



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL, UNIDAD OAXACA
CIIDIR OAXACA**

**Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos
Naturales**

Especialidad de Transformación de Recursos Naturales

(INGENIERÍA DE PROCESOS)

Estimación del coeficiente de difusión de cloruros en concreto utilizando
la técnica de velocidad de pulso ultrasónico

Tesis que

Para obtener el grado de
Maestro en ciencias

Presenta:

Jesús Flores Gutiérrez

Director de tesis:

Dr. Pedro Montes García



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 3 del mes de diciembre del 2007 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:

Estimación del coeficiente de difusión de cloruros en concreto utilizando la técnica de velocidad de pulso ultrasónico

Presentada por el alumno:

Flores Gutiérrez Jesús
Apellido paterno materno nombre(s)

Con registro:

B	0	5	1	3	7	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRO 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
Director de tesis

Dr. Pedro Montes García

Dr. Juan Rodríguez Ramírez

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jinémez

Dr. Magdaleno Caballero Caballero

Dra. Delia Cristina Altamirano Juárez

LA PRESIDENTA DEL COLEGIO

Dra. María del Rosario Arnaud Viñas



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 3 del mes diciembre del año 2007, el (la) que suscribe **FLORES GUTIÉRREZ JESÚS** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B051373**, 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 cede los derechos del trabajo titulado: **“Estimación del coeficiente de difusión de cloruros en concreto utilizando la técnica de velocidad de pulso ultrasónico”**, 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 ó j_flores76@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

FLORES GUTIÉRREZ JESÚS



INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL
CIDUA-UNIDAD-OAXACA

Resumen

En el presente trabajo se evaluó la correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico y el coeficiente de penetración de cloruros en mezclas de concreto. Para tal efecto se diseñaron y fabricaron cinco mezclas de concreto utilizando los métodos de Duff Abrams (ABR), American Concrete Institute (ACI-211), Concreto de Alto Desempeño (HPC) y HPC con 20 y 40% de cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland. Se elaboraron un total de 100 especímenes cilíndricos de 10 x 20 cm, de los cuales se obtuvieron su resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, relación de Poisson y velocidad de pulso ultrasónico (VPU), a edades de 3, 7, 14 y 28 días. Se validaron los resultados de VPU por medio de una correlación con los resultados de resistencia a la compresión y se buscó en la literatura resultados de coeficientes de penetración de cloruros correspondientes a mezclas similares a las elaboradas en este trabajo. Se evaluó la correlación entre la VPU y los coeficientes de penetración de cloruros (D_e). Los resultados indican que para las mezclas evaluadas existe una alta correlación entre VPU y D_e ($R^2 = 0.88$); por lo tanto, es posible estimar el coeficiente de penetración de cloruros en concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico mediante la siguiente expresión:

$$D_e = e^{(-10.85 - 1.22 \times 10^{-10} \cdot VPU^3)} \left(\frac{m^2}{s} \right)$$

Abstract

In the present work the correlation between the ultrasonic pulse velocity and the chloride penetration coefficient of concrete mixtures was evaluated. To do this, concrete mixtures using the Duff Abrams (ABR), American Concrete Institute (ACI-211), High Performance Concrete (HPC) methods were designed and prepared. For the HPC method 20 and 40% of the cement was replaced by using fly ash as a supplementary material. A total of 100 cylinders were cast and compressive strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio and ultrasonic pulse velocity (VPU) were determined at 3, 7, 14 and 28 days of age. The VPU data was validated by using the compressive strength results. Chloride penetration coefficients (D_e) corresponding to the concrete mixtures under study were compiled from the current literature. The correlation between VPU and D_e was evaluated and the results show a high correlation ($R^2 = 0.88$). Based on this, it can be concluded that for the concrete mixtures evaluated in the present research, the chloride penetration coefficient of concrete can be estimated from ultrasonic pulse velocity readings by using the

following expression: $D_e = e^{(-10.85 - 1.22 \times 10^{-10} \cdot VPU^3)} \left(\frac{m^2}{s} \right)$

Dedicatorias

A mis hermanas Elo y Silvia por enseñarme que la vida tiene sentido cuando uno se supera por medio del estudio y del trabajo.

Con amor y respeto a mi esposa Aida que ha estado conmigo en cada uno de los momentos de mi vida haciéndola más bella.

Al Dr. Pedro Montes García, por ser más que un profesor, por la paciencia y atención que solo un amigo la podría tener.

Agradecimientos

En especial al **Dr. Pedro Montes García** por brindarme su amistad y la oportunidad de compartir sus experiencias; además, del legado de conocimientos en investigación que me proporcionó, y sobre todo por el apoyo recibido a lo largo de la elaboración de este trabajo.

Al **Instituto Politécnico Nacional** por haberme abierto sus puertas y brindado las facilidades para la elaboración de mi tesis. Además, por haber financiado los trabajos experimentales por medio del proyecto “Desperdicios agrícolas e industriales como fuente alternativa para la producción de materiales suplementarios en concreto”, Clave **SIP-20060647**.

A la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas (**COFAA**) del Instituto Politécnico Nacional por la beca **PIFI** (Programa Institucional de Formación de Investigadores) otorgada de agosto del 2005 a diciembre de 2007.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT), por el apoyo económico que me brindó mediante la beca de estudios de posgrado y el financiamiento por medio del proyecto “Corrosión del acero en concreto ordinario y de alto desempeño conteniendo puzolanas obtenidas de desperdicios agrícolas” Clave **SEP-CONACYT CIENCIA BASICA P47937-Y**.

Al honorable jurado de examen integrado por: Dr. Juan Rodríguez Ramírez, Dra. Delia Cristina Altamirano Juárez, Dr. Magdaleno Caballero Caballero, Dr. Salvador Belmonte Jiménez y Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita.

A mis compañeros de generación, Jacobo, Ohmar Zeferino, Jyl, Filiberto, Romualdo, Sildia y Adrián, por su amistad y apoyo.

Índice general

Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xii
Nomenclatura	xii
Capítulo 1 Planteamiento de la investigación.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	4
1.4 Antecedentes.....	5
1.5 Objetivo general.....	7
1.6 Objetivos específicos.....	7
1.7 Hipótesis.....	7
Capítulo 2 Marco referencial	9
2.1 El cemento y su clasificación	9
2.2 Tipos de concreto	11
2.2.1 Concreto ordinario.....	11
2.2.2 Concreto de alta resistencia.....	12
2.2.3 Concreto de alto desempeño (HPC)	13
2.2.3.1 Mezclado y control del concreto HPC.....	13
2.2.3.2 Discusión del método de diseño del concreto HPC	15
2.2.4 Comparación entre concreto ordinario y concreto HPC	16
2.3 Componentes del concreto	16
2.3.1 Cemento Pórtland	17
2.3.2 Agua.....	17
2.3.3 Agregados.....	18
2.3.4 Aditivos minerales	19
2.3.4.1 Ceniza volante	19
2.3.4.2 Humo de sílice	20
2.3.5 Aditivos químicos	21
2.3.5.1 Reductores de agua	22
2.3.5.2 Superplastificantes	22
2.4 La técnica de velocidad de pulso ultrasónico (PVU).....	23
2.4.1 Aplicación de la VPU en elementos de concreto.....	24
2.4.2 Detección de fracturas en concreto con VPU.....	24
2.4.3 Estimación de resistencia a la compresión con la VPU.....	25
2.5 Concepto de durabilidad	25
2.5.1 Difusión de cloruros.....	26
2.5.2 Permeabilidad y porosidad del concreto	27
Capítulo 3 Marco teórico.....	29
3.1 Velocidad de pulso ultrasónico y principios de la ecuación de onda	29
3.2 Segunda ley de Fick	32
3.3 Ley de Hooke.....	36

Capítulo 4 Metodología	40
4.1 Diseño experimental	42
4.2 Caracterización de los materiales.....	44
4.2.1 Propiedades de los agregados.....	44
4.2.2 Características del agua utilizada	46
4.2.3 Composición química del cemento utilizado	47
4.2.4 Composición química de la ceniza volante utilizada	47
4.2.5 Características del superplastificante.....	48
4.3 Diseño de mezclas	49
4.3.1 Método de Duff Abrams	50
4.3.2 Método de Volúmenes Absolutos (ACI)	50
4.3.3 Método de diseño para Concreto de Alto Desempeño.....	51
4.4 Pruebas en estado fresco	53
4.4.1 Revenimiento	53
4.4.2 Contenido de aire	54
4.4.3 Peso volumétrico del concreto	55
4.4.4 Temperatura.....	56
4.5 Pruebas en estado endurecido	57
4.5.1 Resistencia a la compresión del concreto	57
4.5.2 Módulo de elasticidad y relación de Poisson.....	58
4.5.2.1 Análisis estadístico de datos	62
4.5.2.2 Independencia, normalidad y homogeneidad de los datos.....	62
4.5.2.3 Análisis de varianza.....	63
4.6 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico	63
4.7 Compilación de coeficientes de difusión de cloruros	65
Capítulo 5 Resultados	68
5.1 Comparación de resultados preliminares con las Normas de Construcción	68
5.2 Resultados de dosificación de materiales.....	69
5.3 Propiedades del concreto en estado fresco.....	70
5.4 Propiedades del concreto en estado endurecido.....	71
5.4.1 Resistencia a la compresión del concreto	71
5.4.1.1 Análisis gráfico de resultados	73
5.4.1.2 Análisis estadístico de varianza de los resultados de resistencia a la compresión	74
5.4.2 Análisis de resultados de módulos de elasticidad	75
5.4.3 Correlación entre módulo de elasticidad experimental y módulo de elasticidad empírico	77
5.4.4 Análisis resultados de las relaciones de Poisson.....	78
5.5 Velocidad de Pulso Ultrasónico	79
5.6 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión	80
5.7 Coeficientes de difusión de cloruros	81
5.8 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y coeficiente de difusión de cloruros	83
5.9 Discusión	85

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones	88
Conclusiones	88
Recomendaciones	88
Bibliografía.....	89
ANEXOS.....	96

Índice de Tablas

Tabla 2. 1 Clasificación de los cementos en México	10
Tabla 2. 2 Características especiales de los cementos.....	11
Tabla 2. 3 Tipos de aditivos químicos	22
Tabla 4. 1 Variables consideradas en este estudio	43
Tabla 4. 2 Pruebas en estado endurecido y cantidad de especímenes elaborados..	44
Tabla 4. 3 Resumen de las propiedades de los agregados	46
Tabla 4. 4 Características químicas del agua.....	46
Tabla 4. 5 Óxidos mayores del cemento Pórtland y ceniza volante	48
Tabla 4. 6 Características del superplastificante Plastol 4000	49
Tabla 4. 7 Ventajas y desventajas del uso de los diferentes métodos de diseño.....	52
Tabla 5. 1 Resumen de materiales para elaborar 1m ³ de concreto utilizando tres métodos de diseño	69
Tabla 5. 2 Resultados en estado fresco del concreto.....	70
Tabla 5. 3 Resultados de resistencia a la compresión a diferentes edades	72
Tabla 5. 4 Prueba de Levene de homogeneidad de varianza	74
Tabla 5. 5 Análisis de varianza de resistencia a compresión del concreto.....	75
Tabla 5. 6 Resumen de coeficiente de penetración de cloruros De (m ² /s).....	82

Índice de Figuras

Figura 3. 1 Longitud y frecuencia de onda	32
Figura 3. 2 Perfil de cloruros (Fuente NT BUILD 443).....	35
Figura 3. 3 Curva genérica de esfuerzo -deformación unitaria del concreto (Fuente Kosmatka, 2004)	38
Figura 4. 1 Diagrama metodológico para la investigación.....	41
Figura 4. 2 Prueba de revenimiento del concreto.....	53
Figura 4. 3 Prueba de contenido de aire atrapado en el concreto.....	54
Figura 4. 4 Pesado del concreto para la prueba de peso volumétrico.....	55
Figura 4. 5 Prueba de temperatura del concreto	56
Figura 4. 6 Disposición del dispositivo para la prueba de resistencia a la compresión del concreto.....	58
Figura 4. 7 Módulo de elasticidad y relación de Poisson del concreto	61
Figura 4. 8 Diagrama esquemático del dispositivo de velocidad de pulso ultrasónico	64
Figura 4. 9 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico.....	65
Figura 5. 1 Desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto a diferentes edades	72
Figura 5. 2 Gráficas de caja para resultados de resistencia a la compresión de concreto a diferentes edades	73
Figura 5. 3 Gráfica de normalidad de los datos de resistencia a la compresión del concreto	74
Figura 5. 4 Gráfica de caja para el módulo de elasticidad.....	76
Figura 5. 5 Correlación de Módulo de elasticidad experimental con módulo de elasticidad empírico.....	77
Figura 5. 6 Gráfica de caja para la relación de Poisson	78
Figura 5. 7 Registro de velocidades de pulso ultrasónico para todas las mezclas de concreto	79
Figura 5. 8 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades y tipos de concreto	80
Figura 5. 9 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a compresión por mezcla	81
Figura 5. 10 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y coeficiente de penetración de cloruros.....	84

Nomenclatura

% A	Porcentaje de aire atrapado en el concreto
% Abs	Porcentaje de absorción
% Hum	Porcentaje de humedad
ABR	Mezcla diseñada por el Método de Duff Abrams
ACI	Mezcla diseñada por el Método de Volúmenes Absolutos
ASTM	Norma internacional (Sociedad Americana de pruebas de materiales)
BRA	Baja reactividad álcali-agregado
C₂S	Silicato dicálcico
C₃A	Aluminato tricálcico
C₃S	Silicato tricálcico
C₄AF	Ferroaluminato tetracálcico
C.A	Cemento Apasco
C.B	Cemento Blanco
CO₂	Dióxido de carbono
CP	Cemento Pórtland
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico
CV	Ceniza volante
D_e	Coefficiente de penetración de cloruros (m ² /s)
E	Módulo de elasticidad del concreto (MPa)
f'c	Resistencia a la compresión del concreto (MPa)
G.E	Gravedad específica
HPC	Mezcla diseñada por el Método de Concreto de Alto Desempeño
HPC20	Mezcla diseñada por el Método de Concreto de Alto Desempeño con 20% de ceniza volante
HPC40	Mezcla diseñada por el Método de Concreto de Alto Desempeño con 40% de ceniza volante
M.F	Módulo de finura
NMX	Norma Mexicana (Para materiales de construcción)
μ	Relación de poisson
μm	Micras (1x10 ⁻⁶ m)
PVSC	Peso volumétrico seco compacto (kg/m ³)
Rev	Revenimiento
T	Temperatura (°C)
TMA	Tamaño máximo de agregados
VPU	Velocidad de Pulso Ultrasónico
W	Peso volumétrico (kg/m ³)

CAPÍTULO 1

Capítulo 1 Planteamiento de la investigación

1.1 Introducción

Anteriormente el concreto era considerado como un material eterno; sin embargo, actualmente debido a los problemas suscitados a causa del deterioro prematuro, las estructuras exigen protección y mantenimiento; además, gracias al avance de la tecnología del concreto hoy en día existen varios métodos para realizar los diferentes tipos de mantenimiento que son: predictivo, preventivo y correctivo. El avance de la ciencia ha contribuido en gran parte para desarrollar nuevos modelos, así como técnicas muy complejas para predecir la vida útil de las estructuras (Pierre, 2001).

Para minimizar el problema de la falta de durabilidad, a principios de los años 60's se empezó a implementar el concreto de alto desempeño HPC (por sus siglas en inglés High-Performance Concrete) por un grupo de diseñadores y productores de concreto (Aitcin, 1998). Posteriormente en los años 70's se empezaron a utilizar los superplastificantes y actualmente se incorporan una gran cantidad de materiales provenientes de subproductos industriales para fabricar concretos resistentes y amigables con el medio ambiente (Aitcin, 2000).

El desarrollo de la resistencia, durabilidad, densidad, estabilidad de las mezclas y resistencia ante el ataque de agentes agresivos, dieron paso al estudio de las mezclas de concreto (Ali, 2001). En la actualidad para estudiar las propiedades del concreto se han desarrollado diversos métodos no destructivos y dependiendo del resultado que se busca se puede seleccionar el método mas apropiado ya sea termogravimétrico, ultrasónico y/o magnético (Barkhatov, 2002), pero se debe de tomar en cuenta el costo que implica cada método. En la presente investigación se aborda el método ultrasónico y con base en la velocidad con que un espécimen de concreto con una dimensión conocida es atravesado por una señal se pueden estimar sus propiedades.

Con base en lo anterior se estudia la posibilidad de estimar el coeficiente de penetración de cloruros en especímenes de concreto a diferentes edades mediante el uso de la técnica de la velocidad de pulso ultrasónico. Para ello, el trabajo se estructuró de la siguiente manera: en el capítulo uno se presenta el planteamiento de la investigación, en los capítulos dos y tres se abordan los marcos referencial y teórico que soportan ésta investigación. La metodología se presenta en el capítulo cuatro, los resultados y su discusión se presentan en el capítulo cinco. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas, recomendaciones y literatura citada.

1.2 Planteamiento del problema

El progreso de un país es referenciado con base en su infraestructura en funcionamiento; sin embargo, cuando dichas obras de infraestructura sufren un deterioro parcial o completo, quedan obsoletas y en un total abandono impactando de manera negativa en el desarrollo de la sociedad. Consecuentemente, realizar dichas reparaciones implica costos para transformar la materia prima en concreto, así como la explotación de agregados naturales y contaminación ambiental por la emisión de CO₂ a la atmósfera por la producción de cemento Pórtland. En el año 2006 la producción de cemento Pórtland en México ascendió a 37.9 millones de toneladas con un incremento de 3.2 millones de toneladas con respecto al año 2005 (Canacem, 2006). El CO₂ disminuye el pH del concreto generando la corrosión por carbonatación (Persson, 2003), además, asociada la corrosión con los accidentes provocados por descuidos humanos el costo de reparación asciende a millones de pesos; tal es el caso de un accidente por corrosión reportado en abril de 1992 en la ciudad de Guadalajara, en donde el costo estimado por reparación de daños ascendió a 75 millones de dólares (Pierre, 2001).

El problema de la falta de durabilidad se presenta en todos los lugares en distintas magnitudes, pues en las zonas urbanas la vida útil de una estructura se ve afectada también por los contaminantes emitidos por los automóviles y en las zonas costeras

cercanas al mar el problema principal es la corrosión generada por la acción de los cloruros. El tipo de corrosión que se presenta por la acción de éstos últimos es de manera localizada. Este tipo de corrosión hace a una estructura mas susceptible a un colapso poniendo en riesgo vidas humanas (Castro, 2001). Para el estado de Oaxaca el problema es aún más crítico ya que es una zona considerada altamente sísmica y también cuenta con un amplio litoral marino en donde la durabilidad de una estructura es afectada tanto por la acción de los sismos como de los cloruros. Los huracanes y vientos dominantes también influyen ya que arrastran iones de cloruros acelerando aún más el proceso de deterioro. Esto ocurre principalmente porque el tipo de concreto que se utiliza para elaborar las obras de infraestructura es de baja calidad y permite el ingreso de tales agentes agresivos.

