 <sup>-11</sup>

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3.1 Comparación de mediciones de contenido de cloruros en concreto mediante las normas NT Build 2008 y FM 5-516

Con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos de la valoración de cloruros en concreto mediante la norma NT Build 208, así como su posible variación con otras técnicas de evaluación se propuso la norma FM 5-516 que puede ser utilizada para la determinación de bajos niveles de cloruros en concreto. El método propuesto por la norma FM 5-516 es aplicable a contenidos de cloruro menores a 100 ppm (aproximadamente 0.40 lb/yd<sup>3</sup>), pero también mide con precisión contenidos tan altos como 625 ppm (aproximadamente 2.5 lb/yd<sup>3</sup>).

De esta forma se optó por valorar únicamente la capa 8 es decir muestras de una profundidad de 15 mm, tomando en cuenta que esta capa es la de menor concentración de cloruros evaluados en este estudio. Esta única valoración se debe a las limitantes antes mencionadas de la norma FM 5-516 y que son las muestras con mayor susceptibilidad a errores debido al bajo contenido de cloruros medidos.

En la Tabla 20 se presenta un estudio comparativo de valores obtenidos por ambas técnicas.

Tabla 20: Contenido de cloruros medidos por NT Build 2008 y FM 5-516.

MEZCLA	Espécimen	NT Build 208	FM 5-516	Variación
1 HPC 0.41	124	0.023	0.009	
	125	0.010	0.015	
	128	0.006	0.014	
	Promedio	0.013	0.013	0.0%
2 HPC 0.41-20% C.V.	25	0.002	0.005	
	26	0.013	0.009	
	29	0.011	0.008	
	Promedio	0.009	0.007	22.2%
3 HPC 0.41-20% ARC.	58	0.302	0.239	
	59	0.273	0.308	
	62	0.210	0.290	
	Promedio	0.261	0.279	6.9%
4 HPC 0.41-40% C.V.	91	0.040	0.069	
	92	0.110	0.106	
	95	0.047	0.059	
	Promedio	0.066	0.078	18.2%
5 ACI 0.40	190	0.142	0.177	
	191	0.238	0.218	
	194	0.143	0.184	

MEZCLA	Espécimen	NT Build 208	FM 5-516	Variación
6 ACI 0.48	Promedio	0.174	0.193	10.9%
	223	0.279	0.231	
	224	0.187	0.314	
	227	0.164	0.325	
	Promedio	0.210	0.290	
7 ACI 0.48-20% ARC.	157	0.244	0.283	38.1%
	158	0.237	0.334	
	161	0.252	0.342	
	Promedio	0.244	0.320	
	256	0.303	0.262	
8 ABR 0.55	257	0.300	0.223	31.1%
	260	0.264	0.228	
	Promedio	0.289	0.238	

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 20 es posible observar que los valores medidos con FM 5-516 se asemejan en buena medida a los valores obtenidos por la norma NT Build 208 dicha variación parece coherente al ser la norma NT Build 208 una técnica colorimétrica dependiente de la percepción del operador.

### 5.2.3.2 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión

En las Figuras 11 a 18 se muestra la correlación entre velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) para cada mezcla en estudio. En las Figuras se observan valores de correlación que van de 0.91 a 0.99, lo cual confirma que es posible estimar la resistencia a la compresión del concreto para diversas edades, mediante el uso de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico como se reporta en la literatura (Neville 1999).

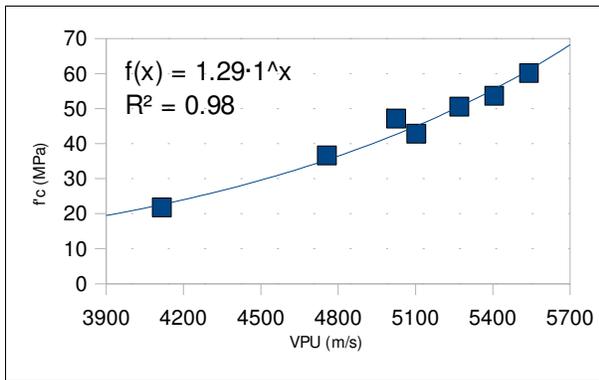


Figura 11: Correlación entre VPU y  $f_c$  para la mezcla HPC 0.41

Fuente: Elaboración propia.

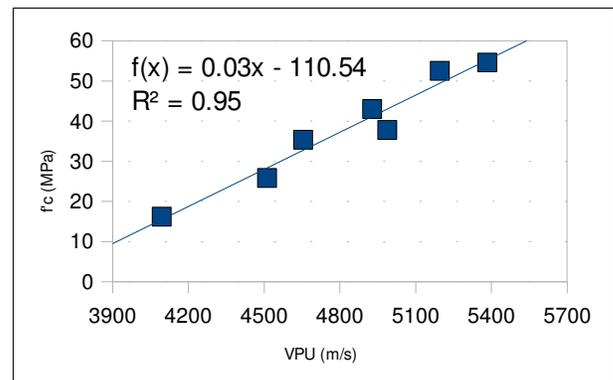


Figura 12: Correlación entre VPU y  $f_c$  para la mezcla HPC 0.41-20% C.V.

Fuente: Elaboración propia.

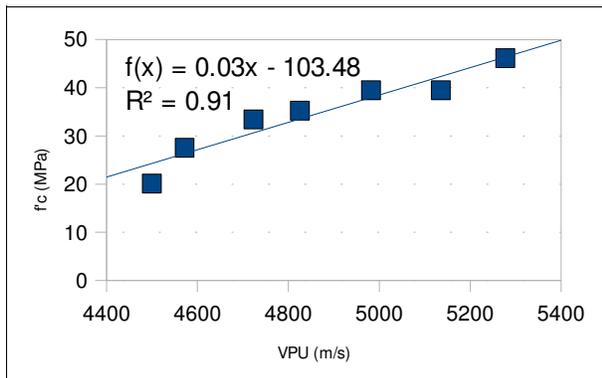


Figura 13: Correlación entre VPU y  $f_c$  para la mezcla HPC 0.41-20% ARC.

Fuente: Elaboración propia.

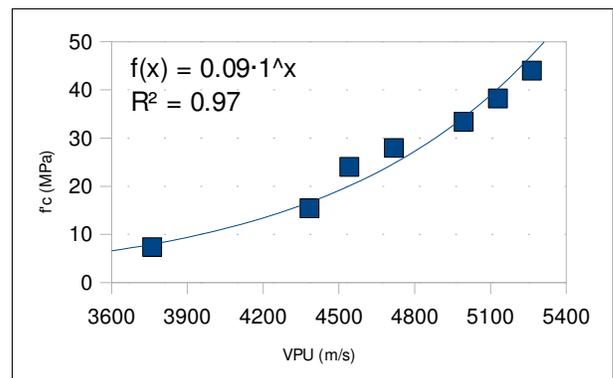


Figura 14: Correlación entre VPU y  $f_c$  para la mezcla HPC 0.41-40% C.V.

Fuente: Elaboración propia.

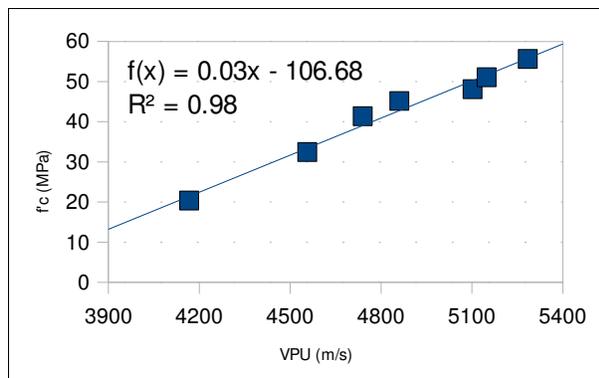


Figura 16: Correlación entre VPU y  $f_c$  para la mezcla ACI 0.40

Fuente: Elaboración propia.

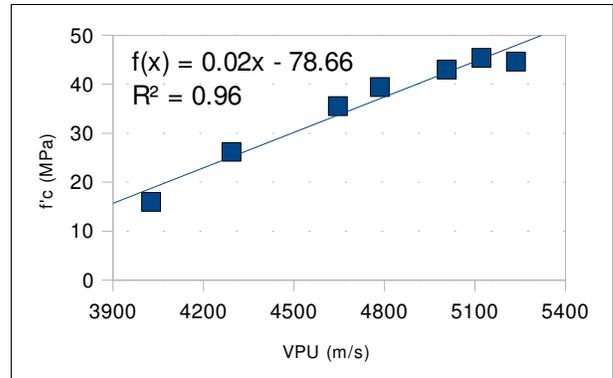


Figura 15: Correlación entre VPU y  $f_c$  para la mezcla ACI 0.48

Fuente: Elaboración propia.

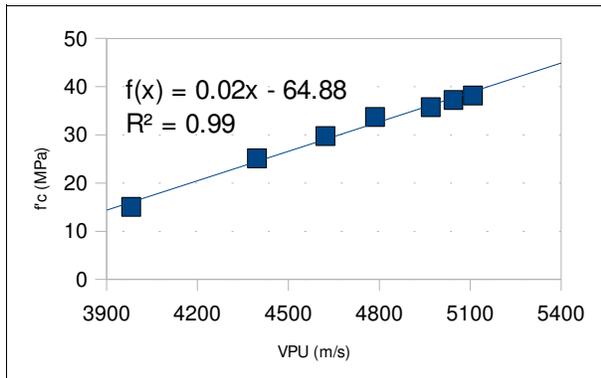


Figura 17: Correlación entre VPU y  $f_c$  para la mezcla ACI 0.48-20% ARC.

Fuente: Elaboración propia.

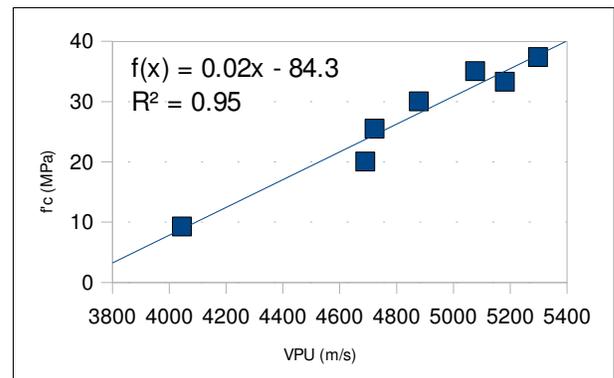


Figura 18: Correlación entre VPU y  $f_c$  para la mezcla ABRAMS 0.55.

Fuente: Elaboración propia.

Para tal efecto es posible utilizar la ecuación 22. En donde la VPU esta dada en m/s y los resultados obtenidos se encuentran en MPa.

$$f'c = 0.0029 e^{0.0019VPU} \dots\dots\dots(22)$$

En la figura 19 se muestra la correlación empleando todas las mezclas en estudio, en ella es posible observar una correlación de 0.81 lo cual es reflejo de la mezcla de variables como son métodos de diseño, adiciones, porcentajes de adiciones y relaciones a/c. Sin embargo a pesar de ello la correlación no es mala y es posible estimar con cierto grado de confianza la resistencia a la compresión mediante la velocidad de pulso ultrasónico, para una variedad importante de concretos.

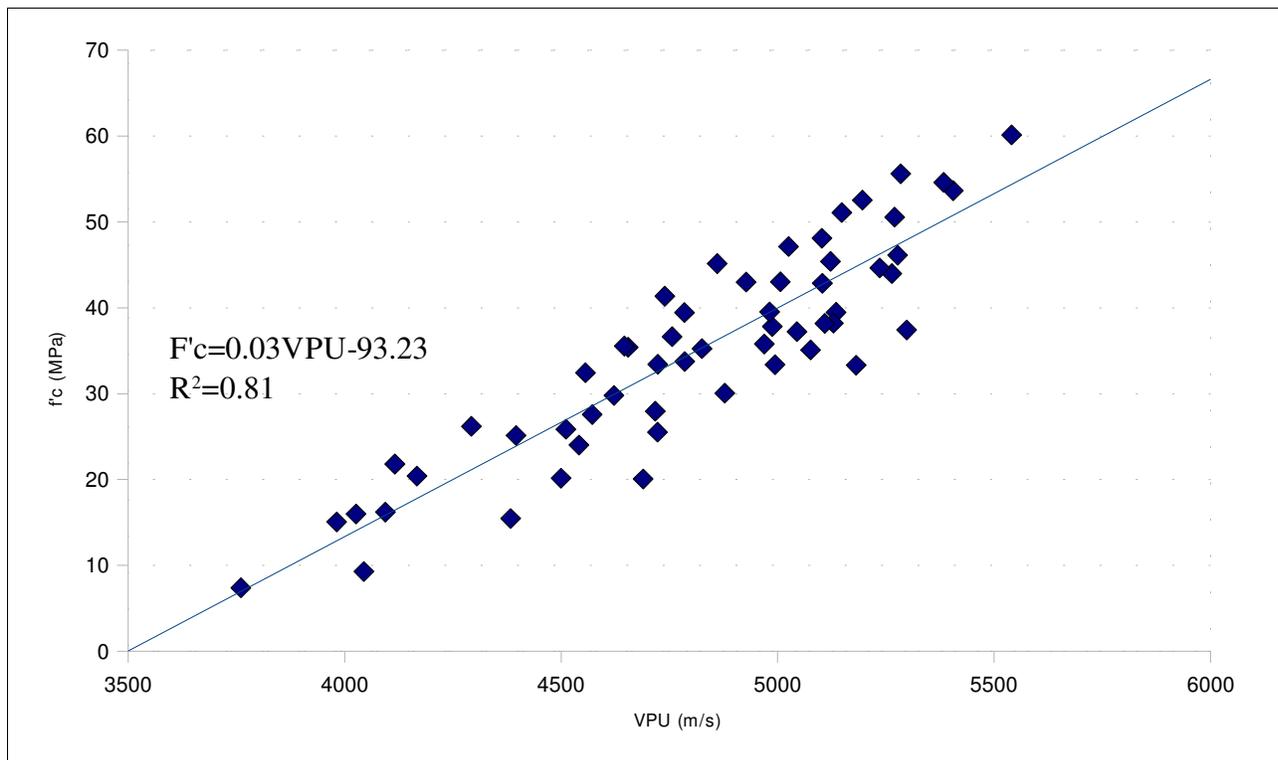


Figura 19: Correlación entre VPU y  $f'c$  para todas las mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3.3 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y coeficiente de difusión de cloruros

A continuación se presenta la correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y el coeficiente de difusión de cloruros (D) para todos los concretos en estudio. La finalidad establecer esta correlación es proveer de una herramienta que mediante las simples lecturas de VPU permita obtener valores estimados de D sin la necesidad de llevar a cabo pruebas de difusión que son destructivas, tardadas en su ejecución y que además tienen un costo elevado.

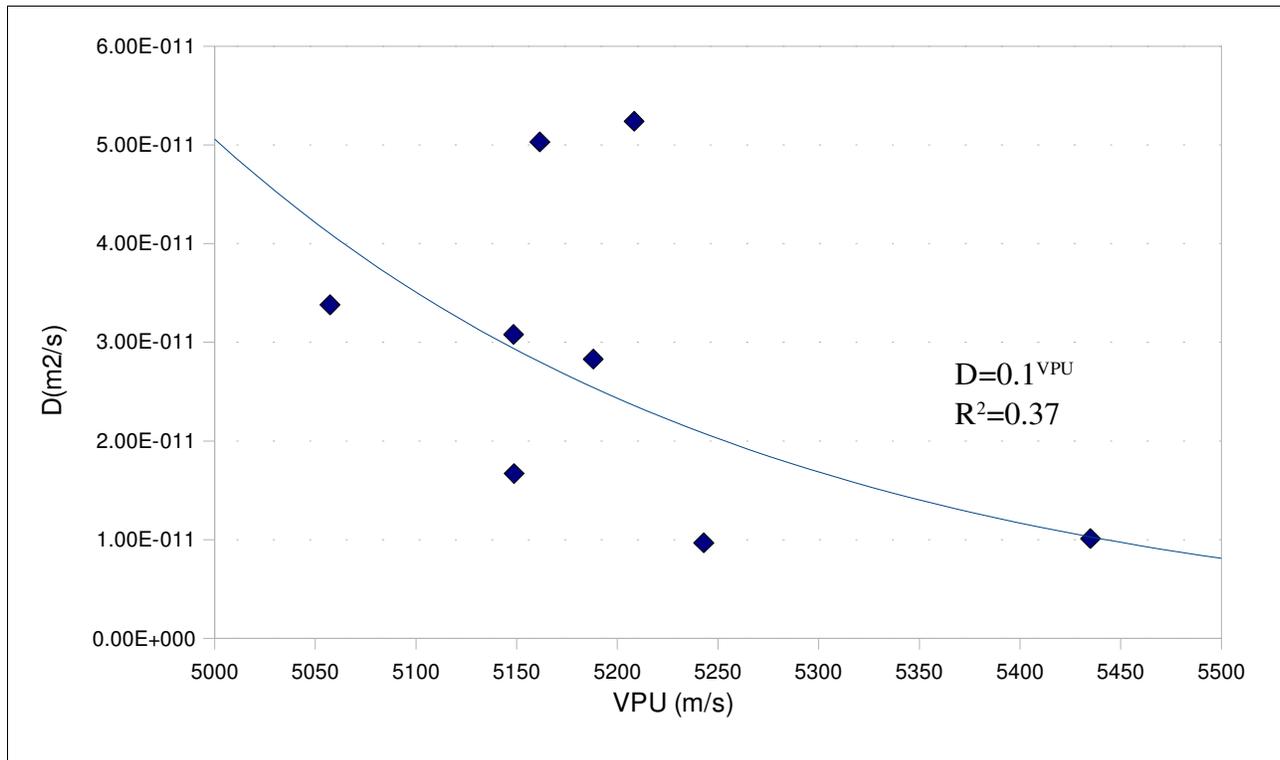


Figura 20: Correlación entre VPU y D para todas las mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 20 es posible observar una correlación de 0.37, derivado de la baja cantidad de datos disponibles, además que los concretos utilizados para la correlación, no tienen los mismos parámetros como pueden ser el método de diseño de mezcla, tipo de sustitución y porcentaje de la misma. Esto sugiere una desviación importante reflejada en la correlación.

## **Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones**

Con base en los resultados de las mezclas estudiadas se concluye lo siguiente:

La adición de arcilla como material cementante suplementario no afecta en forma importante las propiedades en estado fresco del concreto que las contiene. El contenido de aire, peso volumétrico y la temperatura presentan pequeñas variaciones con respecto a su control; sin embargo el revenimiento sufre una disminución lo cual propicia el uso excesivo de aditivo superplastificante para compensar esta pérdida de trabajabilidad.

La adición de arcilla como reemplazo de material cementante origina una disminución en la resistencia a la compresión de los concretos que la contienen. Tomando como base las pruebas realizadas a la edad de 28 días se tiene que para el método de diseño de mezclas HPC se encontró que cuando se utiliza la adición de 20% de ceniza volante, la reducción en resistencia fue de aproximadamente 16%, y para 40% de sustitución de cemento la reducción es de 35%. Con 20% de arcilla natural la reducción fue de 22%, esto es 6%, más que cuando se utiliza ceniza volante. Para el método ACI se obtuvo una reducción de resistencia de 16% cuando se utiliza 20% de arcilla natural como reemplazo del cemento.

El uso de arcilla como reemplazo de material cementante afecta desfavorablemente la resistencia a la penetración de iones cloruros en el concreto que las contiene. Para el método de diseño de mezclas HPC se encontró que cuando se utiliza la adición de 20% de ceniza volante, la reducción del coeficiente de difusión fue de aproximadamente 4.26%, y para 40% de sustitución de cemento el aumento fue de 65.3%. Mientras que con 20% de adición de arcilla el aumento fue de 398%, con respecto a la mezcla HPC conteniendo únicamente cemento portland.

Para la mezcla diseñada con el método ACI se obtuvo un aumento del coeficiente de difusión de 9.74% cuando se utiliza 20% de arcilla como reemplazo de cemento.

Lo datos anteriores sugiere una importante sensibilidad de la arcilla a relaciones a/c bajas y probablemente al método de diseño.

Con los datos obtenidos de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y coeficiente de difusión de cloruros (D) no es posible establecer una correlación con un grado de confianza aceptable.

Con base en los resultados obtenidos se recomienda lo siguiente:

La utilización de arcilla natural como material cementante de reemplazo aún para concreto estructural siempre y cuando el material no se encuentre expuesto a ambientes agresivos. Sin embargo es necesario evaluar su desempeño en ambientes urbanos en donde pueda desarrollarse el fenómeno de la carbonatación.

La utilización de arcilla como material de relleno en grandes volúmenes de concreto y que además no cuenten con acero de refuerzo.

Estudiar en trabajos futuros las variaciones de velocidad de pulso ultrasónico en concreto en el rango de 6 a 28 días para el método de diseño HPC.

Estudiar por separado la correlación de VPU y D para cada método de diseño con diversas relaciones agua-cemento.

## 6.1 Bibliografía

ACI 222.2R-01 Reported by ACI committee 222 (2001). *Corrosion of metals in concrete*, E.U.A: American concrete institute.

ACI 222.2R-01 Reported by ACI committee 222 (2001). *Corrosion of prestressing Steels*, E.U.A: American concrete institute.

ACI 222R-01 Reported by ACI committee 222 (2001). *Protection of metals in concrete against corrosion*, E.U.A: American concrete institute.

ACI Committee 232 (1996). *Use of Fly Ash in Concrete*, ACI 232.2R-96, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1996, 34 páginas.

ADMIX TECH Admixture Technologies de México (2008). *Ficha Técnica ADMIX TECH FLY ASH*. Tlalnepantla, Estado de México: Admixture Technologies de México.

Alonso C., Andrade C., Castellote M., Castro P. (2000). *Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*. Journal Cement and concrete research, 30 (2000) 1047-1055.

American Concrete Institute, Committee 211 (1993). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*; USA.

Andrade, C., Alonso, M.C., y Gonzalez, J.A. (1990). *Initial efforts to use the corrosion rate measurements for estimating rebar durability on Corrosion Rates of Steel in Concrete*. Philadelphia, USA ASTM STP: N.S. Berke, V. Chaker, y D. Whiting.

Arnal Simon L. (2005). *Reglamento de construcciones para el distrito federal (comentado)*. México: Trillas.

Arvind K. Suryavanshi, R. Narayan Swamy, and George E. Cardew (2002). *Estimation of Diffusion Coefficients for Chlorides Ion Penetration into Structural Concrete*. Journal ACI Materials, V.99, No 5, Title No.99-M44.

B. Martín-Pérez, H. Zibara, R.D. Hooton, M.D.A. Thomas (2000). *A study of the effect of chloride binding on service life predictions*. Journal Cement and Concrete Research. Vol. 30 pag. 1215-1233.

Bamforth, P. (2003). *Concrete classification for R.C. Structures Exposed to Marine and other Salt-laden Environments*. Structural Faults and Repair-93. Edinburgh.

Barger GS, Hansen ER, Wood MR, Neary T, Beech DJ, Jaquier D. (2001). *Production and use of calcined natural pozzolans in concrete: Cement and concrete.*

Belie, N.D., Grosse, C.U., Kurz, J., Reinhardt, H. W. (2005). *Ultrasound monitoring of the influence of different accelerating admixtures and cement types for shotcrete on setting and hardening behavior.* Ghent University Belgium: Magnel Laboratory for Concrete Research, Department of Structural Engineering,. Pp 2087-2094 .

Bockris O'M John, Reddy K.N. Amulya (1979). *Electroquímica moderna 1.* Barcelona, España: Reverté

Broomfield J.P. *Corrosion of steel in concrete* (1997), Great Britain: ε & FN SPON

Caijun Shi (2003). *Another Look at the Rapid Chloride Permeability Test (ASTM C1202 or ASSHTO t277).* Burlington, Ontario Canadá: Cjs Technology inc., 2116 Upland dr.