En México existen grandes obras de infraestructura como: puentes, presas, plataformas marinas, edificios, así como estructuras que albergan transportes subterráneos que se encuentran actualmente en proceso de deterioro a causa de los cloruros (Castro, 2001). Debido al costo que implica realizar pruebas de extracción de cloruros y al problema socio económico que atraviesa México las obras han estado en un abandono total. Dicho problema de deterioro de las estructuras de concreto también se pueden observar en las zonas costeras del estado de Oaxaca (Aquino, 2004).

Actualmente existen varias técnicas para determinar el contenido de cloruros en el concreto y estimar el coeficiente de difusión; sin embargo, dichas pruebas son costosas, demandantes en tiempo, destructivas o pueden afectar la integridad de una estructura debido a la extracción de corazonces. Los espacios que se provocan al extraer corazonces de concreto pueden ser aprovechados por los iones cloruros y penetrar por dichos espacios para acelerar aún más el proceso de deterioro. Por lo tanto, el problema que se aborda en ésta investigación es la falta de una técnica no destructiva para estimar el coeficiente de difusión de cloruros en el concreto, que sea económica y de fácil operación; además, que al realizar dicha prueba no se vea afectada la integridad de una estructura de concreto.

1.3 Justificación

La materia prima para elaborar la mayoría de las obras de infraestructura es el concreto, dicho material está compuesto por varios ingredientes los cuales interactúan químicamente; además, dependiendo del lugar en donde se encuentre ubicada la estructura responde a la acción del medio ambiente lo cual hace aun más difícil predecir sus durabilidad. El deterioro de una estructura tiene serias consecuencias en la economía de los países, en el riesgo de pérdidas humanas, pero sobre todo, en el consumo excesivo de los recursos naturales y contaminación del medio ambiente (Aitcin, 2003). Sin embargo, para mejorar sus propiedades de durabilidad se han incorporando materiales industriales como la ceniza volante (Aitcin, 2003). Éste material debe tener un bajo contenido de carbón y gran contenido de cristales con un 75 % de partículas más finas de 45 μm para que tenga una reacción adecuada y formar compuestos que ayuden a disminuir la penetración de los agentes agresivos (Chambers, 2000).

La ceniza volante proporciona beneficios al concreto en estado endurecido, pues disminuye la permeabilidad del concreto, pero además existen otros beneficios, tales como: proporciona economía, mejora la trabajabilidad, compatibilidad con inhibidores de corrosión y mejoran la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo (Montes y col., 2004). Consecuentemente, el uso de la ceniza volante como de otros materiales cementantes suplementarios implica una disminución considerable del consumo de cemento Pórtland, así como un impacto ecológico importante: sin embargo, en algunos países la ceniza volante se desperdicia en grandes cantidades y solamente se aprovecha alrededor del mundo un 20 % para incorporarla al concreto (Malhotra y Ramezaniapour, 1994). De acuerdo a la producción de carbón mineral se estima que alrededor del mundo la obtención de ceniza volante se ha incrementado; en 1989 fue de 500 millones de toneladas y para el año 2000 se reportó un aumento de aproximadamente 90 millones de toneladas (Ramachandran y Feldman, 2000).

Es necesario conocer las propiedades del concreto y para ello existen métodos destructivos y no destructivos. Sin embargo, en cada método se emplean distintos dispositivos que son muy costosos como es el caso de los métodos de sonido, radiación, ópticos y electromagnéticos (Livingston, 2001). Una forma de determinar las propiedades del concreto es mediante el uso de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico. En dicha técnica se emplea un dispositivo de manejo fácil y económico, pero además debido al tamaño de éste permite hacer las pruebas en especímenes de concreto en el sitio sin tener que afectar las propiedades de una estructura. Por lo tanto, en ésta investigación se pretende emplear dicha técnica para estimar el coeficiente de penetración de cloruros.

1.4 Antecedentes

Para determinar las propiedades del concreto ya sea en estado fresco y endurecido se emplean dos métodos los cuales son: destructivos y no destructivos. Los métodos no destructivos en su mayoría se han empleado para realizar estudios antropológicos (Livingston, 2001). Se han hecho numerosos estudios utilizando la técnica de velocidad de pulso ultrasónico para determinar la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del concreto, como los siguientes:

Zegá y Maio (2007) utilizaron la técnica de velocidad de pulso ultrasónico para determinar la resistencia a compresión y módulo de elasticidad del concreto que contenía agregados triturados reciclados y agregados naturales. En este estudio los autores encontraron que la velocidad de pulso ultrasónico fue menor cuando se utilizaron agregados reciclados comparada con un concreto elaborado con agregado natural. Así mismo, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad fueron mayores. En otro estudio (Solís y col., 2004) evaluaron el efecto de la relación agua/cemento, origen de agregados y relación grava arena para determinar la resistencia a la compresión del concreto mediante la técnica VPU, encontrando que la principal fuente de variación en la resistencia fue la relación agua/cemento.

También la VPU se ha empleado en otras aplicaciones, por ejemplo Demirboga y col., (2003) evaluaron la resistencia a la compresión del concreto de alto desempeño con el uso de la velocidad de pulso ultrasónico. En dicha investigación se abordaron concretos que contenían ceniza volante, escoria de alto horno, humo de sílice y diferentes edades de curado. Los resultados obtenidos por dicho autores establecen que la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia aumentan con el tiempo de curado y cuando los materiales cementantes suplementarios se usan por separado; en cambio cuando se emplea una combinación de 35 % de CV y 35 % de escoria de alto horno, tanto la resistencia como la velocidad de pulso ultrasónico son menores comparados con concretos HPC elaborados con un solo tipo de material. En otro estudio (Lee y col., 2004) emplearon la misma técnica para evaluar las mezclas de concreto de alto desempeño y mortero en estado fresco para determinar el tiempo de fraguado; dichos autores reportan que el tiempo de inicio de fraguado es menor cuando se utiliza una relación agua/cemento baja.

La técnica de velocidad de pulso ultrasónico también se ha empleado para detectar grietas en el concreto y para el control de calidad de los materiales, ya sea de acero, concreto o cerámica. En estudios realizados por Shin y col., (2007) se empleó dicha técnica para evaluar la profundidad de grietas en el concreto encontrando que la velocidad de la onda se atenúa cuando detecta una grieta; además cuando las grietas son muy profundas y de mayor espesor el arribo de la señal es más lento.

Por su parte (Gesoglu y Gunevisi, 2007) utilizaron esta técnica para estimar la resistencia a la compresión del concreto que contenía goma de caucho; además, evaluaron la profundidad de penetración de los cloruros en especímenes de concreto elaborados con dichos materiales. Los autores obtuvieron que el porcentaje de cloruros disminuyen a medida que se incrementa el contenido de caucho en el concreto; sin embargo, la velocidad de pulso ultrasónico disminuye considerablemente cuando se incrementan los tiempos de curado.

De los antecedentes encontrados en la literatura no se reporta como tal el uso de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico como un método para estimar el coeficiente de difusión de cloruros. Por lo tanto, la presente investigación abordó dicho espacio para contribuir al conocimiento y tratar de establecer una correlación con datos reales reportados en la literatura y así proponer una ecuación de correlación que permita estimar el coeficiente de penetración de cloruros con base en lecturas de VPU.

1.5 Objetivo general

Estimar el coeficiente de difusión de cloruros en concreto mediante la utilización de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico

1.6 Objetivos específicos

Validar los resultados de velocidad de pulso ultrasónico de diferentes mezclas de concreto mediante los resultados de resistencia a la compresión.

Obtener una ecuación de correlación que estime los coeficientes de penetración de cloruros en concreto con base en las lecturas de velocidad de pulso ultrasónico.

1.7 Hipótesis

Con el uso de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico se puede estimar el coeficiente de penetración de cloruros en especímenes de concreto.

CAPÍTULO 2

Capítulo 2 Marco referencial

Es importante conocer las características y propiedades de los materiales a usarse en ésta investigación; por lo tanto, se abordaron estudios de interés acerca de los materiales para tener un conocimiento general acerca de los ingredientes del concreto. Además, se revisaron tres métodos de diseño los cuales se utilizaron para el desarrollo de este trabajo.

2.1 El cemento y su clasificación

El Cemento Pórtland contiene básicamente cuatro compuestos principales que corresponden al 90% de la masa del cemento (Kosmatka, 2004) los cuales al ser variados en cantidades le proporcionan diferentes propiedades al concreto una vez que reaccionan.

Silicato tricálcico C_3S

Silicato dicálcico C_2S

Aluminato tricálcico C_3A

Ferroaluminato tetracálcico C_4AF

Cuando el cemento tiene un alto contenido de C_3S el concreto endurece muy rápido y es el principal responsable del inicio de fraguado, el C_2S hace al cemento menos reactivo con lo cual la hidratación es lenta; sin embargo, la resistencia se adquiere a edades prolongadas. Un alto contenido de C_3A puede ser peligroso ya que pueden reaccionar con los sulfatos y propiciar un efecto negativo afectando la durabilidad del concreto; sin embargo, en cantidades moderadas contribuye a la hidratación y endurecimiento a edades tempranas (Ramachandran y Feldman, 2000).

El C_4AF contribuye muy poco a la resistencia y proporciona color al cemento; en la composición química del cemento se pueden encontrar otros compuestos pero en menor cantidad como es el sulfato de calcio o yeso y óxidos. La resistencia como

otras propiedades del concreto se derivan fundamentalmente de la hidratación de los silicatos tricálcico y dicálcico. Los materiales utilizados para la producción del cemento Portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro. Durante la fabricación del cemento se hacen análisis químicos para garantizar la uniformidad del cemento y la calidad, pues tanto la fabricación como la operación en cada fábrica de cemento varían considerablemente (Bryant y Celik, 2004).

Clasificación del cemento

Los cementos mexicanos a partir de 1999 se clasifican según la norma NMX C 414 ONNCCE 1999, dicha clasificación se reporta en la Tabla 2.1. Dependiendo de la cantidad de compuestos que tenga el cemento se hace su clasificación, pero además, un cemento puede ser más o menos reactivo y compatible con otras adiciones minerales dependiendo de los compuestos que lo forman (Das, 2006).

Tabla 2. 1 Clasificación de los cementos en México

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Pórtland Ordinario
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico
CPEG	Cemento Pórtland Granulado con Escoria de Alto Horno
CPC	Cemento Pórtland Compuesto
CPS	Cemento con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

Fuente:NMX-C 414-ONNCCE-1999

El cemento presenta adicionalmente una o más características especiales, estas características dependen de la cantidad de compuestos químicos que presenta en su composición y se pueden clasificar de acuerdo a la Tabla 2.2. Las características de cada tipo de cemento tienen aplicaciones muy particulares ya sea para soportar las acciones de erosión debido a la existencia de sulfatos ó simplemente para algún fin estético.

Tabla 2. 2 Características especiales de los cementos

Nomenclatura	Características Especiales
RS	Resistente a los Sulfatos
BRA	Baja Reactividad Alkali-Agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

Fuente: NMX-C 414-ONNCCE-1999

Actualmente se siguen formulando cementos para aplicaciones muy específicas, pero la disponibilidad en el mercado es escasa ya que la mayoría se desarrolla en otros países más industrializados. Por lo tanto antes de especificar un determinado tipo de cemento se debe verificar su disponibilidad y precio.

2.2 Tipos de concreto

El concreto se clasifica de diferentes maneras de acuerdo a sus características como de sus propiedades; hoy en día se puede encontrar en el mercado concreto para usos estético o para alguna aplicación en especial. Sin embargo, para oponer resistencia ante la presencia de agentes agresivos se requieren concretos especiales y que cumplan con determinadas propiedades. Por lo tanto, el concreto se puede clasificar de acuerdo a su diseño y especificaciones en tres grandes grupos; concreto ordinario, de alta resistencia y de alto desempeño (HPC); sin embargo, se pueden hacer sub clasificaciones.

2.2.1 Concreto ordinario

El concreto ordinario es principalmente una mezcla de dos componentes; agregados y pasta, los agregados normalmente son piedras trituradas los cuales se clasifican en finas y gruesas (arena y grava), la pasta la forma el agua al reaccionar químicamente con el Cemento Pórtland. Éste tipo de concreto se caracteriza porque en su composición lleva poca cantidad de cemento; además, es un concreto con

mayor permeabilidad que el concreto HPC. Una vez que termina su vida útil, éste puede ser reciclado y utilizado como agregado grueso para la elaboración de nuevas mezclas de concreto. Sin embargo, la resistencia a la compresión es menor cuando se utiliza concreto ordinario reciclado, comparada con mezclas elaboradas con concreto reciclado de HPC (Ji y col., 2006).

El concreto ordinario tiene un costo inicial menor, pero con el paso del tiempo el costo se incrementa hasta tres veces por reparaciones a lo largo de su vida útil, así mismo en México, las estructuras hechas con concreto ordinario se proyectan a 50 años y para obras de infraestructura a 100 años (Sánchez, 2003). Para que el concreto pueda cumplir perfectamente su función durante su vida útil, el medio ambiente en donde está expuesta la estructura juega un papel preponderante ya que la durabilidad del concreto ordinario depende de la agresividad del medio.

2.2.2 Concreto de alta resistencia

El concreto de alta resistencia es un tipo de concreto especial, ya que se fabrica con una técnica especializada y materiales específicos; éste tipo de concreto comenzó a desarrollarse en los años 80's con la implementación de los superplastificantes (Aitcin, 1998). El concreto de alta resistencia puede soportar esfuerzos muy elevados de más de 40 MPa (Mehta y Monteiro, 1998). El concreto de alta resistencia tiene aplicaciones especiales y en lugares específicos; sin embargo, para alcanzar resistencias elevadas se utilizan agregados especiales, así como materiales de fibras de acero y humo de sílice. Además, para producir un concreto de alta resistencia se debe de trabajar con relaciones agua/cemento menores a 0.40 (Habel, 2005).

2.2.3 Concreto de alto desempeño (HPC)

El concreto de alto desempeño está básicamente compuesto por los mismos materiales con los cuales se fabrica el concreto ordinario; lo que lo hace diferente es que se utiliza una relación agua/cemento baja, así mismo permite en su diseño el uso de materiales suplementarios haciéndolo más resistente ante el ataque de agentes agresivos (Teng, 2000). El concreto de alto desempeño (HPC) es resistente a la abrasión, tiene mejor durabilidad y le proporciona mayor vida útil a las estructuras; éste tipo de concreto también permite mezclar escoria granulada de alto horno, ceniza volante, humo de sílice, metacaolín, cáscara de arroz y polvo de caliza (Aitcin, 2003). El concreto de alto desempeño supera las propiedades y la trabajabilidad del concreto ordinario, este tipo de concreto se usa generalmente para estructuras de gran importancia como: puentes, construcciones en ambientes agresivos y en estructuras de grandes dimensiones debido a sus propiedades mejoradas de elasticidad, resistencia y durabilidad (Kosmatka y col., 2004).

La otra propiedad que presenta el concreto de alto desempeño es la estabilidad dimensional ya que presenta deformaciones muy pequeñas que no causan esfuerzos significativos en la matriz del concreto debido a la relación de sus agregados con el contenido de la pasta (Cyr y col., 2005). Para fabricar el concreto de alto desempeño es recomendable utilizar arena con un módulo de finura media es decir entre 2.5 a 3; además, el agregado grueso a utilizar debe ser de roca sana. Consecuentemente, durante su elaboración se debe cuidar el contenido de aire atrapado durante la etapa de mezclado y para garantizar la durabilidad del concreto el contenido de aire debe ser menor a 2 % (Chang y Peng, 2000).

2.2.3.1 Mezclado y control del concreto HPC

Para obtener las propiedades deseadas del concreto de alto desempeño es necesario hacer un adecuado proporcionamiento de todos sus componentes, para éste tipo de concreto se adicionan diferentes materiales suplementarios y debido a la

interacción que pudieran presentarse con los aditivos, implica tener mayor cuidado durante su elaboración. Así mismo, los aditivos se deben de utilizar para casos muy específicos ya que en ocasiones pueden alterar la mezcla de concreto cuando no es necesario (Malhotra y Mehta, 2005). Para el concreto de alto desempeño se debe cuidar la propiedad, forma y tamaño de los agregados, aditivos minerales, aditivos químicos y características del agua. La durabilidad del concreto está en función de su calidad (Aitcin, 1998).

Durante la elaboración de la mezcla de concreto HPC, se debe tener mucho cuidado ya que es muy sensible cuando se incrementa o se hace la corrección de agua de mezclado, esto es debido que en el concreto HPC se maneja una relación agua/cemento baja. Por lo tanto, una leve variación de 3 a 5 lts de agua/m³ de concreto puede representar un decremento en la resistencia a la compresión desde 10 a 20 MPa (Aitcin, 1998). De la misma manera, se pueden presentar una serie de problemas cuando no se tiene suficiente cuidado en la dosificación exacta de los aditivos ya que se corre el riesgo de hacer un concreto con mucho contenido de aire pérdida de revenimiento, segregación, retardo de fraguado, entre otros problemas que pueden presentarse en estado fresco.

Con respecto al tiempo de mezclado no existe un tiempo bien definido ya que varía de acuerdo a las adiciones químicas y minerales que contenga el concreto. Pero además, el tiempo de mezclado para el concreto HPC es mayor con respecto al tiempo de mezclado de un concreto ordinario, esto es debido que al fabricar el concreto HPC se adicionan aditivos químicos los cuales tienen diferentes especificaciones. Unos aditivos se adicionan desde el agua de mezclado y otros se adicionan hasta 2 o 3 minutos después de mezclado. Por lo tanto, el tiempo mínimo de mezclado para el concreto de alto desempeño es de 3 minutos y un tiempo máximo de 10 minutos para evitar fracturas en los agregados y segregación del concreto (Aitcin, 1998).

2.2.3.2 Discusión del método de diseño del concreto HPC

El método de diseño para la dosificación del concreto de alto desempeño le brinda mucha importancia a la relación entre sus agregados y a la relación agua/cemento baja (Aitcin, 1998). Además de las características de los ingredientes que conforman al concreto así como el costo que implica elaborar éste tipo de mezcla. Sin embargo, el método de diseño para concreto de alto desempeño tiene algunas limitaciones ya que no se puede aplicar en todo el mundo, esto se debe principalmente que existen muchos países en donde la producción del cemento Pórtland, así como de los demás ingredientes del concreto se rigen bajo diferentes normas. Por lo tanto, existen algunos materiales que no cumplen con las especificaciones necesarias que se requieren para utilizar dicho método de diseño.

En México la fabricación de los materiales se apegan a normas internacionales (ASTM); por lo tanto, el método de diseño es válido, además, para que exista un mayor control de calidad tanto de la producción de los materiales como del concreto es necesario cumplir con las exigencias de las normas (ASTM). No obstante, a través del tiempo se siguen proponiendo nuevos métodos para diseñar el concreto de alto desempeño, siempre cuidando los mismos principios y objetivos que tuvo originalmente este método de diseño. Por consiguiente, debido a la incorporación de nuevos materiales para mejorar las propiedades del concreto y el objetivo de obtener materiales económicos ha sido difícil, así mismo las interacciones se hacen más complejas para ser estudiadas (Larrard y Sedran, 2002).

Actualmente el método de diseño para concreto de alto desempeño busca un menor consumo de materiales cementantes, baja relación agua/cemento, uso de agregados reciclados y mayor resistencia; además, busca una relación más amigable con el medio ambiente (Aitcin, 2000).

2.2.4 Comparación entre concreto ordinario y concreto HPC

Existen varias diferencias entre el concreto ordinario y el concreto de alto desempeño, pero las más importantes son sin duda: criterios de diseño, uso de materiales cementantes suplementarios, empleo de aditivos químicos, relación agua/cemento baja y mayor consumo de cemento. El concreto ordinario tiene baja durabilidad, así mismo emplea una cantidad menor de cemento Pórtland; en cambio, el concreto de alto desempeño en el cual se utilizan criterios de durabilidad, proporciona mayor durabilidad y mejoras en sus propiedades ya que por ejemplo la permeabilidad del concreto se disminuye de un orden de 10^{-12} a 10^{-16} m/s cuando se adiciona ceniza volante (Dieb y Hooton, 1995). Además el uso de aditivos minerales o materiales cementantes suplementarios disminuyen la reacción álcali-agregado, mejora la permeabilidad, aumenta la resistencia ante el ataque de sulfatos e incrementa la resistencia a la compresión (Bharatkumar y col., 2001).

Para el concreto ordinario se utiliza toda la granulometría del agregado grueso desde un tamaño máximo hasta la partícula más pequeña y para el concreto de alto desempeño solamente se utilizan agregados de un tamaño, esto es de $\frac{3}{4}$ " , todo agregado que pasa en la malla de $\frac{1}{2}$ " no se utiliza; así mismo para fabricar el concreto de alto desempeño no se deben utilizar agregados que contengan cuarzo ya que las propiedades del concreto se afectan negativamente (Aitcin, 2003).

2.3 Componentes del concreto

El concreto ordinario es elaborado principalmente de arena, grava, agua y cemento, en donde los materiales que se ocupan para fabricar éste concreto son los más comunes que se puedan encontrar en el mercado. Sin embargo, para el concreto HPC los materiales generalmente no están disponibles en cualquier mercado, ya que son productos especializados como es el caso de los superplastificantes, inhibidores, acelerantes, retardantes y los materiales cementantes suplementarios; en la práctica

generalmente se requiere de fichas técnicas para hacer las adiciones correspondientes.

2.3.1 Cemento Pórtland

El cemento Pórtland a utilizarse para la elaboración de mezclas de concreto debe de cumplir con las especificaciones de la norma ASTM C 150, ya que en ocasiones algunos tipos de cementos contienen una cantidad considerable de C_3A y algunos superplastificantes contienen un alto contenido de sulfatos libres, esto puede ocasionar la pérdida de consistencia, la cual es asociada con la formación de la etringita y/o sulfoaluminato hidratado de calcio y pueden afectar el tiempo de fraguado y resistencia del concreto (Mehta y Monteiro 1998)

El cemento hidráulico tiene la propiedad de que al combinarse con el agua reacciona y sus productos de hidratación son estables en un medio acuoso. Los silicatos se forman con la hidratación del cemento y son los principales responsables de las características adherentes entre la pasta y los agregados (Mehta y Monteiro, 1998).

En ocasiones es necesario el uso de cementos especiales para contrarrestar las acciones de sustancias que ataquen directamente al concreto o para aplicaciones específicas. Consecuentemente, se debe tener cuidado para que la inexistencia de cementos especiales no limiten el proyecto y que no impida el uso de materiales locales; sin embargo, se pueden alcanzar propiedades similares con el uso de cemento Pórtland común y con la combinación de algún otro material cementante suplementario.

2.3.2 Agua

El agua a utilizarse para el proceso de mezclado debe ser potable y limpia de impurezas, cuando el agua se encuentra contaminada afecta las propiedades del

concreto como son: tiempo de fraguado, resistencia, acabado y resistencia a la degradación. Para aceptar el agua a utilizarse durante la fabricación del concreto se deben hacer pruebas para determinar si las propiedades son las deseadas (Kosmatka y col., 2004). El agua de mezclado influye en gran proporción para tener estructuras durables, esto es debido a que en ocasiones el agua se le incorpora cloro o en su caso lleva porcentajes variables de sulfatos. Los sulfatos son dañinos e incompatibles con el concreto y se puede empezar un proceso de deterioro conocido como cáncer del concreto o ataque por sulfatos, generando la expansión del concreto y de los agregados (Malhotra y Mehta, 2005).

La norma ASTM C 94 proporciona las especificaciones que debe tener el agua de mezclado así como el contenido máximo de partes por millón de sustancias o sales disueltas aceptables para ser usados como agua de mezclado. También se puede hacer una prueba pre operativa con base en la resistencia del concreto, donde la resistencia a los 7 días debe ser por lo menos el 90 % de la resistencia obtenida cuando se utiliza agua destilada o agua potable (Ramachandran y Feldman, 2000). El exceso de agua contaminada puede ocasionar la corrosión en el acero de refuerzo. En caso de que existan en mayor concentración sulfatos, ácidos, hierro y carbonatos diluidos en el agua, dichas sustancias disminuyen el pH del concreto y lo hacen más susceptible a la corrosión.

2.3.3 Agregados

Los agregados deben ser resistentes a la abrasión y no presentar reacciones perjudiciales bajo las condiciones a las que estarán expuestos. La geometría del agregado, textura superficial, intervalo de variación del tamaño de las partículas, la granulometría, la resistencia y el módulo de elasticidad del agregado son características propias que pueden afectar en mayor grado la resistencia del concreto (ASTM C 33-03). Además, los agregados deben de estar libre de sulfatos ya que pueden acelerar el proceso de deterioro del concreto mediante la reacción álcali-agregado. Con frecuencia los agregados se lavan; esto es, cuando contienen

muchas partículas de arcilla para evitar resistencias bajas ya que el porcentaje de agregados varía del 60 al 85 % de la cantidad total del volumen de concreto, e influyen tanto en las propiedades en estado fresco como en estado endurecido (Kosmatka y col., 2004).

2.3.4 Aditivos minerales

Los aditivos minerales que se adicionan al concreto como reemplazo parcial del cemento se obtienen generalmente de industrias y se denominan puzolanas. Una puzolana es un material silicoaluminoso que en presencia de humedad se combina con el hidróxido de calcio en el concreto para formar silicato de calcio hidratado. Éste compuesto mejora la resistencia a la compresión, impermeabilidad, resistencia a los sulfatos y se reduce la expansión volumétrica. El uso de las puzolanas puede aumentar o disminuir la demanda de agua, dependiendo de la forma de las partículas, la textura superficial y la finura. En el futuro posiblemente se descubrirán más puzolanas con interacciones más precisas y especializadas (Aitcin, 2000). Los materiales con propiedades puzolánicas más conocidos y utilizados mundialmente son la ceniza volante y el humo de sílice.

2.3.4.1 Ceniza volante

La ceniza volante es un subproducto que se obtiene de la combustión de carbón mineral en las centrales termoeléctricas, éste material está compuesto básicamente por cuatro óxidos principales que son: CaO , SiO_2 y Al_2O_3 , Fe_2O_3 , dependiendo de la variación de dichos óxidos la ceniza volante puede ser más o menos reactiva (Li y col., 2000).

La ceniza volante generalmente disminuye la demanda de agua y la mayoría de las otras puzolanas actúan de manera contraria. Las puzolanas disminuyen el sangrado debido a su finura y reducen el aumento de la temperatura de reacción del concreto,

debido al retardo de la reacción química (Das, 2006). La ceniza volante también influye en la trabajabilidad del concreto. Investigaciones sugieren que la ceniza tiene tres efectos en el concreto: morfológico, activador para reaccionar y como agregado fino. En la morfolología incluye principalmente dos efectos que son de relleno y lubricante (Wang y col., 2003). Para actuar la ceniza volante como reductor de agua influyen su forma, morfolología, distribución y tamaño.

Las partículas de las cenizas volantes varían en tamaño de 5 a 100 micrones y contienen óxidos de silicio en condición amorfa que reaccionan con los productos de hidratación del cemento. Esta puzolana es usada para reemplazar un porcentaje de cemento y así mejorar las propiedades del concreto en donde se desarrollan construcciones masivas y se requiere un proceso lento de hidratación y un bajo desarrollo de calor de hidratación (Malhotra y Ramezaniapour, 1994). La razón principal para usar la ceniza volante es que disminuye la difusión de los iones cloruros en el interior del concreto, mejorando la distribución de los poros y densificando la matriz del concreto (Leng y col., 2000). Además, la ceniza volante combinada con un inhibidor de corrosión protege al acero de refuerzo disminuyendo la velocidad de corrosión y aumentando la vida útil de una estructura expuesta a cloruros (Montes y col., 2005). Sin embargo, no hay que olvidar el curado, ya que es un proceso muy importante para el concreto que contiene adiciones minerales (Liu y col., 2004).

2.3.4.2 Humo de sílice

El humo de sílice es una puzolana de partículas muy finas, actúa como relleno mineral para producir concreto de alta resistencia y baja permeabilidad. El humo de sílice es un subproducto resultante de la reducción de cuarzo de alta pureza con carbón o también se puede obtener de las fábricas de silicones; proporciona mayor resistencia al concreto en menor tiempo y acelera el proceso de fraguado (Malhotra, 1994).

Debido a la condición cristalina amorfa que tienen las partículas del humo de sílice tienen la propiedad de reaccionar muy rápido al contacto con el agua, la forma de sus partículas son esféricas; además, son muy pequeñas casi cien veces menores que las partículas de cemento y es básicamente un 85 % de dióxido de silicio (Kosmatka y col., 2004).

2.3.5 Aditivos químicos

Los aditivos químicos son todos los aditivos que se utilizan para modificar las propiedades del concreto ya sea en estado fresco o endurecido; como son: aditivos inclusores de aire, reductores de agua, controladores de fraguado, reductores de agua de alto rango, superfluidificantes, entre otros; sirven para modificar las propiedades del concreto ya sea para hacerlo más trabajable, para ahorro de energía o para otros fines. Los aditivos, a diferencia del cemento, agua y agregados, no son componentes principales de la mezcla; pero, su uso se extiende cada vez más porque son capaces de impartir beneficios físicos y económicos considerables al concreto (Aitcin, 2000).

Estos beneficios incluyen el uso del concreto en circunstancias donde existen dificultades para colocarlo. Los aditivos son productos químicos que pueden ser orgánicos e inorgánicos en cuando a su composición y se clasifican según su función en el concreto. En la Tabla 2.3 se resumen los tipos de aditivos según su función; cabe aclarar que no existe alguna cantidad definida sobre la adición de aditivos químicos, ya que éstos varían de acuerdo a los componentes de la mezcla y las especificaciones del fabricante solo sirven de guía.

La efectividad de cualquier aditivo puede variar según su dosificación en el concreto, cantidad de mezcla, así como los demás ingredientes de la mezcla de concreto; no obstante, el efecto inmediato se presenta en estado fresco y posteriormente en concreto endurecido.

Tabla 2. 3 Tipos de aditivos químicos

Reductor Tipo:	Función
A	Reductor de agua
B	Retardante
C	Acelerante
D	Reductores de agua y retardantes
E	Reductores de agua y acelerantes
F	Reductores de agua de alto rango o superfluidizantes
G	Reductores de agua de alto rango y retardantes o superfluidificantes y retardantes

Fuente: Mehta y Monteiro (1998)

2.3.5.1 Reductores de agua

Los reductores de agua se emplean para disminuir la cantidad de agua de mezclado aproximadamente del 5% al 10%. Con los reductores de agua generalmente se obtienen resistencias elevadas del concreto porque permiten el uso de un concreto con una relación agua/cemento baja; sin embargo, pueden producir retracción por secado o contracción por desecación del concreto. Consecuentemente, la eficiencia de los reductores de agua está en función de su composición química, de la temperatura que se desarrolla dentro del concreto, la finura y composición química del cemento, así como de la cantidad de cemento y la presencia de otros aditivos (Ramachandran y Feldman, 2000).

2.3.5.2 Superplastificantes

Los superplastificantes se adicionan para aumentar la trabajabilidad de la mezcla de concreto, cuando se usa una relación agua/cemento baja es muy importante el uso de superplastificantes ya que éstos hacen mas fluido el concreto para colocarlo en donde existe una mayor concentración de acero de refuerzo y se mejora la impermeabilidad del concreto (Kosmatka, 2004).

Los superplastificantes han sufrido cambios desde hace tres generaciones ya que los de la primera generación estaban compuestos por naftalina, los de la segunda de lignosulfatos y los de la tercera de policarboxilatos. Sin embargo, no todos tienen la misma efectividad en el concreto ya que los de la tercera generación disminuyen aún más el tamaño de los poros dentro del concreto, donde el diámetro de los poros son menores a $0.1\mu\text{m}$ (Sakai y col., 2006). La primera generación reduce el agua en un 5 al 12% la segunda reduce el agua entre un 12 y un 25% y la tercera generación en un 40% (De la peña y Vernal, 2007)

Como se mencionó con anterioridad los superplastificantes a base de policarboxilatos permiten reducir el agua de mezclado hasta un 40% sin causar efectos secundarios en el concreto; con dichos superplastificantes se obtienen concretos extraordinariamente resistentes, impermeables y durables; ésta capacidad también permite elaborar concretos muy fluidos y autoconsolidantes (De la peña, 2007).

2.4 La técnica de velocidad de pulso ultrasónico (PVU)

La velocidad de pulso ultrasónico es una técnica desarrollada para probar los materiales y se usa como control de calidad. Es una prueba no destructiva y en la actualidad es muy utilizada para evaluar estructuras de concreto debido a su fácil empleo y permite determinar la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson del concreto (Solís y col., 2004). La velocidad con que el pulso ultrasónico atraviesa un elemento de concreto depende de la densidad y sus propiedades elásticas; sin embargo, la velocidad se afecta cuando existe alguna discontinuidad o cavidades dentro del concreto (Manual Pundit, 1998). La Técnica de la velocidad de pulso ultrasónico fue desarrollada originalmente en Inglaterra y su primera aplicación para medir las propiedades del concreto fue hecha por los investigadores Jones y Gatfield entre 1945 y 1949 al mismo tiempo en Canadá fue utilizado por Leslies y Cheesman (Livingston, 2001). El pulso es generado por una fuente constante de 50 kHz, con un periodo de 0.02 segundos.

2.4.1 Aplicación de la VPU en elementos de concreto

La técnica de velocidad de pulso ultrasónico es utilizada en muchos materiales desde cerámicos, madera, plásticos; pero en especial en estructuras de concreto esto debido a su sencillez. La aplicación de dicha técnica se ha implementado por la necesidad de resolver serios problemas que afectan la vida de servicio de una estructura; además, para reparar una estructura se requiere identificar plenamente la localización de una grieta, tamaño, así como defectos o discontinuidades dentro de un material. Actualmente se pueden combinar técnicas hasta encontrar imágenes acerca de las profundidades y anchos de grietas dentro del concreto (Chang y Wang 1997). 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. La forma más recomendable de realizar la prueba es de manera directa para evitar ruidos experimentales como la insensibilidad de la velocidad; además, cuando se hacen pruebas de forma semidirecta o indirecta, la trayectoria de la onda es menos definida y no proporciona mayor información acerca de las características más profundas del concreto porque la velocidad se ve afectada por las capas superficiales.

2.4.2 Detección de fracturas en concreto con VPU

Para analizar la integridad de un determinado material en éste caso del concreto se consideran dos parámetros importantes que son la velocidad de pulso ultrasónico y amplitud de la onda. La velocidad es determinada por el tiempo en que atraviesa la onda el elemento y la longitud de dicho elemento. Cuando la profundidad de la grieta es considerable la velocidad de pulso ultrasónico es lenta. La amplitud también se utiliza para detectar si existe corrosión o no en un elemento de concreto armado; la amplitud de la onda es menor o empieza a decaer cuando existe riesgo de corrosión o algún otro tipo de deterioro dentro del concreto armado (Yeih y Huang, 1998).

La velocidad de pulso ultrasónico está en función del tiempo de arribo de la señal de un extremo a otro. Cuando se realiza la prueba bajo el método estático se puede observar que cuando el tiempo con el que atraviesa la señal a un espécimen de concreto es aproximadamente de 500 a 1000 micro segundos el concreto tiene defectos en su estructura, o cuando la señal no es captada por el transductor receptor la discontinuidad del concreto es demasiado amplia (Qasrawi y Marie, 2003).

2.4.3 Estimación de resistencia a la compresión con la VPU

La calidad del concreto es generalmente evaluada por su resistencia; así mismo la velocidad de pulso ultrasónico está en función de la homogeneidad del material; 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 (Zegá y Di Maio 2007).

2.5 Concepto de durabilidad

El concepto de durabilidad es variable, pero la mayoría de los autores coinciden en que la durabilidad se define como la capacidad del concreto para resistir la acción del medio ambiente al cual está expuesto, ya sean ataques químicos, físicos o biológicos, abrasión o de cualquier otro proceso de deterioro (Sánchez, 2003). La durabilidad es de suma importancia, ya que es esencial para que toda estructura de concreto deba continuar ejecutando sus funciones destinadas, es decir manteniendo su resistencia y utilidad durante el tiempo en servicio requerido o esperado. La durabilidad se ve afectada por muchos factores como son: condiciones de humedad y presencia de sustancias químicas en el ambiente, sulfatos, grietas, etc. Los sulfatos crean expansión dentro del concreto formando micro grietas, reducen la

resistencia a compresión y a tensión permitiendo la disminución de la vida útil de una estructura de concreto (Park y Paulay, 1994).

El concreto durable debe ser capaz de soportar el ataque de los agentes a las que va a estar expuesto. Anteriormente los desarrollos en tecnología del concreto se concentraban en alcanzar resistencias más elevadas ya que había una suposición que “el concreto resistente es concreto durable”. Ahora se sabe que para muchas condiciones de exposición la resistencia y durabilidad van explícitos (Neville, 1995). Para que el concreto tenga una vida útil prolongada es muy importante cuidar su calidad mediante un espesor de recubrimiento adecuado y que el diseño estructural sea también adecuado para evitar deflexiones importantes y microgrietas (Sánchez, 2003).

Existen varias especificaciones para alcanzar la durabilidad del concreto en donde no solamente es importante cumplir con los requisitos de resistencia si no que se deben seleccionar adecuadamente todos los componentes del concreto, desde la calidad de los agregados, agua, aditivos, diseño de mezclas y las especificaciones a las que va a estar sometido el concreto (Castro, 2001). Consecuentemente las pruebas de sus propiedades mecánicas juegan un papel muy importante porque dependiendo de los resultados se puede aceptar o rechazar el uso del concreto para cada lugar en específico.