Caldarone MA, Gruber KA, Burg RG. (1991). *High -reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture.*

Carrión, F. J. V., Hernández, R.J., y Esqueda, M. A. (1999). *Estudios de corrosión en puentes de concreto Pre-esforzado.* Queretaro, Méx.:Publicación técnica, Instituto Mexicano del Transporte.. pp 23-25.

Castellote, M., Andrade, C. (2006). *Roudn-Robin Test on methods for determining chloride transport parameters in concrete. España. Materials and Structure: Institute of Construction Sciences Eduardo Torroja.* Pp 955-990.

Castro Borgues, P. (2001). *Corrosión en estructuras de concreto armado.* México. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A.C.

Castro, P., Moreno, E. I., Torres A. A. (2003). *Chloride profiles in two marine structures meaning and some predictions.* (CONPAT).

CEMBUREAU The European Cement Association (1999). *Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production.* Brussels: CEMBUREAU.

Chavez, M. J. A., Buendía. R. H. (2003). *Coeficiente de penetración de cloruros en concreto.* Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr. vol.6, no.12, p.36-43. ISSN 1561-0888.

Chian, C., She, S. C. (2006). *The chloride ponding test and its correlation to the accelerated chloride migration test for concrete.*

Chindaprasirt P., Rukzon S., Sirivivatnanon V. (2008). *Resistance to chloride penetration of blended portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash fly ash: Construction and Building Materials* 22 p. 932-938.

Clyde E. Kesler (1980). *Behavior of Shrinkage-Compensating Concretes Suitable for Use in Bridge Decks*. E.U.: American Concrete Institute.

Del valle M. A., Pérez López T., Martínez Madrid M. (2001). *El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado*. Sanfandila, Qro. México: Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Diab, H., Bentur, A., Heitner-Wirguin, C., and Ben-Dor, L. (1998). *The Diffusion of Cl Ions Through Portland Cement and Portland Cement-Polymer Pastes: Cement and Concrete Research*, Vol. 18, Pp. 715-722.

Elinwa, A.U. (2005). *Experimental characterization of portland cement-calcined soldier-ant mound clay cement mortar and concrete*. Journal Construction and Building Materials. Vol.20, pag 754-760.

Escalante García J. I. (2002). *Materiales alternativos al cemento portland*. Saltillo, México: Cinvestav.

EUCO The Euclid Chemical Company (2008). *Ficha Técnica Plastol 4000*. Toluca Estado de México: The Euclid Chemical Company.

Flores, G.J. (2008). *Estimación del coeficiente de difusión de cloruros en concreto utilizando la técnica de velocidad de pulso ultrasónico*. Oaxaca, México: CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca.

González, de la costera M. (1999). *La corrosión del concreto en ambiente marino y construcción en el litoral*. Director de ASOCEM.

Helmuth, Richard A. (1987). *Fly Ash in Cement and Concrete*, SP040T, Portland Cement Association, 203 páginas.

Hernández O. C., Mendoza C.J.E. (2006). *Durabilidad e infraestructura: Retos e impacto socioeconómico*. México: Ingeniería. Investigación y Tecnología, enero-marzo, año/vol. VII, número 001, UNAM.

Hooton, R.D., Pun, P., Kojundic, T., and Fidjestol, P. (1997). *Influence of Silica Fume on Chloride Resistance of Concrete*. Proceedings of PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete, New Orleans, 245-256.

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía(2008). *Extensión territorial*. Septiembre,16,2008.<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/datosgeogra/extterri/frontera.cfm?s=geo&c=920>.

Jiang L., Zhang M.H., y Malhotra V.M. (2004). *Evaluation of test Methods for Determining the Resistance of Concrete to Chloride-ion Penetration*. EIGHTH CANMET/ACI, International conference on Fly ash, silica fume, Slag, and Natural Pozzolans in concrete; V.M Malhotra, las vegas Nevada, mayo 23-29, 2004.

Koch, G, Bromgers M, Thomson N. (2001). *Corrosion cost an preventive strategies in the United States*. E.U.A, Reporte técnico FHWA-RD-01-156, ACI.

Kosmatka Steven H., Kerkhoff Beatrix., Panarese William C., Tenesi, Jussara (2004), *Diseño y control de mezclas de concreto*. Skokie, Illinois, EE.UU: Portland Cement Association.

Kostuch JA, Walters V, Jones TR. (1993). *High Performance Concretes Incorporating Metakaolin*. London UK: Dhir RK, Jones MR Concrete 2000.

Kuber Anand Parande, B. Ramesh Babu, M. Aswin Karthink, Deepak Kumaar K.K., Palaniswamy N. (2006). *Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metacaolín blended concrete/mortar*. Journal Construction and Building Materials.

Lima Souza P. S., Dal Molin D. C.C. (2005). *Viability of using calcined caliz, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity*. Journal Cement and Concrete Research, Vol. 35, pp.1993-1998.

López Celis R., Pérez Quiroz J.T., Torres Acosta A.A., Martínez Madrid M., Martínez Molina W., Ariza Aguilar L.E., Zamudio Cíntora E., Genescá Llongueras J., Valdez Salas B. (2006). *Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México*. Sanfandila, Qro. México: Instituto Mexicano del Transporte.

López Vázquez E. (1999). *Caracterización de los agregados pétreos que se utilizan en la elaboración del concreto en la ciudad de Oaxaca*. Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán (UADY).

Luping, T., Nilsson, L. O. (1992). *Rapid Determination of Chloride Diffusivity in Concrete by Applying and Electric Field*. ACI Materials Journal, Vol. 49 Pp 49-53

Malhotra V. M. (1985). *Nondestructive methods for testing concrete*. Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.

Malhotra V. M. y Carino N. J. (1991). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. Boca Raton, U.S.A. : CRC Press.

Martínez M.M., Torres A.A.A. (2002). *Reporte del Plan Nacional de Evaluación de Puentes Dañados por Corrosión – Parte 1: Discriminación de los Puentes que Muestran Daños por Corrosión*. Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Equipamiento para el Transporte.

Martínez, R.J. (2007). *Caracterización de la reactividad puzolánica de materiales de origen natural, industrial y desperdicio agrícola*. Oaxaca, México: CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca.

Mehta K. y Monteiro P. (1998). *Concreto, Estructura, propiedades y materiales*. México: Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A.C.

Mehta P. K., Aitcin P. C. (1990). *Principles Underlying Production of High-Performance Concrete. Cement Concrete and Aggregates*. CCAGDP, Vol. 12 No.2 Winter 1990, pp.70-78.

Miller B.D. y Mitenberger M. A. (2004). *Chloride Ingress into Concrete in Saturated and Cyclic Wetting and Drying Environments*. EIGHTH CANMET/ACI, International conference on Fly ash, silica fume, Slag, and Natural Pozzolans in concrete; V.M Malhotra, las vegas Nevada, mayo 23-29, 2004.

Mindess, S., and Young, J. F. (1981). *Concrete*. New Jersey, USA: Prentice Hall, Inc.

Montes-García P. (2005). *Durabilidad de estructuras expuestas a un ambiente agresivo y sujetas a movimientos sísmos- Un caso de estudio en la costa de Oaxaca, México*. Paraguay:VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la construcción, CONPAT2005.

Neville A. M. (1999). *Tecnología del concreto*. México. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A.C.

Nokken Michelle, Boddy Andrea, Hooton R.D., Thomas M.D.A. (2004). *Time dependent diffusion in concrete- three laboratory studies*. Journal Cement and Concrete Research.

Papadikis M., Venuat M. (1968). *Empleo en los Cementos y Hormigones, Fabricación, Características y Aplicación de los Diversos Tipos de Cementos*, Barcelona, España: Técnicos Asociados.

Payá J., Manzó J., Borrochero M.V., Serna P. (2002). *El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas*. VII Congreso Nacional de propiedades Mecánicas de Sólidos; Gandia. pp.511-600.

PCA (2000). *Survey of Mineral Admixtures and Blended Cements in Ready Mixed Concrete*, Portland Cement Association, 2000, 16 páginas.

Pedersen, V., and Arntsen, B. (1998). *Effect of Early-Age Curing on Penetration of Chloride Ions into Concrete in the Tidal Zone, in Concrete Under Severe Conditions 2: Environment and Loading*, Vol. 1, E & FN Spon, 468-477.

Polder, R. B. (1995). *Chloride Diffusion and Resistivity Testing of Five Concrete Mixes for Marine Environment*, RILEM International Conference, Chloride Penetration into Concrete, Paris.

Powers T. C. (1949). *The non evaporable water content of hardened portland cement paste: its significance for concrete research and its method of determination*. E.U: ASTM Bul. Num 158.

Rahhal V., Talero R. (2004). *Influence of two different fly ashes on the hydration of portland cements*. Olavarría, Argentina: Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 78 pp.191-205.

Ramachandran, V.S., Feldman, R.F. (2000). *Concrete Science*. Concrete Admixtures Handbook.

Ravina Dan (a)(1996). *Mechanical properties of structural concrete incorporating a high volume of class F fly ash as partial fine sand replacement*: Materials and Structures vol. 31, pp. 84-90

Ravina Dan (b)(1996). *Properties of fresh concrete incorporating a high volume of fly ash as partial fine sand replacement*: Materials and Structures vol. 30 pp. 473-479.

Rillos, G., Sztainberg, S., Sformo, O. (2002). *Evaluación de la resistencia del hormigón a la penetración de iones cloruro - Método acelerado*. España: 4º Jornadas de Desarrollo e Innovación.

Santos de la Cruz, E., Vera, N.C. (2005). *El ultrasonido y su aplicación*. Venezuela. Revista de la facultad de ingeniería industrial. UNMSNM. Vol. 8, pp 25-28.

SIPUMEX Sistema de Puentes de México (2000). *Distribución de puentes por tipo de material*. Septiembre, 16, 2008. <http://dgcc.sct.gob.mx/index.php?id=571>

Solís, R.G., Moreno, E. I., y Castillo. R. W. (2004). *Predicción de la resistencia con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados*. Universidad autónoma de Yucatán, México. Ingeniería Revista Académica, mayo-agosto, vol. 8, número 002

Torres A. A., Martínez M. M. (2001). *Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad*. Sanfandila, Qro, México. Publicación Técnica No. 181.

Torres SM, Barbosa NP, Lima SJG, Silva AB. (1999). *A study of the brazilian northeast laterite as cement replacement materials*. University of Shiffield: Infrastructure regeneration and rehabilitation. Improving the quality of life through better construction- a vision for the next millennium. Proceedings of the international conference.

Torres, A. A. (1999). *Contenido de cloruros en puerto progreso Yucatán*. Instituto Mexicano del Transporte. (IMT). Publicación IMCYC.

Troconis de Rincon, O., Castro P., Moreno E.I., Torres- Acosta A.A, Morón de Bravo O., Arrieta I., García C., García D., Martinez-Madrid M. (2004). *Chloride profiles in two marine structures-meaning and some predictions*. Journal Building and Environment, 39 (2004) 1065-1070.

Tumidajski P.J., Chan G.W., Feldman R.F. and Strathdee G. (1995). *A Boltzmann-Matano Analysis of Chlorides Diffusion*. Journal Cement and Concrete Research, Vol. 25, No 7, pp.1556-1566.

Yang, C. C., Choa, S. W., Chi, J. M., Huang, R. (2002). *An electrochemical method for accelerated chloride migration test in cement-based materials*. RILEM International.

Yang. (2006). *On the relationship between pore structure and chloride diffusivity from accelerated chloride migration test in cement-based materials*.

Young J. Francis, Mindess S., Gray J. Robert, Bentur Arnon (1998). *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*. New Jersey E.U.: Prentice-Hall

Zega J. C., Di Maio A. A. (2007). *Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón*. Universidad nacional de la plata. Laboratorio de entrenamiento multidisciplinario. Caracas. Vol. 45, No. 2

## NORMAS

ASTM C1017/C1017M-07 (2007). Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete. United States: ASTM International.

ASTM C1231/C1231M-08a (2008). Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders. United States: ASTM International.

ASTM C125-07 (2007). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. United States: ASTM International.

ASTM C127-07 (2007). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. United States: ASTM International.

ASTM C128-07a (2007). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. United States: ASTM International.

ASTM C136-06 (2006). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. United States: ASTM International.