2.5.1 Difusión de cloruros

La difusión es un proceso en donde los iones cloruros son transportados de un lugar a otro debido a una diferencia de concentraciones. El proceso de difusión siempre ocurre cuando existe una concentración alta de alguna sustancia a una concentración menor. El concreto debido a sus propiedades se considera como un medio anisotrópico y la difusión de los iones cloruros penetran en dicho material en diferentes direcciones (Cranck, 2004). El coeficiente de difusión de cloruros es un parámetro generalmente utilizado para clasificar el concreto con respecto a sus

propiedades de durabilidad y para predecir su vida útil. Sin embargo, el transporte de los iones cloruros a través del concreto es muy complejo e implica desarrollar varios métodos de investigación para determinar los cloruros; los métodos para determinar el coeficiente de penetración de cloruros difieren entre sí ya que unos son más precisos que otros (Castellote y Andrade, 2006).

2.5.2 Permeabilidad y porosidad del concreto

La permeabilidad del concreto es definida como la facilidad con la que un fluido puede pasar a través de un sólido. La permeabilidad de un concreto depende del grado de hidratación de la pasta del cemento; además, la porosidad del concreto es directamente responsable sobre la permeabilidad del concreto. Cuando la porosidad del concreto es baja la impermeabilidad es alta y cuando se utiliza una relación agua/cemento baja la impermeabilidad del concreto se puede mejorar aún más (Mehta y Monteiro, 1998).

La porosidad que el concreto adquiere depende de los aditivos, tipo de cemento y relación agua/cemento utilizados. Un concreto muy poroso tiene aplicaciones muy especiales; sin embargo, para zonas agresivas resulta perjudicial ya que a través de los poros ingresan los agentes agresivos y afectan la durabilidad de una estructura de concreto causando el fenómeno de la corrosión (Castro, 2001). No obstante, el tamaño y la distribución de los poros, humedad relativa, temperatura y la succión capilar pueden acelerar el proceso de deterioro de una estructura. Cuando se realiza un curado adecuado y se hidratan totalmente los materiales cementantes, la porosidad del concreto disminuye considerablemente (Aitcin, 1998). La permeabilidad del concreto depende directamente de la conectividad que existe entre los poros; sin embargo, cuando los poros se encuentran aislados entre si la permeabilidad del concreto disminuye considerablemente.

CAPÍTULO 3

Capítulo 3 Marco teórico

En este capítulo se analizan los principios básicos de la velocidad de pulso ultrasónico, coeficiente de penetración de cloruros y resistencia mecánica a la compresión del concreto para comprender los fenómenos involucrados en el presente estudio.

3.1 Velocidad de pulso ultrasónico y principios de la ecuación de onda

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 y col., 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 ya que depende de la densidad de la matriz del concreto, tipo de cemento, aditivos y dosificación del concreto (Belfé y col., 2005). 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

Ecuación de onda

En los métodos ultrasónicos se utilizan instrumentos que transmiten ondas por ciertos intervalos de frecuencia y se utilizan para detectar poros, fisuras, también para conocer las propiedades básicas como la composición del material. El tiempo con que atraviesa una onda un material está correlacionado con el módulo de elasticidad del material, densidad, estructura, homogeneidad y grano del material.

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 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 de onda. 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 (Ec., 3.1).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3.1)$$

en donde:

$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ desplazamiento con respecto al tiempo

$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ desplazamiento con respecto a un espacio

V 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 siguiente ecuación.

$$v = \frac{d}{t} \quad (3.2)$$

en donde:

v Velocidad con la cual la señal atraviesa el concreto (m/s)

d Longitud del espécimen de concreto (m)

t Tiempo que tarda la señal para atravesar el espécimen de concreto (s)

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 (Carrion y col., 1999).

Longitud y frecuencia de onda

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 (Ec.,3.3). Cuando la longitud de una onda es pequeña la frecuencia es grande y cuando la longitud es grande la frecuencia es pequeña.

$$\lambda = \frac{V}{F} \quad (3.3)$$

en donde:

λ Longitud de onda

V Velocidad de onda

F 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; el oído humano percibe hasta una frecuencia máxima de aproximadamente 20 000 ciclos por segundo, (20 kHz). 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 3.1

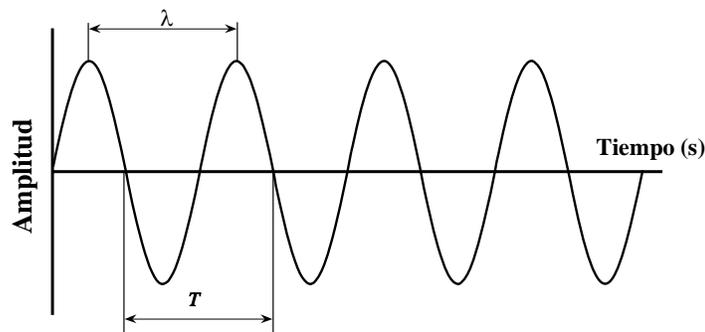


Figura 3. 1 Longitud y frecuencia de onda

Cuando se realiza la prueba de VPU en el concreto la frecuencia es constante de 50 kHz la cual es proporcionada por el dispositivo; 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.

3.2 Segunda ley de Fick

La durabilidad de estructuras de concreto reforzado depende de su permeabilidad, pues la primera línea de defensa que posee el concreto es la impermeabilidad, evitando así que penetren los iones cloruros, el agua y el dióxido de carbono, pues estos agentes son dañinos y causan el deterioro prematuro de la estructura. El

fenómeno de la difusión de agentes a través del concreto se puede representar mediante la segunda ley de Fick (Ec, 3.4).

$$\frac{dc}{dt} = D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (3.4)$$

en donde:

- c Concentración de iones cloruros (%)
- t Tiempo (s)
- x Profundidad de concentración de cloruros (mm)
- D Coeficiente de penetración de cloruros $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

La ecuación anterior indica que cuando se produce el fenómeno de difusión en el concreto, la concentración de cloruros va cambiando a diferentes profundidades del material y con el tiempo. Además, el fenómeno de la difusión está en función de las propiedades del material.

Para obtener el coeficiente de difusión de cloruros en el concreto se ocupa la solución de la ecuación 3.4 que se presenta a continuación (Ec. 3.5):

$$C_{(x,t)} = Co \left[1 - erf \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (3.5)$$

en donde:

- $C_{(x,t)}$ Concentración de iones cloruros a una profundidad (x), en un tiempo (t) (%)
- Co Concentración de cloruros en la superficie (%)
- x Profundidad de concentración de cloruros (mm)
- t Tiempo de exposición a cloruros (s)
- D Coeficiente de penetración de cloruros $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

De la ecuación 3.5 se obtiene la solución particular para obtener la ecuación 3.6 y con la información de la concentración de cloruros a diferentes profundidades se determina el coeficiente de difusión de cloruros y la concentración de cloruros que existe en la primera capa:

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_j) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_e \cdot t}}\right) \quad (3.6)$$

en donde:

$C(x,t)$ Concentración de cloruros (%)

C_s Concentración de cloruros en la parte superficial del concreto (%)

C_j Concentración de cloruros en el concreto control (%)

erf Función error

x Profundidad (mm)

t Tiempo de exposición a cloruros (s)

D_e Coeficiente de penetración de cloruros $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

La ecuación 3.6 es comúnmente utilizada para determinar el coeficiente de penetración de cloruros. Sin embargo, actualmente en otros países se están agregando nuevas variables para hacer los estudios más complejos y tratar de explicar con más detalle todos los fenómenos que ocurren dentro del concreto (Castellote y Andrade, 2006). Algunos estudios han comprobado que cuando la relación agua/cemento decrece el coeficiente de difusión (D_e) también decrece considerablemente; es decir, que la penetración de los cloruros es más lenta. Por otra parte cuando se adiciona ceniza volante al concreto el coeficiente de penetración de los cloruros (D_e) disminuye y la profundidad de penetración de iones cloruros también decrece (Suryavanshi y col., 2002).

La concentración de cloruros a diferentes profundidades se representa mediante una ecuación matemática obtenida de un análisis de regresión (Figura 3.2); así mismo, la curva que representa a dicho fenómeno se obtiene a partir de la concentración de cloruros.

La durabilidad inadecuada se manifiesta a través del deterioro prematuro de las estructuras de concreto; la durabilidad puede ser afectada ya sea por factores internos o externos, en donde las acciones pueden ser físicas, químicas o mecánicas. El coeficiente de difusión de los cloruros depende en gran parte de la microestructura como es la porosidad y la continuidad de los poros dentro del concreto, así como la calidad del cemento (Castro, 2001). La cantidad de poros existentes en el concreto ayudarán o evitarán la migración de los cloruros; así mismo, en una mezcla de concreto que contenga cemento con alto contenido de C_3A se formarán cloroaluminatos estables y disminuirán el paso de los cloruros a través del concreto (Mehta y Monteiro, 1998).

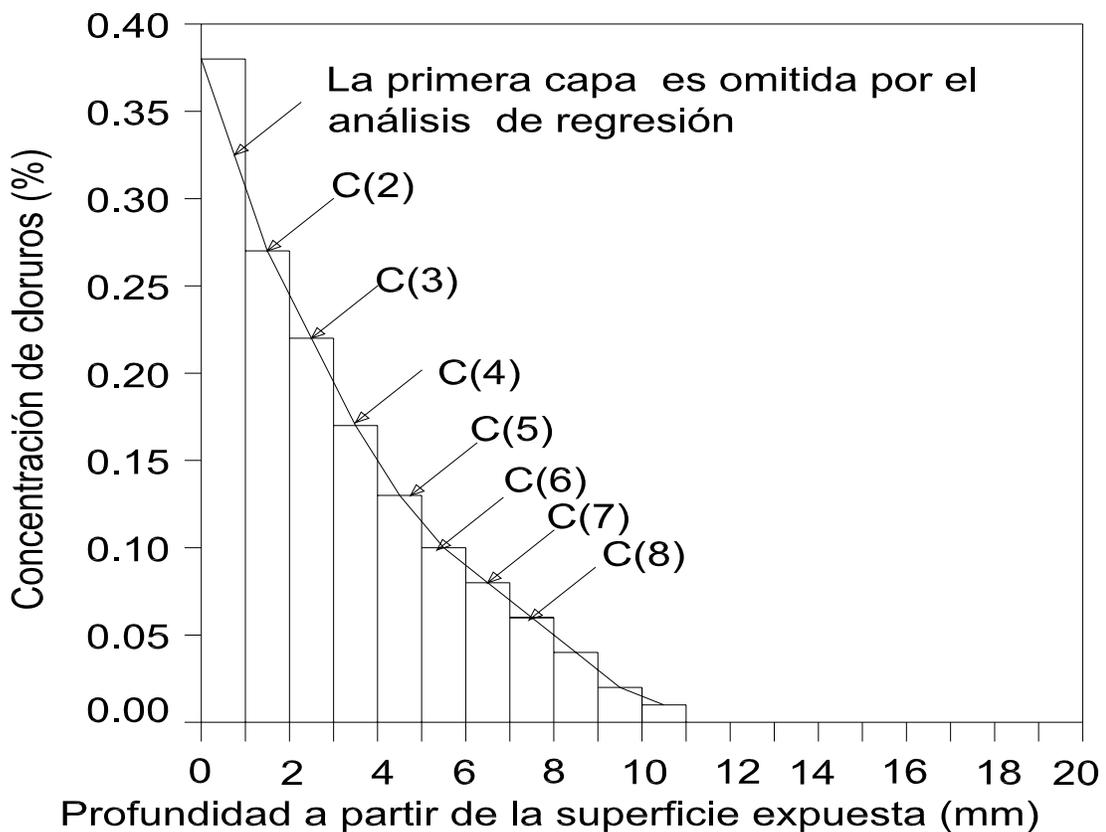


Figura 3. 2 Perfil de cloruros (Fuente NT BUILD 443)

3.3 Ley de Hooke

La ley de Hooke establece, que dentro de cierto límite la deformación producida en un material elástico es proporcional al esfuerzo aplicado. De no modificarse adecuadamente, las fórmulas deducidas de la mecánica se aplican solamente dentro del límite elástico, mas allá de éste se modifican por coeficientes experimentales. El módulo de elasticidad del concreto ($E = \text{MPa}$), es la relación del incremento del esfuerzo unitario al incremento de la deformación unitaria dentro del límite elástico (Baumeistery Eugene, 1984).

La deformación que presenta el concreto es en sentido longitudinal y sentido transversal, todas las deformaciones y esfuerzos que se generan dentro del concreto al aplicarle una carga se rigen bajo la ley de Hooke ($E_c, 3.7$) que se describe a continuación:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.7)$$

en donde:

E Módulo de elasticidad (kg/cm^2) ó (MPa)

σ Esfuerzo (kg/cm^2) ó (MPa)

ε Deformación unitaria

El módulo de elasticidad está en función del esfuerzo y deformación unitaria reversible de cada material. Aunque el concreto está compuesto de materiales elásticos la curva esfuerzo deformación es no-lineal, esto se debe a la generación de microfisuramientos del concreto y a la consiguiente redistribución interna de esfuerzos (Young y col., 1998).

El coeficiente de Poisson es una relación entre la deformación transversal del material (concreto), con respecto a la longitudinal. La relación de Poisson del concreto ordinario es mayor que la del concreto de alto comportamiento y oscila

entre 0.10 y 0.30 (Park, 1994), y para el concreto HPC entre 0.18 a 0.24 (Ahmad y Shah, 1985).

$$\mu = \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{yy}} \quad (3.8)$$

en donde:

- μ Relación de poisson
- ε_{xx} Deformación transversal
- ε_{yy} Deformación longitudinal

El concreto trabaja principalmente a compresión y para determinar su resistencia se hace mediante una serie de ensayos a este esfuerzo. Cuando el concreto es sometido a carga sostenida, la deformación aumenta con el tiempo debido a que el concreto no es un material 100 % elástico, existen muchos materiales más elásticos como es el acero y menos elásticos como el vidrio. Por lo tanto, la deformación en material más elástico es mayor que en un elemento más rígido.

La resistencia a la compresión del concreto es la propiedad que comúnmente se toma en cuenta para el diseño de una estructura, pero en algunas ocasiones se toma en cuenta la resistencia a la tensión del mismo. Dicha resistencia a la compresión se ve afectada por una serie de factores tales como: grado de compactación, curado y porosidad; por lo tanto, la deformación entre un tipo de concreto a otro es diferente.

La curva esfuerzo-deformación del concreto se presenta en la Figura 3.3. Para un concreto de alta resistencia el módulo de elasticidad es mayor comparado con el módulo de un concreto ordinario (Young y col., 1998). Por lo tanto, cuando el esfuerzo que soporta un concreto es alto y su deformación es pequeña el módulo de elasticidad aumenta considerablemente; pero, cuando la deformación del concreto es grande el módulo disminuye.

Durante la resistencia a la compresión axial del concreto se presentan dos zonas, la primera zona (elástica) se presenta cuando se aplica el 40 % de la carga última del concreto; además, se considera que en esta zona las propiedades del concreto no se llegan a alterar. Sin embargo, cuando la carga es mayor al 40 % se presenta una deformación permanente y se conoce como zona inelástica. Pero también influye el tiempo, si se aplica un 50 % de carga y por un largo periodo se puede presentar el flujo plástico del concreto y una deformación permanente.

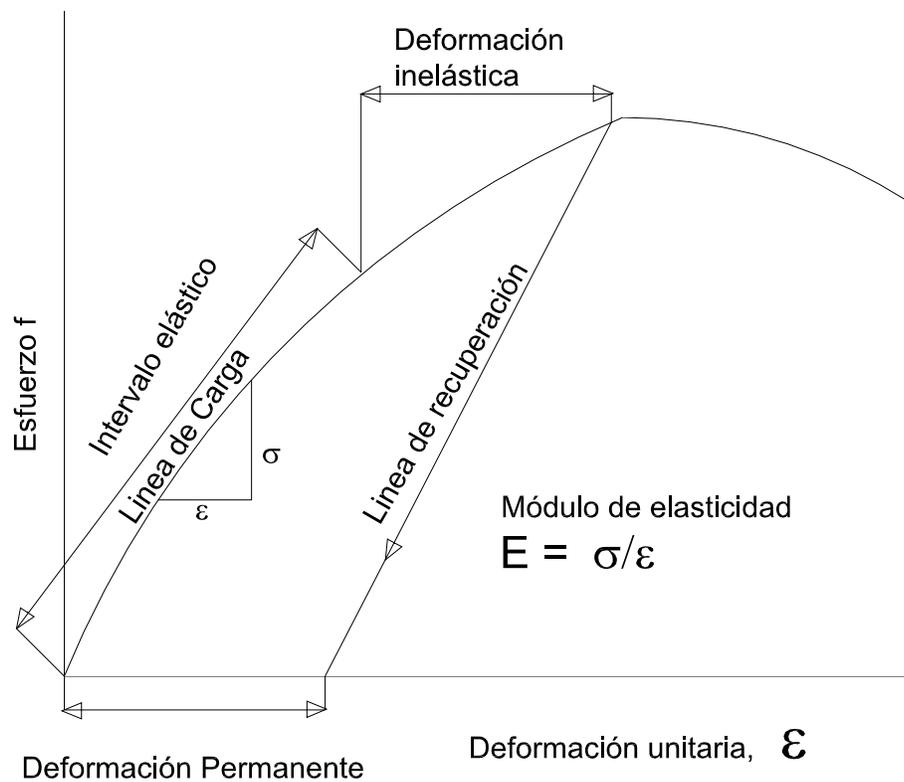


Figura 3. 3 Curva genérica de esfuerzo -deformación unitaria del concreto (Fuente Kosmatka, 2004)

CAPÍTULO 4

Capítulo 4 Metodología

En éste capítulo se describe la metodología utilizada para el desarrollo del presente trabajo. Las actividades comprenden la caracterización de los materiales, diseño de mezclas de concreto utilizando tres métodos diferentes, elaboración de mezcla de prueba con sus correspondientes ensayos tanto en estado fresco como endurecido, rediseño de mezclas, elaboración de mezclas definitivas y pruebas en estado fresco. Posteriormente se efectuaron las pruebas en estado endurecido, incluyendo la velocidad de pulso ultrasónico. Se validaron los resultados y se obtuvo de la literatura información sobre coeficientes de penetración de cloruros para establecer una correlación de éstos con las correspondientes velocidades de pulso ultrasónico. En la Figura 4.1 se hace una representación esquemática de la metodología.

Durante el diseño de mezclas se estudiaron los métodos de curvas de Duff Abrams, American Concrete Institute (ACI) y High-Performance Concrete (HPC). Posteriormente se diseñaron las mezclas de concreto utilizando dichos métodos para determinar el contenido de ingredientes correspondientes para 1m^3 de concreto. Estos métodos son prácticamente los más usados en la industria del concreto debido al respaldo experimental que los soporta. Para efectos de comparación y para diferenciar a las mezclas de concreto estudiadas en éste trabajo se utilizaron las siguientes nomenclaturas: la primera mezcla diseñada con el método de Duff Abrams con una relación agua/cemento de 0.55 se denominó ABR, la segunda con el método de volúmenes absolutos y con una relación agua/cemento de 0.40, ACI; y la tercera con relación agua/cemento de 0.41 con el método de concreto de alto desempeño (HPC). Cabe mencionar que la cuarta y quinta mezclas se diseñaron también con el método de HPC, pero contenían 20 y 40% de cenizas volantes y se denominaron HPC20 y HPC40, respectivamente.

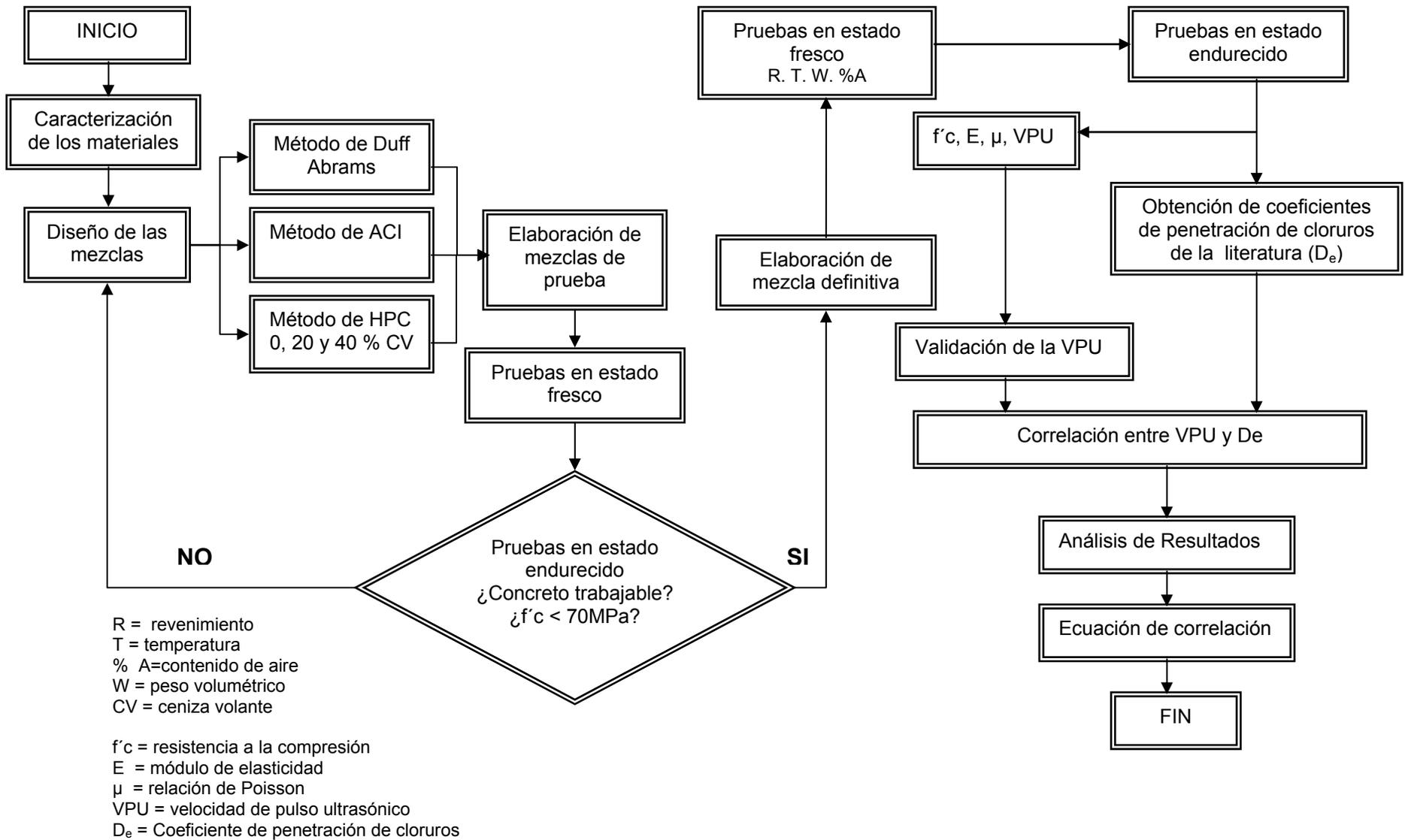


Figura 4. 1 Diagrama metodológico para la investigación

Se elaboraron mezclas de prueba para los concretos en estudio con el propósito de evaluar parámetros tales como revenimiento, contenido de aire y resistencia a la compresión, los cuales permitieran definir si dichos concretos cumplían con requisitos mínimos de trabajabilidad y resistencia o en su caso realizar las modificaciones al diseño. En este contexto las Normas Técnicas y Complementarias del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (NTCDF) establecen una resistencia máxima a compresión de 70 MPa para una zonas sísmicas; por lo tanto, las mezclas que obtuvieron una resistencia mayor o igual a dicho valor se rediseñaron para encontrar resistencias menores y que fueran aptas para uso estructural en el estado de Oaxaca.

4.1 Diseño experimental

Los factores que se estudiaron durante el desarrollo de este trabajo fueron tres tipos de mezclas de concreto (ABR, ACI y HPC) y los niveles de sustitución de ceniza volante (CV) fueron como se muestra en la Tabla 4.1. Se consideró adicionar ceniza volante solamente al concreto HPC porque el método de Duff Abrams no considera en su diseño el uso de materiales suplementarios, el método de ACI si considera la incorporación de éstas; sin embargo, en este trabajo se utilizó un cemento puzolánico. El primer factor estudiado en este trabajo representa en mayor porcentaje a la cantidad de estructuras construidas en el estado de Oaxaca, seguido del concreto ACI y para el tercer factor es relativamente nueva su aplicación.

Las variables respuestas analizadas para cada uno de los factores se indican también en la Tabla 4.1; los resultados de las pruebas en estado fresco se obtuvieron inmediatamente después de elaborar el concreto. Por otra parte, las pruebas en estado endurecido se efectuaron a los 3, 7, 14 y 28 días, excepto la velocidad de pulso ultrasónico, la cual se registró diariamente por un periodo de 100 días para evaluar el proceso de hidratación de los diferentes concretos con el tiempo.

En el caso del coeficiente de penetración de cloruros fue necesario acudir a la literatura y buscar coeficientes de penetración de cloruros correspondientes a mezclas de concreto con características similares a las que se estudiaron en éste trabajo. Dichos coeficientes fueron obtenidos y reportados por diferentes autores en revistas científicas; por lo tanto, se adoptaron tales parámetros para avanzar con el desarrollo de éste trabajo.

Tabla 4. 1 Variables consideradas en este estudio

Variables	Niveles	Respuestas en estado fresco	Respuestas en estado endurecido
ABR	1		Resistencia a compresión ($f'c$)
ACI	1	Revenimiento	Módulo de elasticidad (E)
HPC	0	Temperatura	Relación de poisson (μ)
HPC	20 % CV	Peso volumétrico	Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)
HPC	40 % CV	Contenido de aire	*Coeficiente de penetración de cloruros (D_e)

* Información obtenida de la literatura.

Se elaboraron un total de 100 especímenes de concreto de forma cilíndrica con dimensiones de 100 x 200 mm, 20 especímenes para cada tipo de concreto, de los cuales cuatro de ellos se utilizaron a diferentes edades para determinar su resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson. Para la prueba de velocidad de pulso ultrasónico se utilizaron dos especímenes para cada mezcla de concreto (Tabla 4.2).

Tabla 4. 2 Pruebas en estado endurecido y cantidad de especímenes elaborados

Tipo de mezcla	Edades de prueba (días) y número de especímenes				
	3 d	7 d	14 d	28 d	1 a 100 d
	f'c, E y μ	f'c, E y μ	f'c, E y μ	f'c, E y μ	VPU
ABR	4	4	4	6	2
ACI	4	4	4	6	2
HPC	4	4	4	6	2
HPC20	4	4	4	6	2
HPC40	4	4	4	6	2

4.2 Caracterización de los materiales

Los agregados grueso y fino (grava y arena) utilizados durante el desarrollo del presente trabajo fueron adquiridos de las regiones cercanas a la ciudad de Oaxaca. La grava se obtuvo de un banco de caliza que se ubica en la comunidad de Santa María el tule Oaxaca; éste material se obtuvo de manera artificial triturándolo para seleccionar el tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " y el retenido en la malla de $\frac{1}{2}$ ". La arena se adquirió en la comunidad de San Lorenzo Cacaotepec Oaxaca, dicho material se extrajo del lecho del río Atoyac. El agua utilizada para la elaboración de las mezclas y para el curado de las mismas fue la que alimenta las instalaciones del CIIDIR IPN Unidad - Oaxaca; el superplastificante Plastol 4000 se adquirió de su distribuidor principal Eucomex y la ceniza volante de la empresa Admixtec en la ciudad de México.

4.2.1 Propiedades de los agregados

Las propiedades de los materiales se obtuvieron bajo sus respectivas normas; para cada propiedad en específico se utilizaron distintas normas como se detalla a continuación.

Para determinar el peso volumétrico seco compacto (PVSC) del agregado grueso y fino se utilizó la norma internacional ASTM C 33 – 03. Esta propiedad se utiliza en el diseño de mezclas para determinar la dosificación de agregados para elaborar 1m^3 de concreto.

La gravedad específica (G.E) de los materiales se obtuvo bajo la norma ASTM C 127 – 04, dicha propiedad indica el peso de un material con respecto a una unidad de volumen. Tanto el porcentaje de absorción (% ABS) como el de humedad (% HUM) de los agregados se obtuvieron bajo la norma internacional ASTM C 70 – 94, estas propiedades sirven para ajustar el contenido de agua en las mezclas de concreto. El módulo de finura de la arena (M.F) se obtuvo bajo la norma ASTM C 125 – 04, dicha propiedad especifica la existencia de partículas gruesas o finas en la granulometría. El tamaño máximo de agregado (TMA) se obtuvo bajo la norma ASTM C 29/C 29M – 97. Dicha característica corresponde al tamaño máximo de partículas de agregado grueso utilizadas en el diseño de mezclas.

El módulo de finura de la arena que se obtuvo primeramente fue de 3.6; sin embargo, dicho resultado indicaba la existencia de un alto contenido de partículas gruesas. Por lo tanto, se procedió a cribar la arena por la malla número cuatro para obtener finalmente el módulo de finura de 2.65 con el cual se diseñaron todas las mezclas de concreto. Esto fue necesario ya que para el diseño del concreto de alto desempeño se recomienda un agregado fino con un módulo de finura entre 2.5 a 3.5 (Mehta y Aitcin, 1990).

Las propiedades de los agregados se muestran en la Tabla 4.3, dichos resultados indican que el peso volumétrico de la arena es mayor con respecto al peso de la grava y la densidad del cemento Apasco es menor con respecto a la densidad de otras marcas de cemento como es el caso del cemento Cruz Azul que tiene una densidad de 3.0 (Kosmatka y col., 2004).

Tabla 4. 3 Resumen de las propiedades de los agregados

MATERIAL	PVSC (kg/m ³)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
Grava	1505	2.58	1.04	0.22		3/4"
Arena	1664	2.65	2.36	1.65	2.83	
Cemento		2.9				
Ceniza volante		2.6				

4.2.2 Características del agua utilizada

El agua utilizada para la elaboración de las mezclas de concreto se tomó directamente de la instalación hidráulica del laboratorio de construcción del CIIDIR-IPN Unidad Oaxaca. Además, con la misma agua se efectuó el curado de los especímenes de concreto. En la Tabla 4.4 se muestran los resultados históricos de las características del agua de pozo que se utiliza en las instalaciones de dicho centro.

Tabla 4. 4 Características químicas del agua

Año de monitoreo		1992	1992	1998	2000	2007
pH (20.4°C)		*	*	*	*	7.6
C.E (Conductividad eléctrica)	(µs/cm)	879	950	1426	1473	*
SDT(Sólidos disueltos totales)	(mg/l)	800	826	973	963	795.74
Cl ⁻ (Cloruros)	(mg/l)	126.4	129.59	*	151.63	33.25
SO ₄ (Sulfatos)	(mg/l)	28.75	*	*	*	*
PO ₄ ⁻ (Fosfatos)	(mg/l)	1.3	*	*	*	*
Fe (total)	(mg/l)	0.8	*	*	*	*
DT (Dureza total)	mgC _a CO ₃ /l	482	370.73	*	*	361.04
Dca (Dureza al calcio)	mgC ₂ CO ₃ /l	422	279	*	*	256.99
AM (Alcalinidad total)	mgC ₂ CO ₃ /l	386.75	362	*	*	304.45
Resistividad eléctrica		*	*	0.782	0.583	*

* Valores no reportados

4.2.3 Composición química del cemento utilizado

El cemento utilizado fue de fabricación mexicana de la marca Apasco, el cemento tenía 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 se acudió a la literatura (Ramachandran y Feldman, 2000) y se comparó la cantidad de óxidos presentes en la composición química (Tabla 4.5). La literatura establece un rango para hacer 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 y se puede emplear en construcciones de concreto en general.

4.2.4 Composición química de la ceniza volante utilizada

La ceniza volante utilizada tenía un bajo contenido de óxido de calcio (4.83 %) y alto contenido de óxido de silicio (61.1 %) (Tabla 4.5). Con base en lo anterior se puede clasificar como tipo F de acuerdo a la norma ASTM C 618. Esta información y la suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 84.46 > 70\%$ confirma que se trata de un material puzolánico, el cual contribuye a mejorar las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto pero ésta última propiedad a edades tardías.

Tabla 4. 5 Óxidos mayores del cemento Pórtland y ceniza volante

Compuesto	Cemento Portland Puzolánico (APASCO)	Ceniza Volante Clase F
Densidad (g/cm ³)	2.90	2.60
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	5.16	20.58
Óxido de Calcio (CaO)	64.75	4.83
Fe (Total) (Fe)	2.0	3.50
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	1.43	2.78
Óxido de Potasio (K ₂ O)	0.62	1.3
Óxido de Magnesio (MgO)	1.66	1.2
Óxido de Manganeso (Mn ₂ O ₃)	0.04	0.05
Óxido de Sodio (Na ₂ O)	1.88	1.28
Óxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	0.08	0.22
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	16.46	61.1
Óxido de Titanio (TiO ₂)	0.14	0.72
Pérdida por ignición 950 °C	5.67	3.69
Suma	97.12	100
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	23.05	84.46

4.2.5 Características del superplastificante

El superplastificante empleado fue el Plastol 4000, este producto se obtiene a granel, en tambos de 200 litros y garrafas de 20 litros. Además, cumple con la norma ASTM C - 494 ya que se encuentra dentro de los reductores de agua de alto rango o superfluidificantes. Cuando se adiciona el Plastol 4000 en el concreto el tiempo de mezclado debe ser de 5 a 10 minutos y sus características se resumen en la Tabla 4.6. No obstante, se debe tomar en cuenta la vida útil de éste superplastificante para garantizar un buen funcionamiento sin que llegue a alterar las propiedades del concreto; la vida útil del superplastificante dada por el fabricante es de un año aproximadamente.

Tabla 4. 6 Características del superplastificante Plastol 4000

Material	Generación	Tipo	G.E (kg/l)	Contenido de sólidos	Contenido de líquido	Dosificación
Plastol 4000	4	F	1.09	30 %	70 %	2 a 15 cm ³ /kg de cemento

Después que se obtuvieron las características y propiedades de los materiales se procedió a diseñar las mezclas de concreto bajo sus respectivos métodos.

4.3 Diseño de mezclas

Se elaboraron mezclas de prueba para obtener parámetros de las propiedades en estado fresco y endurecido. Sin embargo, en las mezclas de prueba se encontraron problemas como falta de trabajabilidad y resistencias mayores a 70 MPa especialmente para la mezcla HPC; por lo tanto, se procedió a modificar la relación agua/cemento. Finalmente se elaboraron las mezclas definitivas que se utilizaron para el desarrollo de éste trabajo así mismo se efectuaron las pruebas correspondientes en estado fresco.

Para el diseño de mezclas de concreto se revisaron tres métodos de diseño diferentes; el método de ABR que es el que comúnmente se emplea y se enseña en las universidades en el estado de Oaxaca, el método de ACI que considera aspectos de durabilidad y el método HPC del cual su uso es relativamente reciente. A continuación se describen y contrastan los tres métodos mencionados.

4.3.1 Método de Duff Abrams

El método propuesto por Duff Abrams en 1918, se caracteriza porque es un método gráfico y de fácil uso, éste método es comúnmente utilizado en el estado de Oaxaca. Sin embargo, tiene limitaciones ya que no considera a los materiales suplementarios y aditivos químicos en su diseño, además la mezcla diseñada bajo éste método es conocida como concreto ordinario. El diseño de mezclas se basa en la resistencia mecánica del concreto y su filosofía de diseño así como las ventajas y desventajas se resumen en la Tabla 4.7. Para utilizar éste método se pueden obtener las gráficas en la literatura o publicaciones de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E., 1998) en donde se establece toda la metodología a seguir para la dosificación de mezclas de concreto. El procedimiento para la dosificación de materiales utilizando este método se presenta en el Anexo (Tabla A.1) de este trabajo.

4.3.2 Método de Volúmenes Absolutos (ACI)

Para el método de diseño por volúmenes absolutos se consideran las condiciones de exposición que va a tener el concreto, el uso de agregados con partículas de varios tipos y tamaños, el uso de aditivos químicos como son retardantes, acelerantes y reductores de agua. No obstante, en dicho método es importante considerar la forma de las partículas así como la densidad de las mismas. En este método se toma en cuenta la masa específica relativa de los materiales para calcular el volumen absoluto que cada uno de ellos ocupará en una unidad de volumen de concreto. En este método existen los criterios de diseño por resistencia y por durabilidad, en el presente estudio el diseño se efectuó con criterios de durabilidad. Los pasos a seguir para diseñar mezclas de concreto con éste método se pueden obtener en la literatura (Mehta y Monteiro, 1998) y en diferentes publicaciones traducidas por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (Kosmatka y col., 2004).

Al utilizar éste método de diseño se tienen algunas ventajas con respecto al diseño de mezclas propuesto por Duff Abrams. Sin embargo, no se pueden diseñar concretos con una resistencia mayor a 60 MPa, así como obtener revenimientos mayores a 250 mm, especialmente porque las propiedades del concreto son sensibles a las características de los agregados y a la cantidad baja de agua utilizada en la mezcla. Las ventajas y desventajas del diseño de mezclas se resumen en la Tabla 4.7. Es necesario aclarar que éste método actualmente ya incluye ciertos criterios para abordar el uso de materiales cementantes suplementarios como es el caso de sílice condensado, ceniza volante, escoria de alto horno y algunas otras puzolanas de origen natural; sin embargo, no especifica una cantidad exacta para ser utilizada en cada caso (Huerta y Tena, 2004). En el Anexo (Tabla A.2) del presente documento se muestran las dosificaciones obtenidas utilizando el método de ACI.