ASTM C138/C138M-08 (2008). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. United States: ASTM International.

ASTM C143/C143M-08 (2008). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. United States: ASTM International.

ASTM C150-07 (2007). Standard Specification for Portland Cement. United States: ASTM International.

ASTM C172-08 (2008). Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete. United States: ASTM International.

ASTM C188-95 (2003). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. United States: ASTM International.

ASTM C231-08b (2008). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. United States: ASTM International.

ASTM C29/C29M-07 (2007) Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate. United States: ASTM International.

ASTM C31/C31M-08a (2008). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. United States: ASTM International.

ASTM C311-04 (2004) Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete: ASTM International.

ASTM C33-07 (2007). Standard Specification for Concrete Aggregates. United States: ASTM International.

ASTM C39/C39M-05e1 (2005). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. United States: ASTM International.

ASTM C494/C494M-08 (2008). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. United States: ASTM International.

ASTM C597-02 (2002). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. United States: ASTM International.

ASTM C618-08 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. United States: ASTM International.

ASTM C70-06 (2006). Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate. United States: ASTM International.

ASTM C94/C94M-07 (2007). Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. United States: ASTM International.

ASTM C94/C94M-07 (2007). Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. United States: ASTM International.

FM 5-516 (2005). Florida Method of Test For Determining Low-Levels of Chloride in Concrete and Raw Materials : Florida Department Of Transportation.

NT BUILD 208 Edition 3 (1996). Concrete, Hardened: Chloride Content by Volhard Titration. Finland: NORDTEST.

NT BUILD 443 Concrete (1995). Hardened: Accelerated Chloride Penetration. Finland: NORDTEST.

## 6.2 Anexos

### 6.2.1 Diseño de concretos

A continuación se presentan las hojas de cálculo desarrolladas para la dosificación de cada concreto en estudio.

**PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CONCRETO DE ALTO COMPORTAMIENTO (AITCIN Y METHA, 1990)**

MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1354.55	1477.48	2.7	0.57	0.13		3/4
ARENA	1480.25	1644.01	2.64	1.83	1.48	3.05	
CEMENTO			3.02				
PUZOLANA			2.19				

**PASO 1 ELECCIÓN DE LA RESISTENCIA**

La resistencia que se quiere obtener se escoge de la tabla 1

49.63 Mpa

El contenido máximo de agua lo proporciona el método de diseño para diferentes resistencias (tabla 1):

183 kg/m3

El contenido de aire también es proporcionada por el método  
Corresponde al aire atrapado durante el mezclado del concreto

0.02 m3

**PASO 2 VOLUMEN TOTAL DE COMPONENTES**

El volumen de pasta recomendado para tener una resistencia óptima es de:

0.35 m3

El volumen recomendado para agregados es de:

0.65 m3

total de material cementante es =

0.1470 m3

**PASO 3 PORCION DE AGREGADOS**

De acuerdo al método la porcion de agregados varían de acuerdo a la resistencia del concreto a calcularse, y para la resistencia seleccionada la poporción es de:

	arena	grava
% de arena	0.26	m3
% de grava	0.39	m3

**PASO 4 PESO DE LOS AGREGADOS PARA 1 m3 DE CONCRETO**

Contenido de arena (seca)=

687.44 kg/m3

contenido de grava (seca)=

1053 kg/m3

**PASO 5 CALCULO DE CONTENIDO DE CEMENTO**

Adición puzolánica 0 %  
cemento 100 %

cont. de puzolana por m3 de concreto: 0.00 kg/m3  
cont. de cemento por m3 de concreto: 443.79 kg/m3

**PASO 6 CORRECCIÓN POR HUMEDAD DE LOS MATERIALES**

**AGREGADOS CONTENIENDO HUMEDAD**

Arena (húmeda) 697.61 kg/m3  
Grava (húmeda) 1054.37 kg/m3

El agua absorbida por los agregados no se toma parte del agua de mezcla y se excluye.

Por lo tanto el agua superficial aportada por los agregados es:

Arena 0 kg/m3  
Grava 0 kg/m3

**PASO 7 CORRECCIÓN DEL AGUA PARA 1m3 DE CONCRETO**

cantidad total de agua por 1m3 de concreto es: 190.04 lts/m3

Ajuste de agua por la adición de superplastificante de alto rango PLASTOL 4000

El fabricante recomienda una adición inicial mínima igual a:

7 ml/kg de cemento

Cantidad de sólidos contenidos en el superplastificante:

30 %

Cantidad de líquido contenido en el superplastificante:

0.7 % de líquido

RESUMEN DE MATERIALES (M3)							
Arena (kg)	Grava (kg)	Cemento (kg)	Puzolana (kg)	Super (ml) mínimo adicionado	Agua aportada por el superplastific ante (lts)	Agua (lts)	Rel a/c=
697.61	1054.37	443.79	0.00	3106.55	2.17	187.86	0.4124

**PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CONCRETO DE ALTO COMPORTAMIENTO (AITCIN Y METHA, 1990)**

MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1354.55	1477.48	2.7	0.57	0.13		3/4
ARENA	1480.25	1644.01	2.64	1.83	1.48	3.05	
CEMENTO			3.02				
PUZOLANA (C.V)			2.19				

**PASO 1 ELECCIÓN DE LA RESISTENCIA**

La resistencia que se quiere obtener se escoge de la tabla 1

49.63 Mpa

El contenido máximo de agua lo proporciona el método de diseño para diferentes resistencias (tabla 1):

183 kg/m3

El contenido de aire también es proporcionada por el método  
Corresponde al aire atrapado durante el mezclado del concreto

0.02 m3

**PASO 2 VOLUMEN TOTAL DE COMPONENTES**

El volumen de pasta recomendado para tener una resistencia óptima es de:

0.35 m3

El volumen recomendado para agregados es de:

0.65 %

total de material cementante es =

0.15 %

**PASO 3 PORCIÓN DE AGREGADOS**

De acuerdo al método la porción de agregados varían de acuerdo a la resistencia del concreto a calcularse, y para la resistencia seleccionada la porción es de:

	arena	grava
% de arena	0.26	m3
% de grava	0.39	m3

**PASO 4 PESO DE LOS AGREGADOS PARA 1 m3 DE CONCRETO**

Contenido de arena (seca)=  
contenido de grava (seca)=

687.44 kg/m3  
1053 kg/m3

**PASO 5 CALCULO DE CONTENIDO DE CEMENTO**

Adición puzolánica 20 %  
cemento 80 %

cont. de puzolana por m3 de concreto:  
cont. de cemento por m3 de concreto:

88.76 kg/m3  
355.03 kg/m3

**PASO 6 CORRECCIÓN POR HUMEDAD DE LOS MATERIALES**

**AGREGADOS CONTENIENDO HUMEDAD**

Arena (húmeda) 697.61 kg/m3  
Grava (húmeda) 1054.37 kg/m3

El agua absorbida por los agregados no se torna parte del agua de mezcla y se excluye.  
Por lo tanto el agua superficial aportada por los agregados es:

Arena 0 kg/m3  
Grava 0 kg/m3

**PASO 7 CORRECCIÓN DEL AGUA PARA 1m3 DE CONCRETO**

cantidad total de agua por 1m3 de concreto es:

190.04 lts/m3

Ajuste de agua por la adición de superplastificante de alto rango PLASTOL 4000

El fabricante recomienda una adición inicial mínima igual a:

3 ml/kg de cemento

Cantidad de sólidos contenidos en el superplastificante:

30 %

Cantidad de líquido contenido en el superplastificante:

0.7 % de líquido

RESUMEN DE MATERIALES (M3)							
Arena (kg)	Grava (kg)	Cemento (kg)	Puzolana (kg)	Super (ml) mínimo adicionado	Agua aportada por el superplastificante ante (lts)	Agua (lts)	Rel a/c=
697.61	1054.37	355.03	88.76	1065.10	0.75	189.29	0.4124

**PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CONCRETO DE ALTO COMPORTAMIENTO (AITCIN Y METHA, 1990)**

MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1354.55	1477.48	2.7	0.57	0.13		3/4
ARENA	1480.25	1644.01	2.64	1.83	1.48	3.05	
CEMENTO			3.02				
PUZOLANA (ARCILLA)			2.59				

**PASO 1 ELECCIÓN DE LA RESISTENCIA**

La resistencia que se quiere obtener se escoge de la tabla 1

49.63 Mpa

El contenido máximo de agua lo proporciona el método de diseño para diferentes resistencias (tabla 1):

183 kg/m3

El contenido de aire también es proporcionada por el método  
Corresponde al aire atrapado durante el mezclado del concreto

0.02 m3

**PASO 2 VOLUMEN TOTAL DE COMPONENTES**

El volumen de pasta recomendado para tener una resistencia óptima es de:

0.35 m3

El volumen recomendado para agregados es de:

0.65 m3

total de material cementante es =

0.1470 m3

**PASO 3 PORCIÓN DE AGREGADOS**

De acuerdo al método la porción de agregados varían de acuerdo a la resistencia del concreto a calcularse, y para la resistencia seleccionada la proporción es de:

	arena	grava
% de arena	0.26	m3
% de grava	0.39	m3

**PASO 4 PESO DE LOS AGREGADOS PARA 1 m3 DE CONCRETO**

Contenido de arena (seca)=

687.44 kg/m3

contenido de grava (seca)=

1053 kg/m3

**PASO 5 CALCULO DE CONTENIDO DE CEMENTO**

Adición puzolánica  
cemento

20 %  
80 %

cont. de puzolana por m3 de concreto:

88.76 kg/m3

cont. de cemento por m3 de concreto:

355.03 kg/m3

443.79

**PASO 6 CORRECCIÓN POR HUMEDAD DE LOS MATERIALES**

**AGREGADOS CONTENIENDO HUMEDAD**

Arena (húmeda) 697.61 kg/m3  
Grava (húmeda) 1054.37 kg/m3

El agua absorbida por los agregados no se torna parte del agua de mezcla y se excluye.  
Por lo tanto el agua superficial aportada por los agregados es:

Arena 0 kg/m3  
Grava 0 kg/m3

**PASO 7 CORRECCIÓN DEL AGUA PARA 1m3 DE CONCRETO**

cantidad total de agua por 1m3 de concreto es:

190.04 lts/m3

Ajuste de agua por la adición de superplastificante de alto rango PLASTOL 4000

El fabricante recomienda una adición inicial mínima igual a:

3 ml/kg de cemento

Cantidad de sólidos contenidos en el superplastificante:

30 %

Cantidad de líquido contenido en el superplastificante:

0.7 % de líquido

RESUMEN DE MATERIALES (M3)								
Arena (kg)	Grava (kg)	Cemento (kg)	Puzolana (kg)	Super (ml) mínimo adicionado	Agua aportada por el superplastificante ante (lts)	Agua (lts)	Rel a/c=	
697.61	1054.37	355.03	88.76	1065.10	0.75	189.29	0.4124	

**PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CONCRETO DE ALTO COMPORTAMIENTO (AITCIN Y METHA, 1990)**

MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1354.55	1477.48	2.7	0.57	0.13		3/4
ARENA	1480.25	1644.01	2.64	1.83	1.48	3.05	
CEMENTO			3.02				
PUZOLANA (C.V)			2.19				

**PASO 1 ELECCIÓN DE LA RESISTENCIA**

La resistencia que se quiere obtener se escoge de la tabla 1

49.63 Mpa

El contenido máximo de agua lo proporciona el método de diseño para diferentes resistencias (tabla 1):

183 kg/m3

El contenido de aire también es proporcionada por el método  
Corresponde al aire atrapado durante el mezclado del concreto

0.02 m3

**PASO 2 VOLUMEN TOTAL DE COMPONENTES**

El volumen de pasta recomendado para tener una resistencia óptima es de:

0.35 m3

El volumen recomendado para agregados es de:

0.65 %

total de material cementante es =

0.15 %

**PASO 3 PORCIÓN DE AGREGADOS**

De acuerdo al método la porción de agregados varían de acuerdo a la resistencia del concreto a calcularse, y para la resistencia seleccionada la porción es de:

	arena	grava
% de arena	0.26	
% de grava	0.39	

**PASO 4 PESO DE LOS AGREGADOS PARA 1 m3 DE CONCRETO**

Contenido de arena (seca)=  
contenido de grava (seca)=

687.44 kg/m3  
1053 kg/m3

**PASO 5 CALCULO DE CONTENIDO DE CEMENTO**

Adición puzolánica 40 %  
cemento 60 %

cont. de puzolana por m3 de concreto: 177.52 kg/m3  
cont. de cemento por m3 de concreto: 266.28 kg/m3

**PASO 6 CORRECCIÓN POR HUMEDAD DE LOS MATERIALES**

**AGREGADOS CONTENIENDO HUMEDAD**

Arena (húmeda) 697.61 kg/m3  
Grava (húmeda) 1054.37 kg/m3

El agua absorbida por los agregados no se torna parte del agua de mezcla y se excluye.  
Por lo tanto el agua superficial aportada por los agregados es:

Arena 0 kg/m3  
Grava 0 kg/m3

**PASO 7 CORRECCIÓN DEL AGUA PARA 1m3 DE CONCRETO**

cantidad total de agua por 1m3 de concreto es: 190.04 lts/m3

Ajuste de agua por la adición de superplastificante de alto rango PLASTOL 4000

El fabricante recomienda una adición inicial mínima igual a:

3 ml/kg de cemento

Cantidad de sólidos contenidos en el superplastificante:

30 %

Cantidad de líquido contenido en el superplastificante:

0.7 % de líquido

RESUMEN DE MATERIALES (M3)							
Arena (kg)	Grava (kg)	Cemento (kg)	Puzolana (kg)	Super (ml) mínimo adicionado	Agua aportada por el superplastificante (lts)	Agua (lts)	Rel a/c=
697.61	1054.37	266.28	177.52	798.83	0.56	189.48	0.4124

**CÁLCULO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DEL ACI**

MATERIAL	FVSS (kg/m3)	FVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1354.55	1477.48	2.7	0.57	0.13		3/4
ARENA	1480.25	1644.01	2.64	1.83	1.48	3.05	
CEMENTO			3.02				
PUZOLANA			2.59				

$f'c = 266.00$  kg/cm<sup>2</sup>  
 $f'cr = 350.00$  kg/cm<sup>2</sup> De la tabla 9-11  
 Rel a/mc = **0.480** Valor interpolado tabla 9-3  
 Resistencia rel a/c sin a.i.  

350	0.48
350	?
300	0.55

 Rel a/c = **0.40** Relación agua/cemento correspondiente a diseño por durabilidad para una zona agresiva Tabla 9.1  
**Gobierna la menor relación 0.40**  
 % de adición puzolánica **0.00** %  
 Cont. de aire **2.00** % El diseño no incluye aire, sin embargo la tabla 9-5 marca 2% de aire atrapado  
 Rev = **75.00** mm Revenimiento deseado  
 Agua = **205.00** kg/m<sup>3</sup> Para agregado de 3/4" (19mm) y rev de 75 mm sin aire incluido tabla 9-5  
 Para a.g triturado se respeta este valor  
 Para a.g subangular se resta 10 kg/m<sup>3</sup>  
 Para a.g con algunas partículas trituradas se resta 20 kg/m<sup>3</sup>  
 Para a.g de partículas redondeadas se resta 25 kg/m<sup>3</sup>  
 Cemento = **205.00** kg/m<sup>3</sup> > a **320** kg/m<sup>3</sup> de cemento necesario para una zona agresiva tabla 9-7  
 Puzolana = **0.00** kg/m<sup>3</sup>  
 Cemento = **512.50**  
 Grava = **0.595** M:F **879.10** Vol. de a.g por Vol. unit de concreto **0.62** Valor interpolado de la tabla 9-4  

3	0.6
3.05	?
2.8	0.62

 AGUA = **0.21** m3  
 CEMENTO = **0.17** m3  
 PUZOLANA = **0.00** m3  
 GRAVA = **0.33** m3  
 AIRE = **0.02** m3  
 TOTAL = **0.72** m3  
 Diferencia = **0.28** m3  
 ARENA = **739.39** kg/m<sup>3</sup>  
 Ajuste de agua por la adición de superplastificante de alto rango PLASTOL 4000  
 El fabricante recomienda una adición inicial mínima igual a:  
 Cantidad de sólidos contenidos en el superplastificante: **7** ml/kg de cemento  
 Cantidad de líquido contenido en el superplastificante: **30** %  
**0.7** % de líquido

RESUMEN

MATERIAL	KG
AGUA	205.00
CEMENTO	512.50
PUZOLANA	0.00
A. GRUESO (SECO)	879.10
A. FINO (SECO)	739.39
MASA TOTAL	2335.99
SUPERPLASTIFICANTE	3587.50
AGUA APORT. SUP.	2.51

CORRECIÓN POR HUMEDAD

CONTENIDO DE HUMEDAD EN AGREGADOS

GRAVA	880.24
ARENA	750.33
HUMEDAD SUPERFICIAL APORTADA	
GRAVA	-0.00440
ARENA	-0.00350

MATERIAL	KG/M3
AGUA	208.94
CEMENTO	512.50
PUZOLANA	0.00
A. GRUESO	880.24
A. FINO	750.33
MASA TOTAL	2352.02
SUPERPLASTIFICANTE	3587.50

Para 80 lt

MATERIAL	KG/M3
AGUA	16.72
CEMENTO	41.00
PUZOLANA (ARCILLA)	0.00
A. GRUESO	70.42
A. FINO	60.03
MASA TOTAL	
SUPERPLASTIFICANTE	287.00

1.57 lt por cilindro  
 43.9 de 28 cilindros  
 20 contenido de aire  
 65.47 suma  
 9.82 desperdicio  
**75.29 total**

**CÁLCULO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DEL ACI**

MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1354.55	1477.48	2.7	0.57	0.13		3/4
ARENA	1485.26	1628.55	2.63	1.82	3.68	2.92	
CEMENTO			3.02				
PUZOLANA			2.59				

$f'c = 266.00$  kg/cm<sup>2</sup>  
 $f'cr = 350.00$  kg/cm<sup>2</sup> De la tabla 9-11  
 Rel a/mc = **0.480** Valor interpolado tabla 9-3

Resistencia rel a/c sin a.i.  

350	0.48
350	?
300	0.55

Rel a/c = **0.40** Relación agua/cemento correspondiente a diseño por durabilidad para una zona agresiva Tabla 9.1  
**Gobierna la menor relación 0.48**

% de adición puzolánica **0.00** %  
 Cont. de aire **2.00** % El diseño no incluye aire, sin embargo la tabla 9-5 marca 2% de aire atrapado  
 Rev = **75.00** mm Revenimiento deseado  
 Agua = **205.00** kg/m<sup>3</sup> Para agregado de 3/4" (19mm) y rev de 75 mm sin aire incluido tabla 9-5  
 Para a.g triturado se respeta este valor  
 Para a.g subangular se resta 10 kg/m<sup>3</sup>  
 Para a.g con algunas partículas trituradas se resta 20 kg/m<sup>3</sup>  
 Para a.g de partículas redondeadas se resta 25 kg/m<sup>3</sup>

Cemento = **205.00** kg/m<sup>3</sup> > a **320** kg/m<sup>3</sup> de cemento necesario para una zona agresiva tabla 9-7  
 Puzolana = **0.00** kg/m<sup>3</sup>  
 Cemento = **427.08**

Grava = M:F Vol.de a.g por Vol.unit de concreto Valor interpolado de la tabla 9-4  

3	0.6
2.92	?
2.8	0.62

Grava = **0.608** **898.31** kg

AGUA = **0.21** m<sup>3</sup>  
 CEMENTO = **0.14** m<sup>3</sup>  
 PUZOLANA = **0.00** m<sup>3</sup>  
 GRAVA = **0.33** m<sup>3</sup>  
 AIRE = **0.02** m<sup>3</sup>  
 TOTAL = **0.70** m<sup>3</sup>  
 Diferencia = **0.30** m<sup>3</sup>  
 ARENA = **791.18** kg/m<sup>3</sup>

Ajuste de agua por la adición de superplastificante de alto rango PLASTOL 4000  
 El fabricante recomienda una adición inicial mínima igual a: **0** ml/kg de cemento  
 Cantidad de sólidos contenidos en el superplastificante: **30** %  
 Cantidad de líquido contenido en el superplastificante: **0.7** % de líquido

RESUMEN

MATERIAL	KG
AGUA	205.00
CEMENTO	427.08
PUZOLANA	0.00
A. GRUESO (SECO)	898.31
A. FINO (SECO)	791.18
MASA TOTAL	2321.57
SUPERPLASTIFICANTE	0.00
AGUA APORT. SUP.	0.00

CORRECCIÓN POR HUMEDAD

CONTENIDO DE HUMEDAD EN AGREGADOS

GRAVA	899.46
ARENA	820.29
HUMEDAD SUPERFICIAL APORTADA	
GRAVA	-0.00442
ARENA	0.01860

MATERIAL	KG/M3
AGUA	194.25
CEMENTO	427.08
PUZOLANA	0.00
A. GRUESO	899.46
A. FINO	820.29
MASA TOTAL	2341.09
SUPERPLASTIFICANTE	0.00

Para 80 lt

MATERIAL	KG/M3
AGUA	15.54
CEMENTO	34.17
PUZOLANA (ARCILLA)	0.00
A. GRUESO	71.96
A. FINO	65.62
MASA TOTAL	
SUPERPLASTIFICANTE	0.00

1.56 lt por cilindro  
 43.7 de 28 cilindros  
 20 contenido de aire  
 65.26 suma  
 9.79 desperdicio  
**75.05 total**

**CÁLCULO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DEL ACI**

MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1354.55	1477.48	2.7	0.57	0.13		3/4
ARENA	1480.25	1644.01	2.63	1.83	1.48	3.05	
CEMENTO			3.02				
PUZOLANA			2.59				

$f'c = 266.00$  kg/cm<sup>2</sup>  
 $f'cr = 350.00$  kg/cm<sup>2</sup> De la tabla 9-11  
 Rel a/mc = **0.480** Valor interpolado tabla 9-3  
 Resistencia rel a/c sin a.i.  

350	0.48
350	?
300	0.55

 Rel a/c = **0.40** Relación agua/cemento correspondiente a diseño por durabilidad para una zona agresiva Tabla 9.1  
**Gobierna la menor relación 0.48**  
 % de adición puzolánica **20.00** %  
 Cont. de aire **2.00** % El diseño no incluye aire, sin embargo la tabla 9-5 marca 2% de aire atrapado  
 Rev = **75.00** mm Revenimiento deseado  
 Agua = **205.00** kg/m<sup>3</sup> Para agregado de 3/4" (19mm) y rev de 75 mm sin aire incluido tabla 9-5  
 Para a.g triturado se respeta este valor  
 Para a.g subangular se resta 10 kg/m3  
 Para a.g con algunas partículas trituradas se resta 20 kg/m3  
 Para a.g de partículas redondeadas se resta 25 kg/m3  
 Cemento = **205.00** kg/m<sup>3</sup>  
 Puzolana = **427.08** kg/m<sup>3</sup> > a **320** kg/m<sup>3</sup> de cemento necesario para una zona agresiva tabla 9-7  
 Cemento = **85.42** kg/m3  
 Cemento = **341.67**  
 Grava = M:F Vol. de a.g por Vol. unit de concreto Valor interpolado de la tabla 9-4  

3	0.6
3.05	?
2.8	0.62

 Grava = **0.595** **879.10** kg  
 AGUA = **0.21** m3  
 CEMENTO = **0.11** m3  
 PUZOLANA = **0.03** m3  
 GRAVA = **0.33** m3  
 AIRE = **0.02** m3  
 TOTAL = **0.70** m3  
 Diferencia = **0.30** m3  
 ARENA = **797.56** kg/m3  
 Ajuste de agua por la adición de superplastificante de alto rango PLASTOL 4000  
 El fabricante recomienda una adición inicial mínima igual a: **7** ml/kg de cemento  
 Cantidad de sólidos contenidos en el superplastificante: **30** %  
 Cantidad de líquido contenido en el superplastificante: **0.7** % de líquido