4.3.3 Método de diseño para Concreto de Alto Desempeño

Este método el cual es relativamente nuevo, considera criterios de durabilidad y permite la adición de materiales suplementarios en su diseño; consecuentemente debido a la inclusión de nuevos materiales demanda su constante evolución.

Los principios fundamentales para la producción del concreto de alto desempeño son principalmente la resistencia, estabilidad dimensional, impermeabilidad y gran trabajabilidad. El método de diseño para concreto de alto desempeño se empezó a desarrollar para ser usado en ambientes hostiles, para estructuras cercanas a las costas marinas y para túneles (Aitcin y Mehta, 1998).

En un principio éste método se desarrolló para diseñar mezclas de concreto con resistencias elevadas y en especial para mezclas con propiedades que puedan resistir las acciones de congelamiento y deshielo. No obstante, debido a la demanda por hacer estructuras más altas en todo el mundo, este tipo de concreto se viene

desarrollando en otros países y cumpliendo con requisitos muy específicos. Actualmente se busca trabajar cada vez con menores relaciones agua/cemento y una combinación exacta de materiales suplementarios (Bhanja y Sengupta, 2004). Un resumen sobre los pasos a seguir en este método se presentan en el Anexo (Tabla A.3) de este trabajo. En la Tabla 4.7.se hizo un resumen sobre las ventajas y desventajas de uso de cada método de diseño.

Tabla 4. 7 Ventajas y desventajas del uso de los diferentes métodos de diseño

Método	Filosofía de diseño	Requisitos	Ventajas	Desventajas
ABR	Utilizar un método gráfico con base en la relación agua/cemento para determinar la resistencia y otras propiedades del concreto	Resistente	Uso de todos los tamaños de partículas Menor consumo de cemento	No considera adiciones minerales y químicos Inestabilidad volumétrica
ACI	Emplear una adecuada dosificación de agregados con base a su densidad para elaborar 1 m ³ de concreto	Resistente Durable Denso	Uso de aditivos Químicos y minerales Uso de todos los tamaños de partículas	No especifica la cantidad adecuada de aditivos minerales Mayor consumo de cemento
HPC	Combinar los dos métodos anteriores como es el uso de la relación agua/cemento baja y la dosificación óptima de los agregados	Resistente Estable dimensionalmente Impermeable Durable Trabajable Económico Ecológico	Uso de aditivos químicos y minerales	Uso de tamaño de partículas que pasa ¾" y es retenida en la malla de ½" Mayor consumo de cemento Método en evolución

4.4 Pruebas en estado fresco

La mezcla de concreto se elaboró bajo la norma ASTM C 172 – 04, consecuentemente se efectuaron las pruebas en estado fresco ya que son de gran importancia y permiten obtener el primer indicativo acerca del comportamiento final de las mezclas de concreto. Durante las pruebas en estado fresco se observa la consistencia, fluidez, contenido de aire del concreto, entre otras propiedades, lo cual permite realizar correcciones para mejorar la apariencia del concreto. Las pruebas en estado fresco más importantes se describen a continuación.

4.4.1 Revenimiento

El revenimiento o asentamiento del cono de Abrams se rige bajo la norma ASTM C143/C143M-05. El revenimiento es un indicativo de la trabajabilidad del concreto. Para obtener dicho resultado la prueba se realizó al momento del mezclado y en el tiempo especificado por la norma ya que el concreto pierde revenimiento con el tiempo o con el efecto de algunos aditivos. Para realizar la prueba de revenimiento; además, para evitar la contaminación del concreto se utilizó una placa metálica lisa y los resultados obtenidos se muestran en la sección de resultados para efectos de comparación.



Figura 4. 2 Prueba de revenimiento del concreto

4.4.2 Contenido de aire

Se utilizó el método de presión para estimar el contenido de aire atrapado en el concreto. Este ensayo está regido bajo la norma ASTM C 231 – 04. El contenido de aire en ocasiones es benéfico para condiciones particulares; sin embargo, para el objetivo de esta investigación el contenido de aire debería ser menor al 2 %. En zonas cálidas y cercanas al mar existen iones cloruros en el ambiente que podrían afectar a las estructuras. Pero además, en las zonas urbanas existe una cantidad importante de CO₂ que también afecta las propiedades del concreto. Por lo tanto, una combinación de ambos y con un concreto con alto contenido de aire pueden afectar la durabilidad de una estructura de concreto (Castro, 2001).



Figura 4. 3 Prueba de contenido de aire atrapado en el concreto

La Figura 4.3 muestra el momento en que se afora agua dentro del recipiente para expulsar el aire que se encuentra atrapado en la parte superior del recipiente. En ocasiones el uso de aditivos minerales y/o químicos puede propiciar un incremento en la incorporación de aire al concreto; es el caso particular cuando se usa la ceniza volante con alto contenido de carbono el contenido de aire puede aumentar hasta un 4 % (Malhotra y Mehta, 2005).

4.4.3 Peso volumétrico del concreto

El peso volumétrico del concreto está normado por la ASTM C94/C94M-04a, esta prueba permite determinar el peso del concreto y su densidad los cuales son útiles para estimar algunas propiedades en estado endurecido. Un concreto más denso es un concreto con mejores propiedades, resistente ante las cargas y ante el paso de los agentes agresivos (Mehta y Monteiro, 1998). Además, esta prueba puede ser útil para determinar el contenido de aire que está atrapado dentro del concreto ya que está en función del peso. En la Figura 4.4 se ejemplifica la forma de obtener el peso volumétrico del concreto en estado fresco; además, dicho resultado se obtuvo con la ecuación 4.1. El peso volumétrico puede utilizarse para calcular el módulo de elasticidad de las mezclas de concreto, ya que la asociación de cemento Pórtland (PCA) establece una ecuación para determinar dicha propiedad en forma empírica con base en el peso volumétrico del concreto en estado fresco.

$$W = \frac{Wm}{Vt} \quad (4.1)$$

en donde:

W Peso volumétrico $\left(\frac{k}{m^3}\right)$

Wm Peso de la muestra (kg)

Vt Volúmen del recipiente (m^3)



Figura 4. 4 Pesado del concreto para la prueba de peso volumétrico

4.4.4 Temperatura

La temperatura del concreto es importante ya que permite conocer el calor generado durante la reacción entre sus ingredientes, esta prueba se rige bajo la norma ASTM C1064/C1064M-05. Es necesario que exista una adecuada liberación de calor dentro del concreto y esperar un tiempo de fraguado de acuerdo a las condiciones climáticas donde podría encontrarse la estructura de concreto. Sin embargo, la temperatura puede llegar a ser perjudicial si se presenta una gran cantidad de calor durante su reacción (Kosmatka y col., 2004).



Figura 4. 5 Prueba de temperatura del concreto

En la Figura anterior se muestra la obtención de temperatura al momento de realizar el mezclado del concreto, la temperatura es variable de acuerdo a la cantidad de cemento en el concreto, a la adición de aditivos químicos y minerales, las condiciones climáticas entre otras. La liberación de calor dentro del concreto masivo puede llegar a temperaturas mayores a los 60°C y ocasionar micro grietas (Malhotra y Mehta, 2005). Debido a éste problema el concreto de alto desempeño busca evitar la generación excesiva de calor a través del uso de la ceniza volante. La temperatura obtenida para cada mezcla de concreto se presenta en la sección de resultados.

4.5 Pruebas en estado endurecido

Las pruebas en estado endurecido del concreto consisten en: resistencia a la compresión (f'_c), módulo de elasticidad (E), relación de Poisson (μ) y velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Las tres primeras son un indicativo de las principales propiedades mecánicas del concreto, por tal motivo es conveniente realizarlos con el fin de caracterizar de una mejor manera el material en estudio. Por ejemplo, el módulo de elasticidad es también un indicativo de las propiedades en estado fresco y endurecido, ya que puede ser calculado utilizando el peso volumétrico y la resistencia a la compresión, obtenidos con antelación.

Al comparar los valores de E y μ con los rangos propuestos en la literatura se tiene la certidumbre de que los valores de resistencia a la compresión son confiables.

4.5.1 Resistencia a la compresión del concreto

La prueba de resistencia a la compresión del concreto se llevó a cabo bajo la norma ASTM C39/C39M-04. Dicha prueba se realizó para cada una de las mezclas a los 3, 7, 14 y 28 días, esto con el propósito de analizar el desarrollo de la resistencia a diferentes edades. El tiempo de curado del concreto se hizo en todas las edades a una temperatura que oscilaba entre 16 y 20 °C; la forma de curado se llevó a cabo sumergiendo los especímenes de concreto en un recipiente de plástico saturado de hidróxido de calcio para evitar el proceso de lixiviación del hidróxido de calcio de la mezcla y garantizando un contenido de humedad del 100 %.



Figura 4. 6 Disposición del dispositivo para la prueba de resistencia a la compresión del concreto

Para la prueba de resistencia a la compresión los especímenes se colocaron cuidadosamente en la máquina de compresión, para dicha prueba se cuidó la verticalidad del espécimen de concreto y se centró adecuadamente. La velocidad de carga aplicada durante la prueba fue de 240 kg/s éste valor puede variar de acuerdo al tamaño de los especímenes como lo establece la norma correspondiente para dicha prueba. La resistencia a la compresión al igual que el módulo de elasticidad y la relación de Poisson son variables pues dependen de la cantidad de agregados, relación agua/cemento, contenido de adiciones minerales o químicos, porosidad, densidad y de la micro estructura (Malhotra, 2005).

4.5.2 Módulo de elasticidad y relación de Poisson

El módulo de elasticidad y la relación de Poisson son parámetros fundamentales para la caracterización de los materiales. Por ejemplo en análisis estructural se requieren para materializar una estructura. Sirven también para validar otras características del material en estudio, tal como la resistencia. La prueba de módulo de elasticidad y relación de Poisson están regidos por la norma internacional ASTM C 469 - 02. El módulo de elasticidad es definido como la razón entre el esfuerzo normal a una deformación correspondiente, mientras que la relación de Poisson es la relación entre las deformaciones horizontal y la vertical.

El módulo de elasticidad experimental de todas las mezclas de concreto se obtuvo con la ecuación 4.2, la cual es proporcionada por la norma anteriormente mencionada.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad (4.2)$$

en donde:

E Módulo de elasticidad (MPa)

S_2 Esfuerzo a 40% de la carga última

S_1 Esfuerzo a una deformación unitaria ε_1

0.000050 Deformación unitaria producida por S_1

ε_2 Deformación producida por S_2

Con el objeto de validar los módulos de elasticidad experimentales obtenidos se compararon éstos con los recomendados en la literatura; además, se hizo una correlación entre los resultados obtenidos de manera experimental con los resultados calculados con las ecuaciones empíricas proporcionadas por la PCA. Para calcular el módulo de elasticidad correspondiente al concreto de alto desempeño se utilizó la ecuación 4.3, la cual es recomendada por la Asociación de Cementos Pórtland (Panarese y Farny, 1994). En dicha expresión se determina el módulo de elasticidad del concreto con base en su peso volumétrico en estado fresco (W) y su resistencia a la compresión ($f'c$). Cuando el peso volumétrico del concreto en estado fresco se encuentra dentro del rango siguiente: $1500 < W < 2500 \text{ kg/m}^3$, el módulo de elasticidad se determina con la ecuación 4.3:

$$E = 0.043 \cdot W^{1.5} \cdot \sqrt{f'c} \quad (4.3)$$

en donde:

E Módulo de elasticidad (MPa)

$f'c$ Resistencia a la compresión (MPa)

W Peso volumétrico en estado fresco $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$

La expresión anterior es válida siempre y cuando el concreto tenga una resistencia a compresión $f'c < 41$ MPa. Sin embargo, cuando la resistencia es mayor o se encuentra en el rango $21 \text{ MPa} < f'c < 83 \text{ MPa}$ se utiliza la siguiente expresión:

$$E = 3320 \cdot \sqrt{f'c} + 6900 \quad (4.4)$$

Para el concreto de alta resistencia el módulo de elasticidad (E) se puede determinar según lo especifican las Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto del Distrito Federal (NTCDF) las cuales se pueden aplicar a las estructuras de concreto en el estado de Oaxaca. Desafortunadamente en el estado de Oaxaca no existen normas que especifiquen las características de los materiales a emplearse así como las limitantes a considerar, por lo tanto se adoptan las normas del D.F. Las NTCDF indican que cuando la resistencia a la compresión varía entre $40 \text{ MPa} < f'c < 70 \text{ MPa}$, el módulo de elasticidad del concreto de alta resistencia se obtiene con la siguiente expresión.

$$E = 2700 \cdot \sqrt{f'c} + 11000 \quad (4.5)$$

Sin embargo la ecuación 4.5 solamente puede ser aplicada cuando se usan agregados de tipo caliza y para concreto de alta resistencia.

Durante la prueba de módulo de elasticidad se obtuvo primeramente la resistencia a la compresión de un espécimen de concreto para determinar su carga última, al 10% de dicha carga se realizaron precargas a los otros tres especímenes para garantizar el acoplamiento de la placa de neopreno con el pistón y la base de la prensa universal a compresión. Las precargas fueron necesarias para observar el contacto de los micrómetros y medir las deformaciones correspondientes para determinar los módulos de elasticidad y las relaciones de Poisson.

La metodología para realizar la prueba de relación de Poisson se encuentran en la norma ASTM C 469 - 02, y la expresión para su cálculo es:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (4.6)$$

en donde:

- μ Relación de Poisson
- ε_{t2} Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S_2
- ε_{t1} Deformación transversal a la mitad del espécimen producida por S_1



Figura 4. 7 Módulo de elasticidad y relación de Poisson del concreto

Para la prueba de relación de Poisson también se cuidaron otros aspectos como son; el centrado de los especímenes en el anillo que soportan los micrómetros, contacto entre los micrómetros con los anillos vertical y horizontal, nivelación del anillo horizontal y precargas para el ajuste de los micrómetros. El dispositivo utilizado para las pruebas de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson fue una maquina de compresión universal, Modelo A, Serie 103AF87258, Marca ELE Internacional (Figura 4.7).

4.5.2.1 Análisis estadístico de datos

Antes de llevar a cabo el análisis estadístico de los datos se realizó una inspección visual preliminar de los datos para evaluar tendencias y eliminar datos aberrantes. Para ello se construyeron gráficas de caja para los resultados de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson. En la gráfica de caja se concentraron todo los resultados obtenidos y revelan de manera sencilla el comportamiento que adquirieron cada uno de las mezclas de concreto a través del tiempo, pero además es una técnica útil para analizar los datos por separado y realizar comparaciones entre los grupos de datos. Es una técnica útil ya que considera medianas en vez de medias para su construcción; por lo tanto, se puede evaluar de mejor manera la dispersión de los resultados.

4.5.2.2 Independencia, normalidad y homogeneidad de los datos

Los especímenes ensayados durante las pruebas fueron independientes; es decir que los cilindros de concreto se seleccionaron de manera aleatoria de un lugar almacenado con las mismas características que los demás. Por lo tanto, al efectuarse un ensaye el espécimen se destruía totalmente, posteriormente se seleccionaba otro espécimen de manera aleatoria garantizando que el resultado obtenido de un espécimen de concreto no afectara los resultados obtenidos en los otros especímenes.

Antes de realizar el análisis de varianza fue necesario verificar que los datos provinieran de una distribución normal, es decir que los datos se concentraran alrededor de la media, lo cual se verificó con la teoría de límite central, cuando dichos datos no cumplen con la normalidad es necesario transformarlos.

La prueba de homogeneidad de varianza es muy útil para corroborar que los resultados de un experimento no se encuentren muy dispersos o alejados de la

medida de tendencia central. Dicha prueba indica que para hacer un análisis de varianza es necesario que la varianza entre los grupos de datos sean similares. Esto con el fin de identificar alguna otra fuente de variación que puede enmascarar los resultados. La homogeneidad de varianza se revisó también con el SPSS ver.12®, mediante un análisis de varianza de los residuales, dicho método fue propuesto por Levene.

4.5.2.3 Análisis de varianza

La prueba de análisis de varianza permite establecer una comparación de los datos de un grupo con respecto a otro grupo, o en su caso datos del mismo grupo. El análisis de varianza es utilizado para asociar una probabilidad a conclusión de que la media de un grupo es diferente a la media de otro grupo. En esta investigación se determinó el efecto que ejercen los diferentes métodos de diseño así como las edades en la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto. La interacción tipo de concreto por edad de prueba también fue analizada.

4.6 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico se efectuó bajo la norma ASTM - C 597 – 02; además para la obtención de los valores de VPU se utilizó un dispositivo de la marca SCHAFFNER, modelo PUNDIT 6, serie 971164589. El manual del equipo establece que para equipos que operan con una frecuencia de 50 kHz no es recomendable evaluar especímenes menores a 15.0 cm y para equipos que operan con 20 kHz se debe limitar su uso a secciones mayores de 30.0 cm (Pundit, 1998). De igual manera se cuidó que la parte superficial del concreto tuviera un contacto adecuado con los transductores del dispositivo mediante el uso de un agente de acoplamiento, comúnmente denominado vaselina.

La frecuencia de vibración que tiene el dispositivo utilizado en éste trabajo fue de 50 kHz y la longitud del espécimen de concreto probado de 20.0 cm. Por lo tanto, no

hubo inconveniencia con las restricciones que establece el manual de operación. Para garantizar la confiabilidad de los resultados de acuerdo a la norma, antes del inicio de cada prueba se calibraba el dispositivo. En éste trabajo el módulo de elasticidad como la relación de Poisson fueron obtenidos en forma estática, por lo tanto la expresión que se utilizó para determinar la velocidad de pulso ultrasónico fue la proporcionada por la norma ASTM - C 597 – 02:

$$VPU = \frac{L}{T} \quad (4.7)$$

en donde:

L Longitud del elemento de concreto (0.20 m)

T Tiempo que atraviesa la señal el espécimen de concreto (s)

VPU Velocidad de pulso ultrasónico

En la Figura 4.8 se presenta de manera esquematizada el funcionamiento del equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico. El dispositivo cuenta con dos transductores, uno por donde se emite la señal de pulso ultrasónico, y el otro transductor en donde se recibe la señal; éstos a su vez están conectados al dispositivo en donde se procesa dicha señal. En una pantalla se reporta el tiempo en microsegundos (μs) en que el espécimen de concreto es atravesado por la señal.

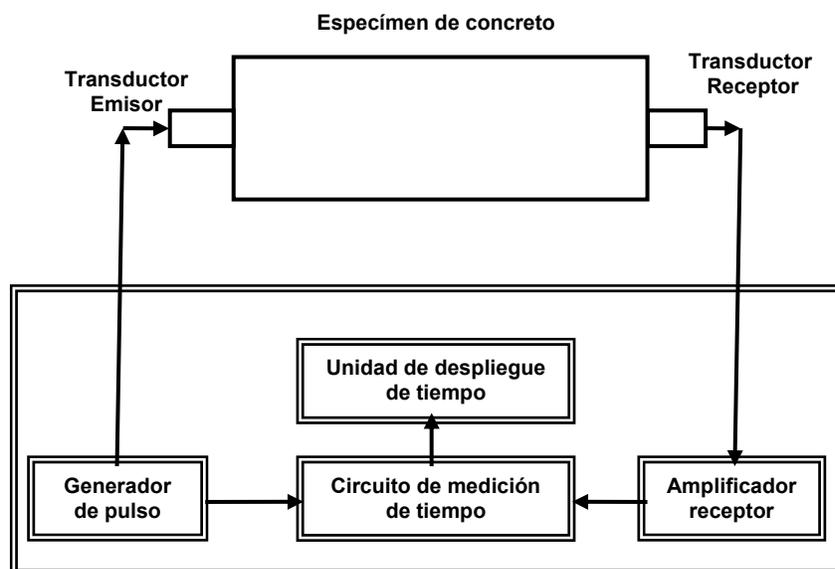


Figura 4. 8 Diagrama esquemático del dispositivo de velocidad de pulso ultrasónico



Figura 4. 9 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico

En la Figura 4.9 se observa la forma en que se realizó la prueba de velocidad de pulso ultrasónico. Para cada tipo de concreto se probaron 2 especímenes de 20.0 ± 0.1 cm. de longitud. El dispositivo utilizado emite una frecuencia de 50 kHz, y los tiempos de arribo de las ondas al otro extremo de los especímenes de concreto fueron variables, ya que los resultados dependieron de las propiedades de cada mezcla de concreto en particular.

Los resultados obtenidos de VPU obtenido a edades de 3, 7, 14 y 28 días se promediaron y se utilizaron para establecer una correlación con la resistencia a compresión media obtenida a las mismas edades. Los resultados de VPU correspondientes a la edad de 70 días se utilizaron para establecer la correlación con los coeficientes de difusión de cloruros.

4.7 Compilación de coeficientes de difusión de cloruros

Los coeficientes de difusión de cloruros se buscaron en la literatura científica especializada; para ello se seleccionaron coeficientes correspondientes a resultados obtenidos de prueba acelerada por titulación de Volhard, esta prueba está especificada en la norma Nordtest Method nt Build 443.

La duración de la prueba acelerada fue de aproximadamente 70 ± 7 días; como lo establece la norma antes mencionada; fueron 28 días de curado, aproximadamente 7 días para estabilizar el peso antes y después de aplicar la pintura epóxica y 35 días de exposición a cloruros sumaran un total de 70 días. Por lo tanto, la velocidad de pulso ultrasónico obtenida a dicha edad se promedió de cada una de las mezclas de concreto y se utilizó para establecer la correlación con los coeficientes de penetración de cloruros.

Los coeficientes de penetración de cloruros se obtuvieron de la siguiente manera: primeramente se buscaron en la literatura coeficientes de difusión correspondientes para concreto ordinario diseñados por los métodos de Duff Abrams con una relación agua/cemento de 0.55 y para concreto diseñado por el método de ACI con una relación agua/cemento de 0.40. De la misma manera se obtuvieron los coeficientes de difusión correspondientes para el concreto de alto desempeño con una relación agua/cemento de 0.41 con niveles de sustitución de ceniza volante en 0, 20 y 40 %. En la literatura existe mucha información referente a coeficiente de difusión para el concreto de alto desempeño, debido a que en la actualidad la caracterización del concreto HPC está siendo una prioridad ya que permite buscar e incorporar nuevos materiales para su diseño y elaboración.

Una vez que se obtuvieron los coeficientes de penetración de cloruros se promediaron los resultados y se correlacionaron con los promedios de resultados de velocidad de pulso ultrasónico correspondiente para cada tipo de concreto; además, con la ayuda de un programa *Tablecurve 2D v5*® se realizó un ajuste de curvas y se determinó una ecuación de correlación que mejor representaba el comportamiento de dicho fenómeno. Con dicha ecuación se propuso estimar el coeficiente de penetración de cloruros con base en los resultados de velocidad de pulso ultrasónico.

CAPÍTULO 5

Capítulo 5 Resultados

En este capítulo se analizan los resultados de pruebas en estado fresco y endurecido; posteriormente, se hace la validación de los resultados de velocidad de pulso ultrasónico utilizando los resultados de resistencia a la compresión; finalmente, se establece la correlación entre los valores de VPU y de coeficientes de penetración de cloruros. Esta última, si es alta, permite estimar el coeficiente de penetración de cloruros de concreto con base en las lecturas de velocidad de pulso ultrasónico.

5.1 Comparación de resultados preliminares con las Normas de Construcción

Para la mezcla diseñada por el método de ABR con una relación agua/cemento de 0.55 no se encontraron problemas durante la etapa de mezclado, colocación y transporte del concreto. El revenimiento fue de 75 mm. el contenido de aire menor a 2 % y la resistencia obtenida a la edad de 28 días menor a 70 MPa.; dichos resultados permitieron avanzar y elaborar las mezclas definitivas que se estudiaron en éste trabajo. De igual manera para el concreto diseñado por el método de ACI con una relación agua/cemento de 0.41 los resultados obtenidos en estado fresco y endurecido fueron adecuados y permitieron proseguir con el experimento. Sin embargo, para la mezcla de concreto diseñada por el método de HPC y con una relación agua/cemento de 0.37 el revenimiento obtenido fue de 30 mm y la resistencia a compresión a la edad de 28 días fue de 75 MPa; siendo esta última mayor a la especificada por las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal para el diseño y construcción de estructuras de concreto en zonas sísmicas. Por lo tanto, se procedió a rediseñar el concreto HPC modificando la relación agua/cemento de 0.37 a 0.41, buscando con dicha modificación un concreto trabajable y con una resistencia menor a la recomendada por dichas normas.

5.2 Resultados de dosificación de materiales

Los resultados mostrados en la Tabla 5.1 indican que el consumo de cemento Pórtland en el concreto ACI es mayor con respecto a las demás mezclas; la diferencia en consumo es de aproximadamente de 70 kg con respecto al concreto HPC para elaborar un 1m^3 de concreto. Sin embargo, cuando se incorpora la ceniza volante en el concreto HPC en diferentes niveles el ahorro de consumo de cemento Pórtland puede llegar hasta 250 kilogramos en 1m^3 de concreto.

El concreto que consume mayor cantidad de agua es ACI, en segundo término se ubica la mezcla HPC y finalmente la mezcla que necesita una cantidad menor para producir 1m^3 de concreto es la mezcla ABR. La diferencia que existe en cuanto a consumo de agua para ACI y ABR es de aproximadamente 20 lt/m^3 de concreto. El consumo de agregados es mayor en ABR, después ACI y el concreto que consume menor cantidad de agregados es HPC. El consumo de superplastificante es mayor en ACI comparado con HPC; No obstante el consumo de superplastificante disminuye relativamente a medida que se incrementa el nivel ceniza volante en la mezcla de concreto.

Tabla 5. 1 Resumen de materiales para elaborar 1m^3 de concreto utilizando tres métodos de diseño

Método	Relación A/C	Cemento (kg)	Agua (kg)	Grava (kg)	Arena (kg)	Ceniza volante (kg)	Super-Plastificante Plastol-4000 (lt)
ABR	0.55	352	194	1014	774	0	0
ACI	0.40	505	214	929	713	0	1.52
HPC	0.41	435	205	996	674	0	0.87
HPC20	0.41	348	205	996	674	78	0.69
HPC40	0.41	261	205	996	674	156	0.52

5.3 Propiedades del concreto en estado fresco

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en estado fresco para las cinco mezclas de concreto se reportan en la Tabla 5.2. En estado fresco fue necesario realizar las pruebas de revenimiento, contenido de aire, temperatura y peso volumétrico con la finalidad de evaluar posibles interacciones negativas que pudieran presentarse entre los componentes del concreto y afectar la trabajabilidad de cada una de las mezclas.

A pesar de que la mezcla de concreto diseñada por el método de Abrams tenía una relación agua/cemento alta, las mezclas ACI y HPC tuvieron un revenimiento mayor debido al uso de superplastificantes. Los resultados también muestran el efecto de la ceniza volante ya que los revenimientos se incrementaron a medida que se incrementaba también el nivel de sustitución de dicho material.

El contenido de aire atrapado en las mezclas de concreto fueron menores al 2 %. Además, el peso volumétrico del concreto disminuyó a medida que el contenido de aire disminuía. El concreto HPC obtuvo el mayor peso volumétrico comparado con las demás mezclas; no obstante, el peso volumétrico del concreto fue disminuyendo con el incremento de las cenizas volantes, dicho cambio se debió principalmente a que la densidad de la ceniza volante es menor que la del cemento Pórtland.

Tabla 5. 2 Resultados en estado fresco del concreto

Tipo de mezcla	Revenimiento (mm)	Temperatura °C	Peso volumétrico (kg/m³)	Contenido de aire (%)
ABR	75	23.0	2335	1.7
ACI	90	24.0	2393	1.9
HPC	100	24.5	2443	1.8
HPC20	104	24.5	2348	1.6
HPC40	112	24.0	2333	1.4

Las temperaturas obtenidas para todas las mezclas de concreto al momento del mezclado fueron similares debido a que la elaboración del concreto se llevó a cabo al aire libre, por lo que las condiciones ambientales influyeron en los resultados.

5.4 Propiedades del concreto en estado endurecido

Los resultados obtenidos en estado endurecido a diferentes edades para todas las mezclas de concreto se presentan en seguida.

5.4.1 Resistencia a la compresión del concreto

En la tabla 5.3 se muestran las medias y desviaciones estándar de las resistencias a la compresión de los concretos analizados a diferentes edades. Los resultados indican que para edades tempranas (menos de siete días), los concretos que no contenían cenizas volantes tuvieron un incremento en resistencia mayor a los que sí las contenían. Sin embargo, a edades posteriores, ocurrió lo opuesto. Se observa también que en general los concretos con resistencias altas tuvieron mayores desviaciones que los concretos con resistencias bajas. Esto es obvio, debido a que en un concreto con resistencia elevada, factores como sanidad de los agregados puede influir en los resultados.

El incremento de resistencia a la compresión a edades tempranas fue mayor en ABR y ACI, para el concreto con ceniza volante (CV) sucedió lo opuesto. Sin embargo, a edades mayores la resistencia para el concreto con CV se incrementó y a edades entre 14 y 28 días la ganancia de resistencia fue similar en todas las mezclas de concreto. La diferencia de resistencia entre ACI y HPC a una edad de tres días fue de 40 MPa, a edad de siete días la diferencia disminuyó a 30 MPa; sin embargo a edades posteriores la diferencia se incrementó a 50 MPa, esto debido a la alta cantidad de cemento que contenía el concreto ACI.

La desviación estándar para la resistencia a la compresión del concreto recomendada en la literatura es de 2.33 MPa (Kosmatka, 2004) para un concreto

elaborado con el método de ACI y con $f'c > 35.0$ MPa. Al comparar con dicho valor la desviación correspondiente para el concreto ACI se observó que fue ligeramente mayor 2.70 (Tabla 5.3), esto pudo ser probablemente debido al número pequeño de especímenes ensayados.

Tabla 5. 3 Resultados de resistencia a la compresión a diferentes edades

Tipo de mezcla	Rel A/C	Edades (días) y $f'c$ (MPa)			
		3 d	7 d	14 d	28 d
ABRAMS	0.55	13±0.6	18±1.0	24±0.5	28±1.4
ACI	0.40	28±1.2	36±2.0	42±3.4	46±2.7
HPC	0.41	24±1.1	33±1.0	37±1.6	41±1.0
HPC20	0.41	21±1.8	27±1.8	33±0.9	37±0.9
HPC40	0.41	12±0.7	19±0.5	24±1.1	29±2.5

La resistencia a la compresión para el concreto HPC40 fue aproximadamente un 50 % menor con respecto al concreto HPC a una edad de 3 días. Sin embargo, dicha diferencia disminuyó con respecto al tiempo ya que a una edad de 28 días la diferencia de resistencia fue aproximadamente del 30 %.

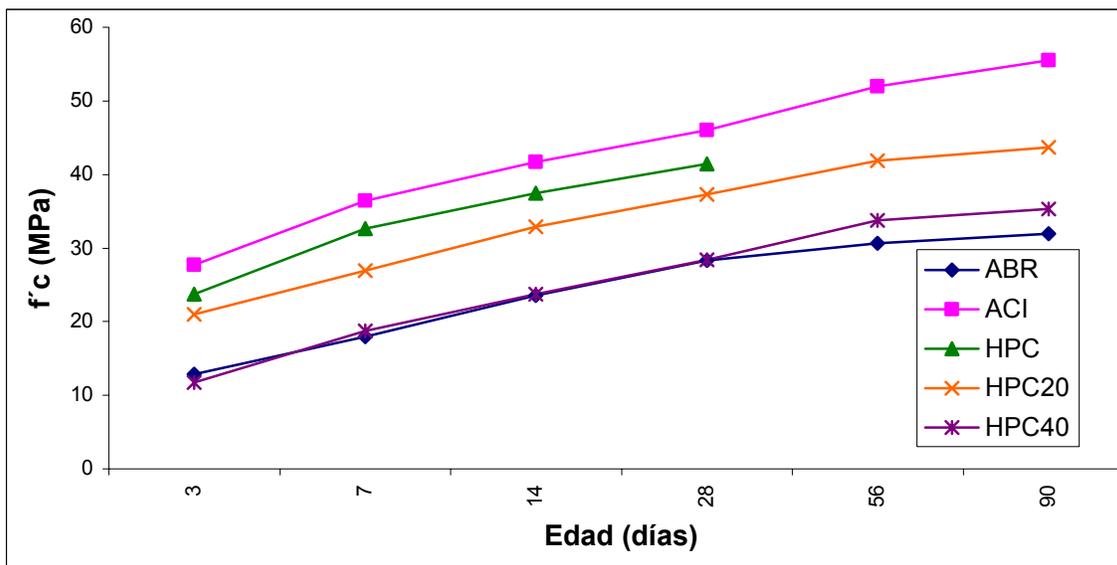


Figura 5. 1 Desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto a diferentes edades

La figura 5.1 indica que la pendiente de las curvas de ABR y HPC40 fueron similares hasta la edad de 28 días; sin embargo, dicha pendiente cambió a edades mayores, éste cambio de pendiente se le atribuye al beneficio que aporta la ceniza volante sobre el mejoramiento de la matriz del concreto a edades tardías (Malhotra, 2005).

5.4.1.1 Análisis gráfico de resultados

Otra manera de analizar los resultados de resistencia a la compresión es mediante gráficas de caja, en donde se utilizó la mediana para evaluar la variabilidad. Por lo tanto, dichas medidas de tendencia central no fueron afectadas por los valores extremos. En la Figura 5.2 los resultados indican que el concreto ACI y HPC mostraron un incremento alto de resistencia a edades tempranas, lo cual corrobora lo observado en la sección anterior.

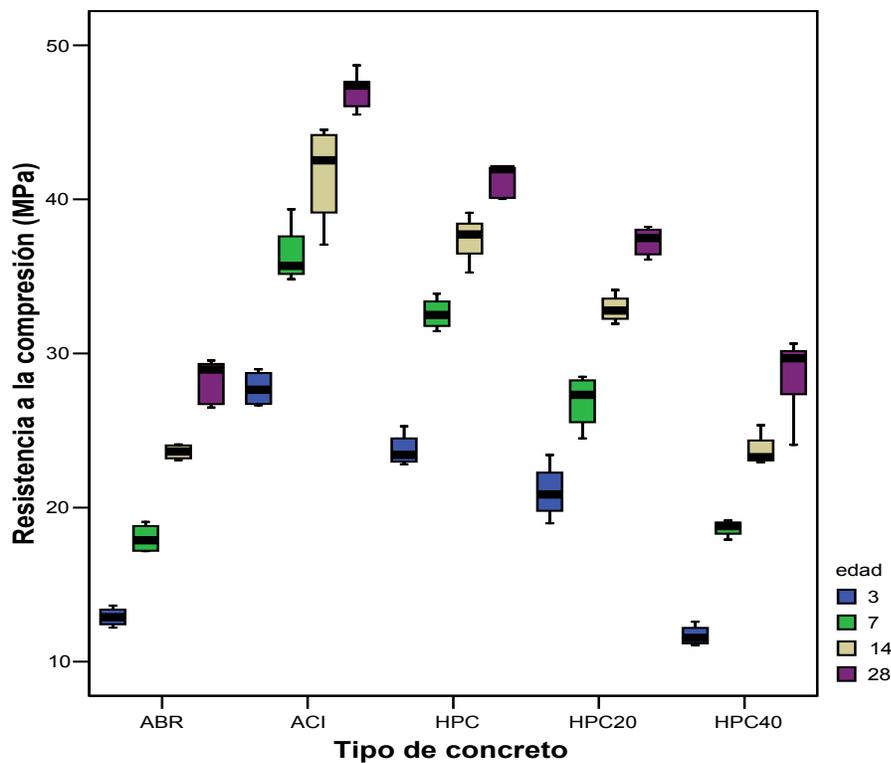


Figura 5. 2 Gráficas de caja para resultados de resistencia a la compresión de concreto a diferentes edades

5.4.1.2 Análisis estadístico de varianza de los resultados de resistencia a la compresión

Para llevar a cabo el análisis de varianza (ANOVA) de los resultados de resistencia a la compresión se revisó que cumplieran con los requisitos de independencia, normalidad, y homogeneidad de varianza (Hines y col., 2005). Los datos cumplieron con dichos requisitos, ya que al graficar la probabilidad observada con la esperada para una distribución normal, los puntos se agruparon cerca de la línea de tendencia central (Figura 5.3). Así mismo se comprobó utilizando el método de Levene para un nivel de significancia de 0.05 que los cinco grupos analizados cumplen con el requisito de homogeneidad de varianzas (Tabla 5.4). Con base en lo anterior se procedió a realizar el ANOVA.