RESUMEN

MATERIAL	KG
AGUA	205.00
CEMENTO	341.67
PUZOLANA	85.42
A. GRUESO (SECO)	879.10
A. FINO (SECO)	797.56
MASA TOTAL	2308.75
SUPERPLASTIFICANTE	2391.67
AGUA APORT. SUP.	1.67

CORRECCIÓN POR HUMEDAD

CONTENIDO DE HUMEDAD EN AGREGADOS

GRAVA	880.24
ARENA	809.37

HUMEDAD SUPERFICIAL APORTADA

GRAVA	-0.00440
ARENA	-0.00350

MATERIAL	KG/M3
AGUA	<b>209.99</b>
CEMENTO	<b>341.67</b>
PUZOLANA	<b>85.42</b>
A. GRUESO	<b>880.24</b>
A. FINO	<b>809.37</b>
MASA TOTAL	<b>2326.68</b>
SUPERPLASTIFICANTE	<b>2391.67</b>

Para 80 lt

MATERIAL	KG/M3
AGUA	<b>16.80</b>
CEMENTO	<b>27.33</b>
PUZOLANA (ARCILLA)	<b>6.83</b>
A. GRUESO	<b>70.42</b>
A. FINO	<b>64.75</b>
MASA TOTAL	<b>186.13</b>
SUPERPLASTIFICANTE	<b>191.33</b>

1.55 lt por cilindro  
 43.43 de 28 cilindros  
 20 contenido de aire  
 64.98 suma  
 9.75 desperdicio  
**74.73 total**

**DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO POR EL MÉTODO DE LAS CURVAS DE ABRAMS**

MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1354.55	1477.48	2.7	0.57	0.13		3/4"
ARENA	1485.26	1628.55	2.63	1.82	4.14	2.92	
CEMENTO			3.02				

$f'c = 227.3$  kg/cm<sup>2</sup>  
 $f'c(fs10\%) = 250.03$  kg/cm<sup>2</sup>  
 Datos por peso Rel a/c = 0.55 Valores obtendos de la curva "A"  
 Rel g/a = 1.25 Valores obtendos de la curva lamina 1 (resolver la ec de grafico)  
 Agua = 188.75 kg/m<sup>3</sup> Valores obtendos de la curva lamina 2  
 Datos en volumen  
 Rel a/c 1.66 lts  
 Cemento 113.67 lts  
 agua + cemento 302.42 lts  
 grava + arena 697.58 lts  
 rel G/A en vol 2.22 lts  
 Arena 314.56 lts  
 Grava 383.01 lts

MATERIAL	DENSIDAD	LTS.	KG
ARENA	2.63	314.56	827.30
GRAVA	2.70	383.01	1034.13
CEMENTO	3.02	113.67	343.18
AGUA	1.00	188.75	188.75

**PASO 6 CORRECCIÓN POR HUMEDAD DE LOS MATERIALES**

**AGREGADOS CONTENIENDO HUMEDAD**

Arena (húmeda) 861.56 kg/m<sup>3</sup>  
 Grava (húmeda) 1035.45 kg/m<sup>3</sup>

El agua absorbida por los agregados no se torna parte del agua de mezcla y se excluye.

Por lo tanto el agua superficial aportada por los agregados es:

Arena 0.02 kg/m<sup>3</sup>  
 Grava 0 kg/m<sup>3</sup>

**PASO 7 CORRECCIÓN DEL AGUA PARA 1m3 DE CONCRETO**

cantidad total de agua por 1m3 de concreto es: 174.13 lts/m<sup>3</sup>

MATERIAL	KG	PARA 80 LTS.
ARENA	861.56	68.92
GRAVA	1035.45	82.84
CEMENTO	343.18	27.45
AGUA	174.13	13.93

## 6.2.2 Resultados de pruebas en concreto en estado fresco

A continuación se muestran las hojas de control con valores obtenidos durante la elaboración de las mezclas en estudio.

MEZCLA **1-HPC .41**  
 FECHA DE ELAB. 22 de febrero de 2008 HORA: 11:00 hrs  
 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO  
 CONT. DE S. PLAST. 200 ml  
 REVENIMIENTO: 8.50 9.00 9.50 cm  
 TEMPERATURA: 25.00 25.00 24.50 °C  
 PESO VOLUMÉTRICO:  
 PESO (TARA): 4.76 VOLUMEN: 0.01 m3 TARA+MAT. 28.90 P.V. 2414.40 kg/m3  
 CONTENIDO DE AIRE: 1,8 %

MEZCLA **2-HPC .41-20% C.V.**  
 FECHA DE ELAB. 14 de Febrero de 2008 HORA: 10:30 hrs  
 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO  
 CONT. DE S. PLAST. 100 ml  
 REVENIMIENTO: 5.50 6.50 6.00  
 TEMPERATURA: 23.50 24.00 23.50  
 PESO VOLUMÉTRICO:  
 PESO (TARA): 4.76 VOLUMEN: 0.01 m3 TARA+MAT. 28.65 kg P.V. 2389.40 kg/m3  
 CONTENIDO DE AIRE: 2 %

MEZCLA **3-HPC .41-20% ARC.**  
 FECHA DE ELAB. 26 de febrero de 2008 HORA: 11:10 hrs  
 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO  
 CONT. DE S. PLAST. 400.00  
 REVENIMIENTO: 5.50 6.00 5.00  
 TEMPERATURA: 25.00 25.00 24.50  
 PESO VOLUMÉTRICO:  
 PESO (TARA): 4.76 VOLUMEN: 0.01 m3 TARA+MAT. 28.75 kg P.V. 2399.40 kg/m3  
 CONTENIDO DE AIRE: 2 %

MEZCLA **4-HPC .41-40% C.V.**  
 FECHA DE ELAB. 27 de Febrero de 2008 HORA: 12:00 hrs  
 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO  
 CONT. DE S. PLAST. 150 ML  
 REVENIMIENTO: 7.50 9.70 9.00  
 TEMPERATURA: 24.50 24.50 24.50  
 PESO VOLUMÉTRICO:  
 PESO (TARA): 4.76 VOLUMEN: 0.01 m3 TARA+MAT. 28.20 kg P.V. 2344.40 kg/m3  
 CONTENIDO DE AIRE: 1,85 %

MEZCLA **5-ACI 0.40**  
 FECHA DE ELAB. 28 de febrero de 2008 HORA: 11:30 hrs  
 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO  
 CONT. DE S. PLAST. 100 ml  
 REVENIMIENTO: 7.50 7.00 7.50  
 TEMPERATURA: 24.50 24.50 24.50  
 PESO VOLUMÉTRICO:  
 PESO (TARA): 4.76 VOLUMEN: 0.01 m3 TARA+MAT. 27.95 kg P.V. 2319.40 kg/m3  
 CONTENIDO DE AIRE: 1,95 %

MEZCLA **6-ACI 0.48**  
 FECHA DE ELAB. 5 de marzo de 2008 HORA: 13:00 hrs  
 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO  
 CONT. DE S. PLAST. 0 ml  
 REVENIMIENTO: 7.80 7.50 8.50  
 TEMPERATURA: 25.50 26.00 26.00  
 PESO VOLUMÉTRICO:  
 PESO (TARA): 4.76 VOLUMEN: 0.01 m3 TARA+MAT. 28.25 kg P.V. 2349.40 kg/m3  
 CONTENIDO DE AIRE: 2 %

MEZCLA **7-ACI 0.48-20% ARC.**  
 FECHA DE ELAB. 25 de febrero de 2008 HORA: 10:40 hrs  
 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO  
 CONT. DE S. PLAST. 100.00  
 REVENIMIENTO: 4.50 4.00 3.50  
 TEMPERATURA: 24.00 24.00 24.00  
 PESO VOLUMÉTRICO:  
 PESO (TARA): 4.76 VOLUMEN: 0.01 m3 TARA+MAT. 28.45 kg P.V. 2369.40 kg/m3  
 CONTENIDO DE AIRE: 1,9 %

MEZCLA **8-ABRAMS 0.55**  
 FECHA DE ELAB. 6 de Marzo de 2008 HORA: 10:30 hrs  
 PRUEBAS EN ESTADO FRESCO  
 CONT. DE S. PLAST. 0 ml  
 REVENIMIENTO: 6.50 7.50 7.40  
 TEMPERATURA: 24.00 24.00 23.50  
 PESO VOLUMÉTRICO:  
 PESO (TARA): 4.76 VOLUMEN: 0.01 m3 TARA+MAT. 28.45 kg P.V. 2369.40 kg/m3  
 CONTENIDO DE AIRE: 1,9 %

### 6.2.3 Resultado de pruebas en concreto en estado endurecido

A continuación se muestran los datos en extenso de pruebas evaluadas en el presente estudio. Las pruebas comprende resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico y coeficiente de difusión de cloruros.

#### 6.2.3.1 Resistencia a compresión

Los valores corresponden a especímenes de cada mezcla en estudio probados a diversas edades.

Identificación del concreto	1	2	3	4	5	6	7	8
Edad de prueba (Días)	f'c (MPa)							
1	21.70	17.26	20.02	7.37	19.97	16.96	15.14	9.44
	22.84	15.73	21.09	7.59	21.64	13.98	14.36	8.97
	20.85	15.59	19.33	7.19	19.62	17.03	15.67	9.46

Identificación del concreto	1	2	3	4	5	6	7	8
3	37.46	24.75	25.61	14.86	31.32	28.72	24.40	19.19
	36.92	25.73	30.05	15.61	33.66	25.43	24.82	18.63
	35.50	27.10	27.03	15.89	32.29	24.42	26.14	22.36
7	43.08	34.78	34.32	25.65	40.69	36.05	28.75	28.34
	41.17	35.83	31.97	22.00	42.93	34.39	29.76	23.75
	44.31	35.58	33.96	24.39	40.42	36.19	30.84	24.44
14	48.71	36.94	33.89	29.08	45.97	38.61	34.13	24.92
	45.68	39.05	35.10	26.06	46.49	37.95	33.79	34.24
	47.01	37.47	36.71	28.73	42.99	41.77	33.31	30.99
28	50.23	42.84	39.65	35.03	46.70	41.34	33.59	38.37
	51.65	42.20	38.71	32.86	48.90	42.60	37.43	31.60
	49.43	43.95	40.18	32.23	48.71	45.14	36.31	35.29
	50.95							
56	55.60	51.53	38.91	39.09	50.26	45.04	37.58	32.06
	55.57	53.82	39.31	38.50	50.01	45.01	37.10	32.69
	49.74	47.10	40.17	37.04	53.00	46.14	36.97	35.67
		52.28						32.81
90	60.07	56.15	44.50	44.72	52.86	44.76	39.56	36.57
	58.67	54.17	45.28	42.98	55.88	43.17	39.76	38.73
	59.88	54.40	47.31	46.37	54.85	45.46	36.51	34.48
	59.88	53.70	47.43	41.87	57.51	45.18	37.18	37.51
	62.19				56.91		37.84	39.78

### 6.2.3.2 Velocidad promedio de pulso ultrasónico

Los valores corresponden al valor promedio de monitoreo diario de dos especímenes de cada mezcla en estudio.

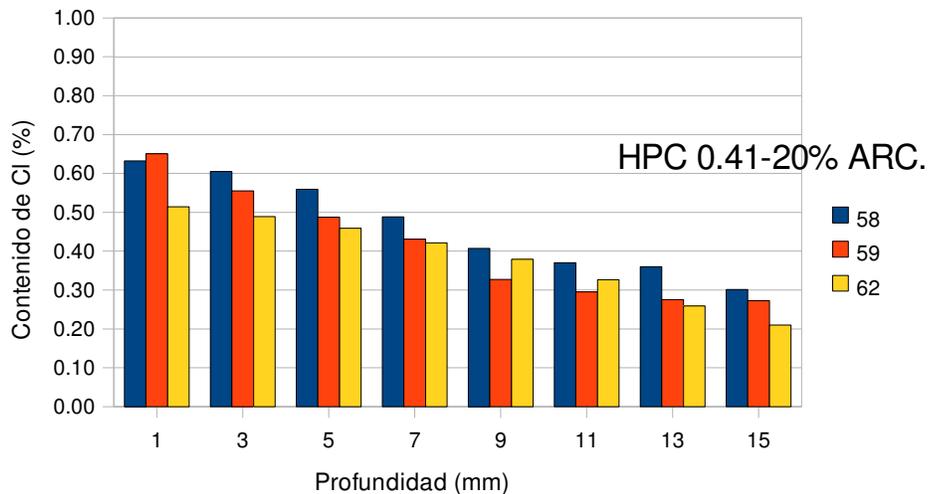
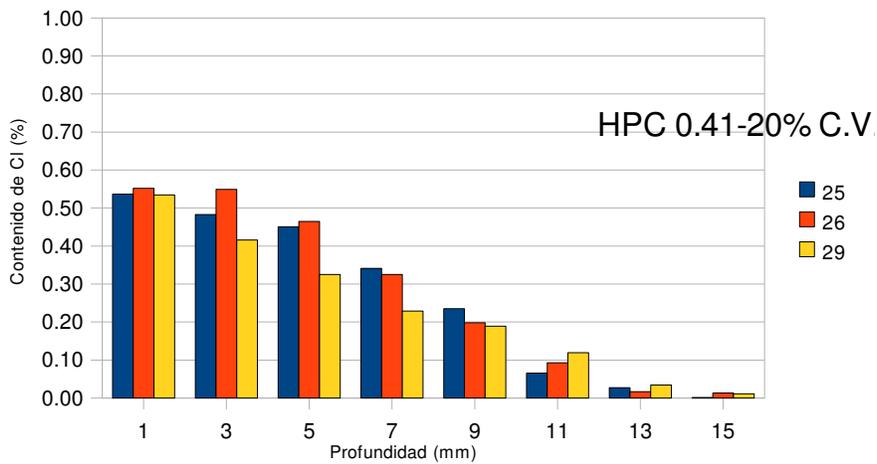
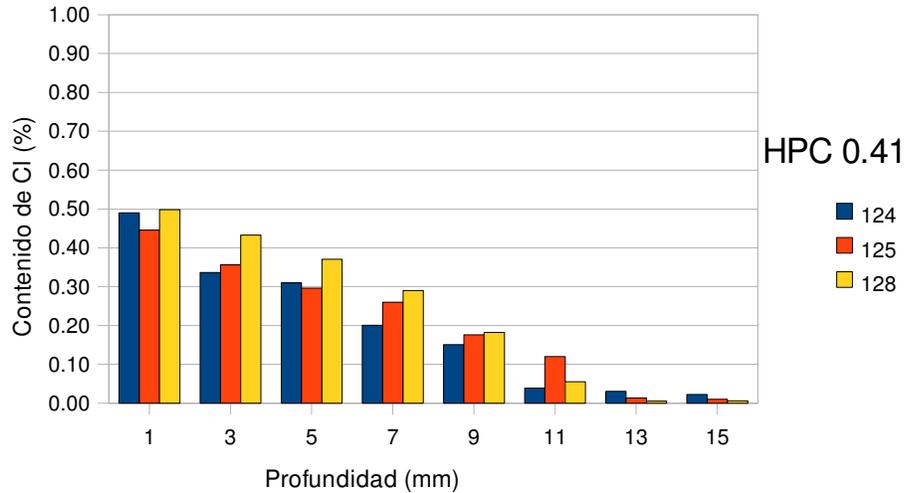
Concreto	1	2	3	4	5	6	7	8
Día	VPU (m/s)							
1	4116.08	4094.27	4499.90	3760.47	4166.83	4026.29	3981.52	4044.49
2	4587.25	4335.59	4540.35	4200.16	4324.45	4270.04	4223.98	4561.06
3	4756.25	4511.12	4571.72	4383.48	4556.19	4292.81	4395.94	4689.39
4	4944.38	4560.45	4624.78	4402.36	4587.18	4556.66	4563.15	4592.43
5	5052.57	4570.88	4678.37	4490.02	4684.07	4613.62	4588.34	4662.11
6	5155.50	4615.83	4683.94	4515.50	4695.07	4629.73	4553.74	4694.84
7	5103.24	4654.79	4723.08	4541.00	4739.34	4645.92	4621.92	4722.61
8	4914.03	4801.98	4728.56	4625.67	4778.98	4717.40	4717.40	4819.39

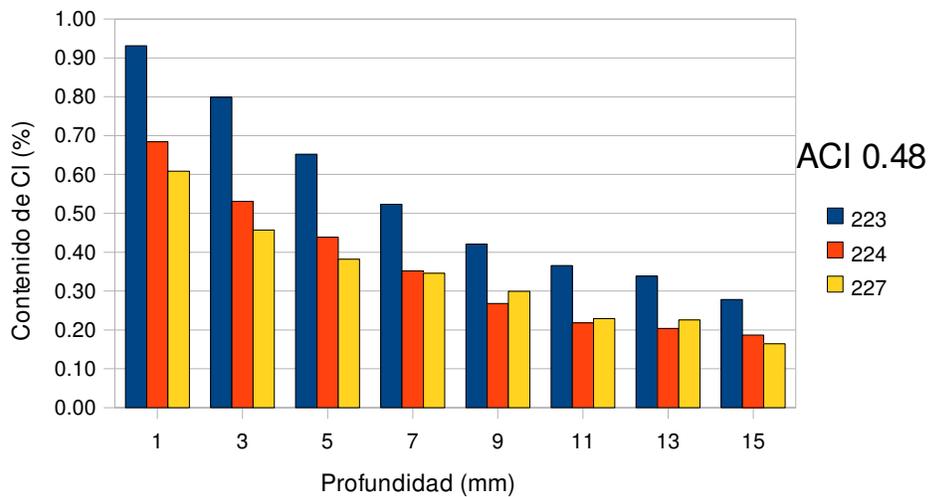
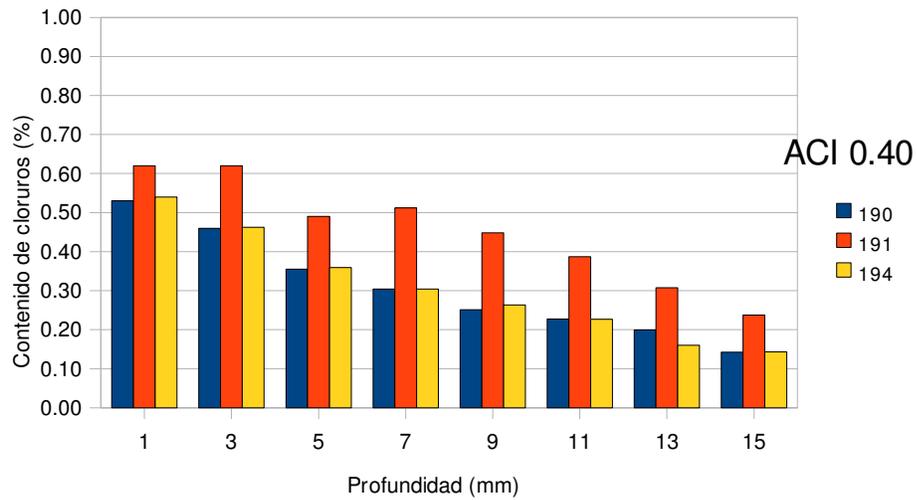
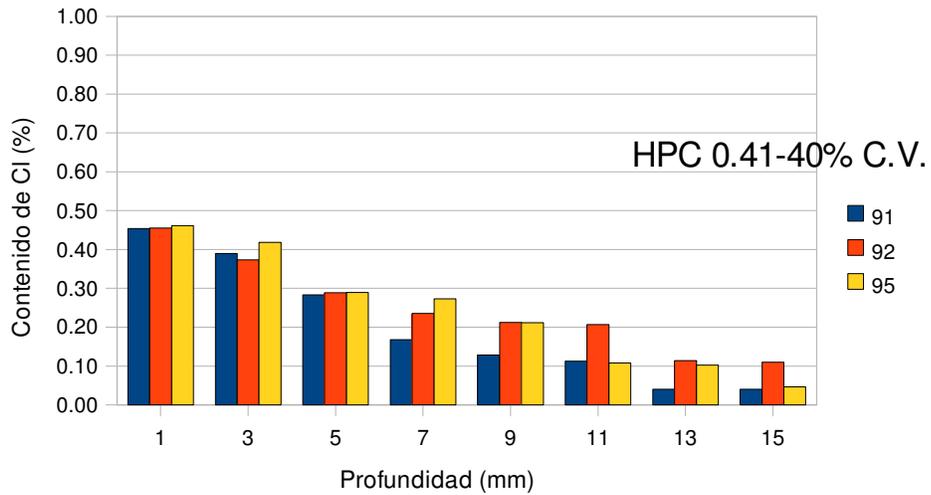
Concreto	1	2	3	4	5	6	7	8
9	4932.19	4848.55	4802.48	4646.27	4825.10	4756.41	4734.26	4819.39
10	4944.38	4707.55	4819.98	4680.21	4813.48	4762.15	4728.56	4854.40
11	4981.70	4745.77	4802.26	4684.77	4796.19	4762.15	4739.76	4836.82
12	5000.28	4987.53	4808.14	4679.14	4830.92	4767.91	4767.75	4854.40
13	5018.89	5038.29	4807.94	4706.53	4842.64	4779.14	4768.40	4860.27
14	5025.25	4987.53	4825.27	4717.40	4860.33	4784.80	4785.37	4878.08
15	5069.72	4963.05	4831.17	4757.06	4890.24	4819.28	4790.98	4938.30
16	5057.54	4902.23	4902.23	4745.50	4890.24	4860.33	4808.69	4962.78
17	5000.03	4902.23	4903.40	4784.72	4890.44	4890.00	4779.53	4968.95
18	5012.66	4861.14	4897.20	4756.79	4896.32	4901.99	4813.82	4981.33
19	5037.82	4902.08	4903.02	4779.80	4902.23	4920.12	4785.13	4987.53
20	5056.96	4890.44	4926.86	4848.83	4920.12	4932.25	4773.95	5000.00
21	5063.32	4890.44	4956.64	4860.62	4981.95	4956.70	4797.16	5012.53
22	5057.09	4884.19	4944.56	4872.98	5000.50	4969.01	4860.27	5025.16
23	5044.21	4908.34	4920.12	4902.43	5038.07	4962.90	4884.07	5050.51
24	5076.67	4909.22	4932.25	4932.55	5063.58	4981.39	4908.16	5056.90
25	5050.63	4903.40	4956.70	4963.05	5089.19	4993.83	4920.41	5056.90
26	5056.90	4915.46	4969.14	4987.81	5089.19	4993.83	4956.82	5056.90
27	5242.55	4920.95	4981.51	4975.40	5095.75	5000.13	4963.05	5063.32
28	5270.17	4927.18	4981.51	4993.95	5102.17	5006.33	4969.32	5076.17
29	5284.03	4963.88	4994.14	4993.95	5095.62	5006.45	4969.32	5082.60
30	5312.09	4981.95	4993.95	4993.95	5089.09	5019.02	4975.40	5082.60
31	5354.76	4938.75	5000.28	5000.28	5089.09	5025.41	4981.51	5082.60
32	5340.54	4938.75	5013.04	5006.45	5089.09	5031.84	4987.81	5082.60
33	5312.32	4944.75	5013.04	5006.45	5095.55	5038.07	4981.70	5089.06
34	5361.97	4956.82	5025.63	5012.81	5102.07	5038.07	4994.39	5095.55
35	5361.97	4988.03	5038.29	5025.41	5108.57	5044.34	4988.03	5095.55
36	5347.59	5000.78	5038.29	5025.41	5115.09	5050.79	4988.03	5102.04
37	5347.59	5051.66	5038.29	5025.41	5115.09	5057.29	4988.03	5108.57
38	5354.76	5051.66	5038.29	5031.65	5115.09	5063.81	4994.39	5115.09
39	5354.76	5071.09	5038.29	5031.65	5121.65	5070.11	5000.50	5121.65
40	5354.76	5058.26	5069.91	5031.65	5121.65	5070.11	5006.64	5121.65
41	5361.97	5084.96	5069.91	5031.65	5121.65	5076.44	5006.64	5128.21
42	5369.14	5091.73	5076.44	5044.34	5121.65	5082.99	5006.64	5128.21
43	5369.14	5097.93	5082.80	5050.79	5128.21	5082.99	5006.64	5141.39
44	5369.14	5135.81	5089.19	5050.79	5128.21	5095.95	5006.64	5141.39
45	5369.14	5162.33	5095.75	5057.29	5128.21	5095.95	5012.81	5141.39
46	5369.14	5142.61	5095.75	5063.58	5128.21	5095.95	5019.21	5148.01
47	5383.59	5149.45	5102.17	5070.11	5128.21	5095.95	5019.21	5154.67
48	5383.59	5155.87	5102.17	5076.44	5128.21	5095.95	5019.21	5161.30
49	5383.59	5162.33	5108.63	5082.99	5128.21	5108.97	5019.21	5161.30
50	5383.59	5182.22	5121.71	5089.59	5141.39	5108.97	5025.63	5161.30

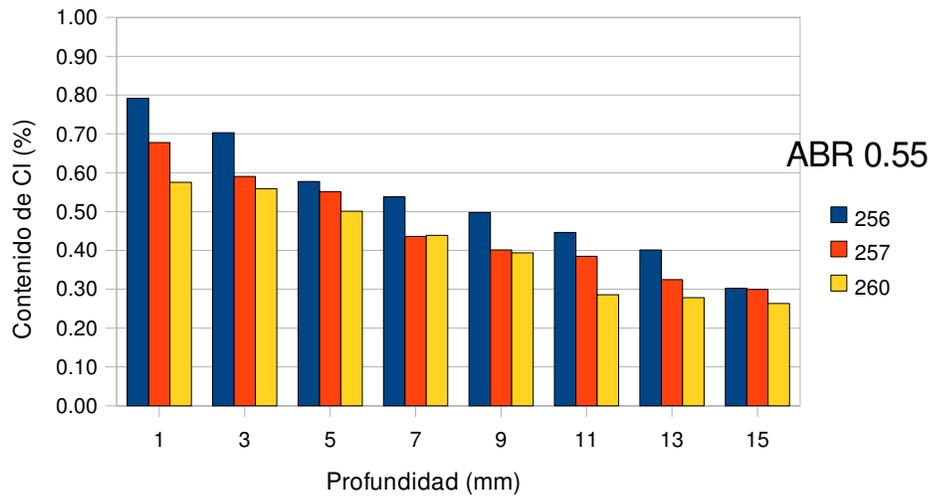
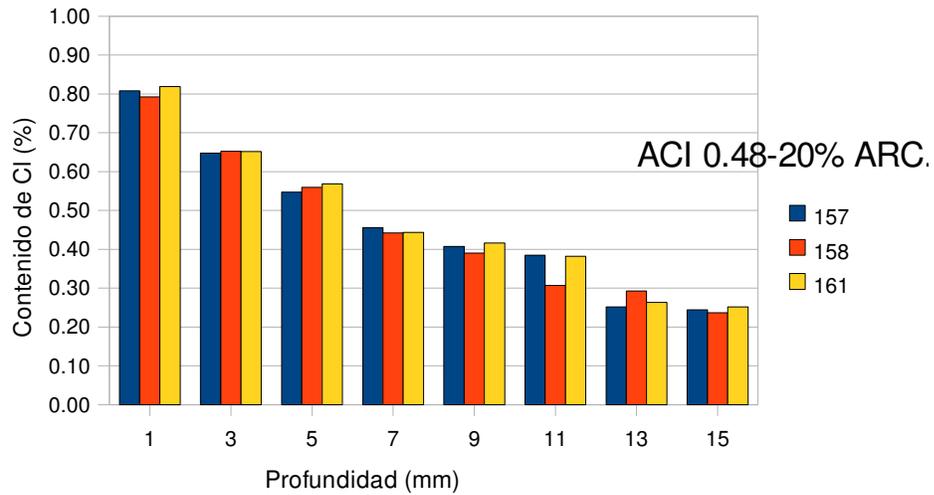
Concreto	1	2	3	4	5	6	7	8
51	5390.87	5181.90	5121.71	5089.59	5141.39	5115.62	5031.84	5161.30
52	5390.87	5188.77	5128.34	5102.57	5141.39	5122.05	5031.84	5161.30
53	5398.12	5195.68	5128.34	5108.97	5148.01	5122.05	5031.84	5174.65
54	5398.12	5195.68	5128.34	5115.62	5148.01	5122.05	5031.84	5174.65
55	5405.44	5195.68	5135.00	5115.62	5148.01	5122.05	5038.29	5174.65
56	5405.44	5195.68	5135.00	5128.74	5148.01	5122.05	5044.53	5181.35
57	5420.09	5202.27	5141.52	5128.74	5161.30	5128.74	5044.53	5174.65
58	5420.09	5202.27	5141.52	5135.47	5161.30	5135.20	5044.53	5194.81
59	5420.09	5215.56	5141.52	5135.47	5161.30	5135.20	5044.53	5194.81
60	5420.09	5229.20	5148.22	5135.47	5181.35	5141.93	5051.02	5194.81
61	5427.50	5235.93	5148.22	5141.93	5181.35	5141.93	5051.02	5208.33
62	5427.50	5235.93	5154.78	5148.70	5181.35	5141.93	5051.02	5208.33
63	5434.94	5242.91	5161.51	5148.70	5188.08	5148.42	5057.29	5208.33
64	5434.94	5242.91	5161.51	5155.19	5194.81	5148.42	5057.29	5215.13
65	5434.94	5249.67	5174.86	5161.99	5194.81	5155.19	5057.29	5221.93
66	5442.27	5256.47	5174.86	5161.99	5194.81	5161.71	5057.29	5221.93
67	5449.75	5263.49	5181.49	5175.35	5201.57	5161.71	5063.58	5221.93
68	5449.75	5270.32	5188.15	5181.90	5208.33	5161.71	5070.11	5221.93
69	5464.64	5277.38	5194.95	5188.77	5208.33	5161.71	5070.11	5228.77
70	5464.64	5284.25	5194.95	5195.37	5208.33	5168.27	5070.11	5235.60
71	5464.64	5291.34	5201.64	5195.37	5221.93	5168.27	5076.44	5242.47
72	5472.21	5291.34	5215.20	5195.37	5221.93	5168.27	5076.44	5242.47
73	5472.21	5291.34	5215.20	5208.90	5221.93	5168.27	5076.44	5249.34
74	5487.23	5298.25	5221.97	5208.90	5228.77	5175.07	5076.44	5249.34
75	5487.23	5305.38	5221.97	5208.90	5235.60	5181.66	5076.44	5256.25
76	5494.88	5312.32	5228.84	5222.50	5242.47	5188.50	5076.44	5256.25
77	5494.88	5319.49	5235.64	5222.50	5242.47	5188.50	5082.99	5256.25
78	5502.32	5319.49	5235.64	5222.50	5249.38	5188.50	5082.99	5256.25
79	5502.32	5326.47	5242.47	5222.50	5256.25	5188.50	5082.99	5256.25
80	5502.32	5333.49	5249.38	5236.18	5256.25	5195.12	5082.99	5256.25
81	5509.81	5333.49	5249.38	5242.91	5270.10	5195.12	5089.36	5256.25
82	5509.81	5347.75	5249.38	5242.91	5270.10	5208.65	5089.36	5263.16
83	5509.81	5354.84	5256.25	5249.92	5277.08	5215.56	5095.95	5270.10
84	5509.81	5361.97	5256.25	5249.92	5284.03	5222.50	5095.95	5270.10
85	5525.03	5361.97	5263.19	5249.92	5284.03	5222.50	5095.95	5270.10
86	5525.03	5369.14	5263.19	5256.69	5284.03	5222.50	5095.95	5277.04
87	5525.03	5369.14	5277.08	5263.74	5284.03	5222.50	5102.34	5277.04
88	5532.60	5369.14	5277.08	5263.74	5284.03	5222.50	5102.34	5284.03
89	5540.34	5376.38	5277.08	5263.74	5284.03	5229.20	5108.97	5291.01
90	5540.34	5383.59	5277.08	5263.74	5284.03	5235.93	5108.97	5298.02

### 6.2.3.3 Contenido de cloruros

A continuación se muestran los perfiles de cloruros de los especímenes correspondientes a cada mezcla en estudio.







#### 6.2.3.4 Coeficientes de difusión

A continuación se presentan los coeficientes de difusión de cloruros para cada espécimen evaluado.

	MEZCLA	Espécimen	D (m <sup>2</sup> /seg.)
1	HPC 0.41	124	9.52x10 <sup>-12</sup>
		125	1.19x10 <sup>-11</sup>
		128	8.95x10 <sup>-12</sup>
		Promedio	1.01x10 <sup>-11</sup>
2	HPC 0.41-20% C.V.	25	9.88x10 <sup>-12</sup>
		26	8.58x10 <sup>-12</sup>

	MEZCLA	Espécimen	D (m <sup>2</sup> /seg.)
		29	1.06x10 <sup>-11</sup>
		Promedio	9.67x10 <sup>-12</sup>
3	HPC 0.41-20% ARC.	58	5.73x10 <sup>-11</sup>
		59	4.42x10 <sup>-11</sup>
		62	4.94x10 <sup>-11</sup>
		Promedio	5.03x10 <sup>-11</sup>
4	HPC 0.41-40% C.V.	91	9.41x10 <sup>-12</sup>
		92	2.63x10 <sup>-11</sup>
		95	1.43x10 <sup>-11</sup>
		Promedio	1.67x10 <sup>-11</sup>
5	ACI 0.40	190	2.99x10 <sup>-11</sup>
		*191	4.61x10 <sup>-11</sup>
		194	2.67x10 <sup>-11</sup>
		Promedio	2.83x10 <sup>-11</sup>
6	ACI 0.48	*223	2.89x10 <sup>-11</sup>
		224	2.54x10 <sup>-11</sup>
		227	3.63x10 <sup>-11</sup>
		Promedio	3.08x10 <sup>-11</sup>
7	ACI 0.48-20% ARC.	157	3.47x10 <sup>-11</sup>
		158	3.15x10 <sup>-11</sup>
		161	3.54x10 <sup>-11</sup>
		Promedio	3.38x10 <sup>-11</sup>
8	ABR 0.55	256	5.62x10 <sup>-11</sup>
		257	5.71x10 <sup>-11</sup>
		260	4.38x10 <sup>-11</sup>
		Promedio	5.24x10 <sup>-11</sup>

\* Valores eliminados debido a la notable disparidad con el resto de especímenes de la mezcla

**6.2.3.5 Predicción de coeficientes de difusión desde el proporcionamiento de mezclado de concretos.**

A continuación se presenta la hoja de cálculo para coeficientes de difusión desde el proporcionamiento de mezclado, basado en el artículo de Luciano y Miltenberger, 1999.

factores de proporción de mezclado	Rango	Valor actual.		Valor estandarizado constante	Parámetro estimado
Agua - proporción de materiales cementantes ( w/mc)	0,25 a 0,65	0.55	x1=	0.500	5.81
Volumen de materiales cementantes (mc), Kg./m3	250 a 600	343.2	x2=	-0.467	-0.57
Humo de sílice, % del peso total (mc)	0 a 10	0	x3=	-1.000	-1.32
Ceniza volante, % del peso total (mc)	0 a 45	0	x4=	-1.000	0.74
Granulated blast furnace slag, % del peso total (mc)	0 a 70	0	x5=	-1.000	-2.12
Tiempo de curado, en días	3 a 1100	28	x6=	0.472	-2.78
Temperatura de mezclado de concreto. °C	10 a 38	22	x7=	-0.143	0.25
Angulosidad del agregado grueso.	Si el a.g es angular = 1	1	x8=	1.000	-0.37
	Si el a.g es redondo = 0				
			x1*x4=	-0.500	1.07
			x1*x6=	0.236	-2.89
			x4*x6=	-0.472	-1.5

Predicción de C.D.C (Dp) en mm2/año
Estimación conservadora (Dp) mm2/año.
Distancia Dp al grupo de datos ( $\leq 6$ )

88.476
125.710
5.711

3.17E-14 2.81E-12 m2/seg.