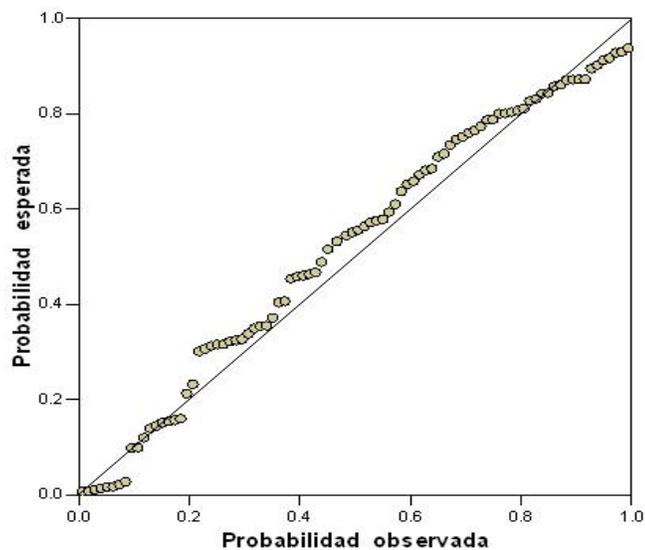


Figura 5. 3 Gráfica de normalidad de los datos de resistencia a la compresión del concreto

Tabla 5. 4 Prueba de Levene de homogeneidad de varianza

F	Grados de libertad	Grados de libertad	Sig.
1.323	19	70	0.198

Los resultados del análisis de varianza (Tabla 5.5) indican que la resistencia es influenciada de manera significativa por el tipo de mezcla y por la edad de prueba. Esto era de esperarse, ya que los cambios en la matriz de concreto están íntimamente ligados a los ingredientes en la mezcla y al proceso de hidratación. Además, los resultados sugieren que la ganancia en resistencia con la edad no sigue el mismo patrón de comportamiento para todas las mezclas, lo cual se discutirá en detalle y con la ayuda de resultados de velocidad de pulso ultrasónico más adelante. Los resultados del ANOVA son confiables ya que sugieren que la probabilidad de aceptar una diferencia significativa cuando no la hay es muy baja.

Tabla 5. 5 Análisis de varianza de resistencia a compresión del concreto

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrada	F	Sig.	Potencia observada
t.mezcla	1.141	4	0.285	525.323	2.17×10^{-51}	1
edad	1.073	3	0.358	658.705	3.29×10^{-51}	1
t.mezcla * edad	0.059	12	0.005	8.989	3.96×10^{-10}	1
Error	0.038	70	0.001			
Total	189.339	90				
Corrección total	2.280	89				

5.4.2 Análisis de resultados de módulos de elasticidad

Los resultados de módulos de elasticidad (E) obtenidos experimentalmente se encuentran reportados en el Anexo (Tablas B.3 y B.4). Dichos valores fueron apropiados ya que oscilan en el rango de valores que establece la literatura, esto es 14, 000 a 41, 000 MPa (Kosmatka y col., 2004).

Los valores de los concretos ACI y HPC fueron considerablemente más altos que aquellos para concretos ABR, HPC20 y HPC40. La Figura 5.4 confirma una gran variabilidad de los resultados obtenidos con respecto a sus medianas. Para el

concreto ACI, a una edad de 14 días, se obtuvo una mayor dispersión en los resultados; así mismo, el incremento del módulo de elasticidad fue mayor de 3 a 7 días. Por otra parte, los resultados de concretos de alto desempeño (HPC, HPC20 y HPC40), mostraron en todas las diferentes edades menos dispersión que los anteriores; esto se debió a que el concreto HPC maneja una relación más definida de sus componentes.

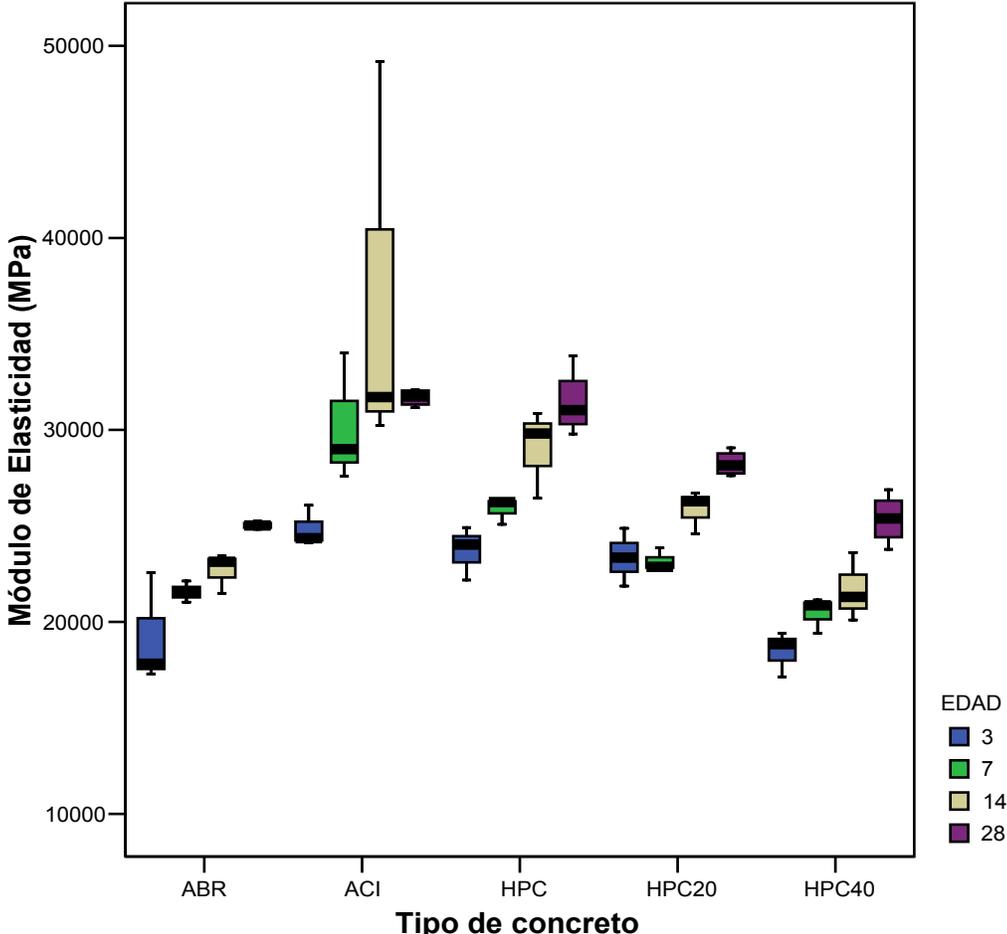


Figura 5. 4 Gráfica de caja para el módulo de elasticidad

5.4.3 Correlación entre módulo de elasticidad experimental y módulo de elasticidad empírico

Los resultados de módulos de elasticidad obtenidos experimentalmente y calculados con las expresiones proporcionadas por la PCA (Asociación Americana de Cemento Pórtland) y las NTCDF para los 28 días se resumen en el Anexo (Tabla B.5). Las ecuaciones mencionadas implican utilizar el peso volumétrico que tiene el concreto en estado fresco para resistencias menores a 41 MPa y el uso de la resistencia a la compresión cuando el concreto tiene una resistencia entre $21 \text{ MPa} < f'c < 83 \text{ MPa}$.

En la Figura 5.5 se analiza la correlación entre los módulos de elasticidad experimentales y los calculados con las ecuaciones proporcionadas por la PCA para las cinco mezclas de concreto en estudio. Se obtuvo un coeficiente de determinación alto ($R^2 = 0.88$), aunque se observa que el módulo experimental fue ligeramente superior con respecto a los resultados obtenidos con las ecuaciones empíricas, se concluye que la resistencia a la compresión es adecuada para calcular el módulo de elasticidad del concreto.

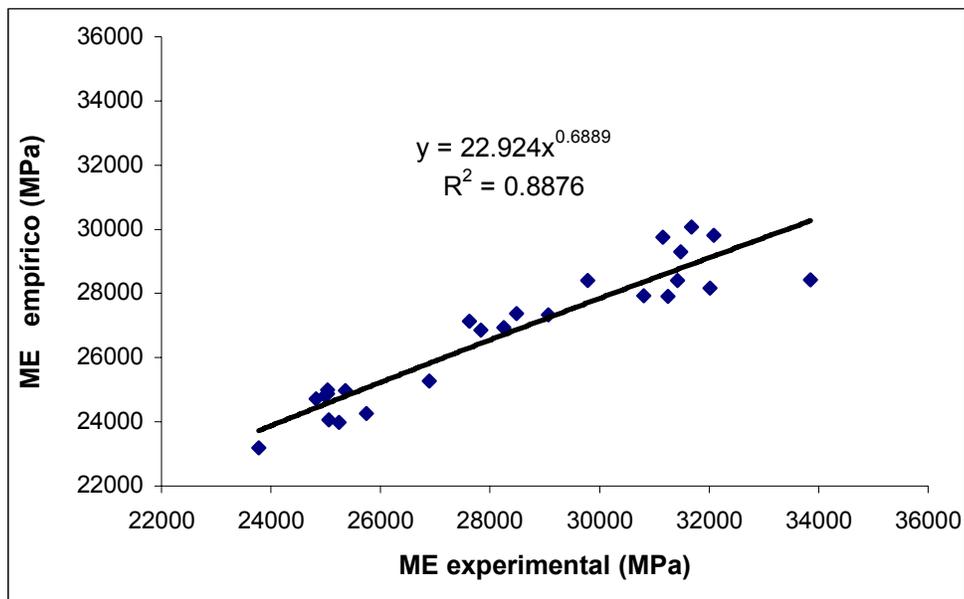


Figura 5. 5 Correlación de Módulo de elasticidad experimental con módulo de elasticidad empírico

5.4.4 Análisis resultados de las relaciones de Poisson

Los resultados obtenidos de relación de Poisson se encuentran resumidos en el Anexo (Tablas B.3 y B.4). Los resultados indican que la relación de Poisson es mayor para las mezclas de concreto ACI y HPC. Para las mezclas HPC20 y HPC40 la relación es baja en todas las edades y no presenta un incremento significativo hasta la edad de 28 días. Por lo general, a esa edad, las relaciones de Poisson correspondientes a las mezclas de concreto que contenían cenizas volantes fueron menores con respecto a las mezclas que no contenían dicho material.

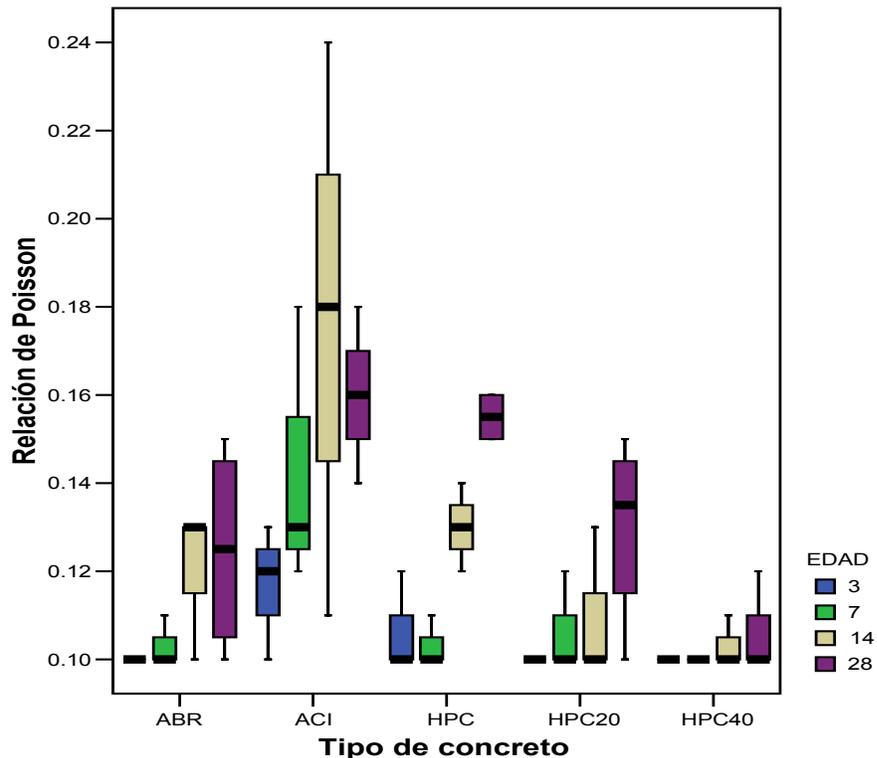


Figura 5. 6 Gráfica de caja para la relación de Poisson

Los coeficientes de relación de Poisson obtenidos de manera experimental fueron ligeramente menores en las mezclas de concreto con ceniza volante. Sin embargo, los concretos que no contenían dicho material y a edades de 7,14 y 28 días arrojaron resultados dentro del rango establecido por Kosmatka (0.12 a 0.24).

5.5 Velocidad de Pulso Ultrasónico

Los resultados de VPU se presentan en la Figura 5.7. Se observa que para los concretos elaborados con los métodos de diseño ACI y HPC, los valores de VPU son más altos que aquellos para ABR, HPC20 y HPC40. También se observa un incremento importante de los valores de VPU en los primeros siete días. El registro de velocidad de pulso ultrasónico a diferentes edades se encuentra resumido en el Anexo (Tabla B.6). A edades mayores a siete días, la pendiente de la curva disminuye hasta aproximadamente los 28 días. Posteriormente, la pendiente de la curva se estabiliza indicando que el incremento de la velocidad de pulso ultrasónico para las mezclas de concreto ya no es significativo. En el rango entre 28 y 45 días, se observa un incremento en las lecturas para los concretos ACI y ABR. Desafortunadamente, en el diseño del experimento no se consideraba evaluar la resistencia durante dicho periodo.

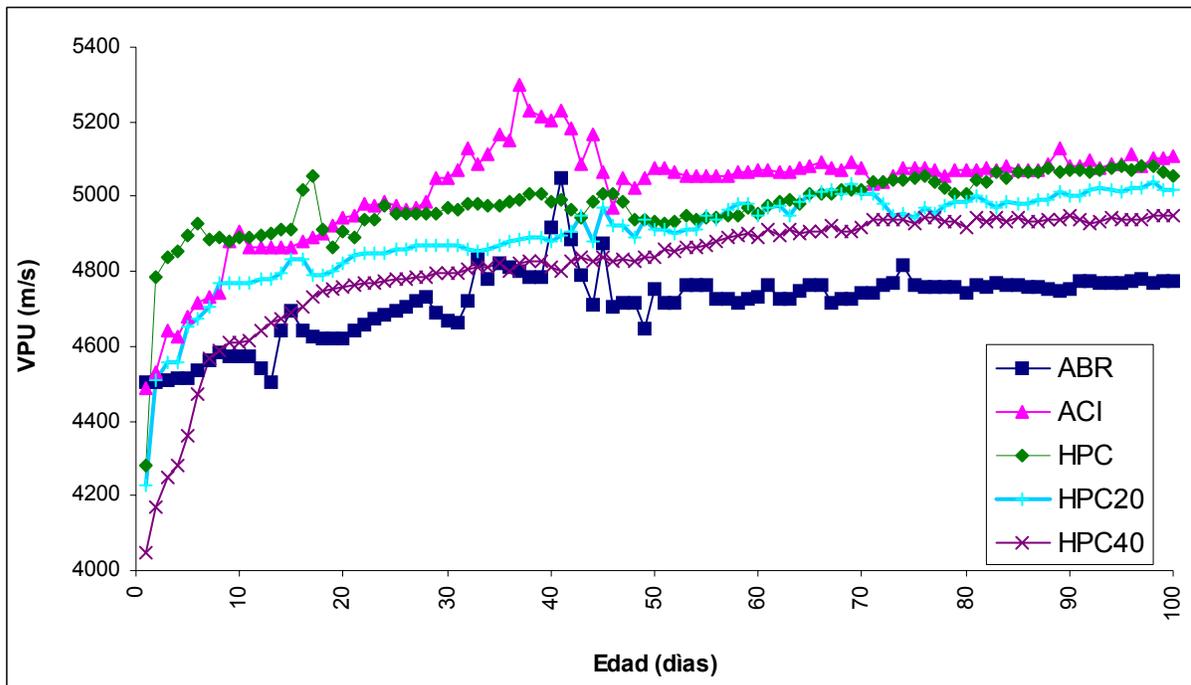


Figura 5. 7 Registro de velocidades de pulso ultrasónico para todas las mezclas de concreto

5.6 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión

En la figura 5.8 se grafican los resultados de velocidad de pulso ultrasónico versus las medias de las resistencias a la compresión. Se obtuvo un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.84$) lo que confirma que es posible estimar la resistencia a la compresión del concreto a varias edades mediante el uso de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico, como se ha reportado en la literatura (Neville 1995). Para tal efecto se puede utilizar la expresión 5.1.

$$f'c = 0.0029e^{0.0019 \cdot VPU} \quad (MPa) \quad (5.1)$$

Un análisis detallado de los resultados de VPU indica que su relación con la resistencia parece ser no lineal para todos los casos.

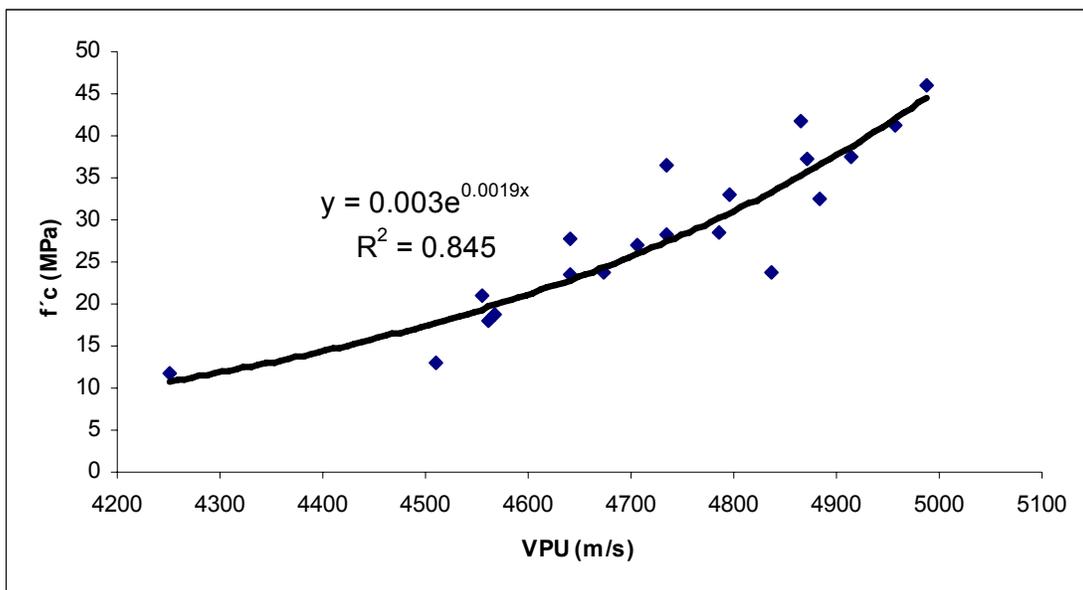


Figura 5. 8 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión para diferentes edades y tipos de concreto

Para analizar con mayor detalle este hecho, se establecieron las correlaciones de manera independiente para cada una de las mezclas. En la figura 5.9 se observa que en el caso de las mezclas ABR y ACI la curva que mejor se ajusta es una línea recta. Sin embargo, para las mezclas HPC, HPC20 y HPC40, la ganancia de resistencia con la edad es representada de mejor manera por un comportamiento exponencial.

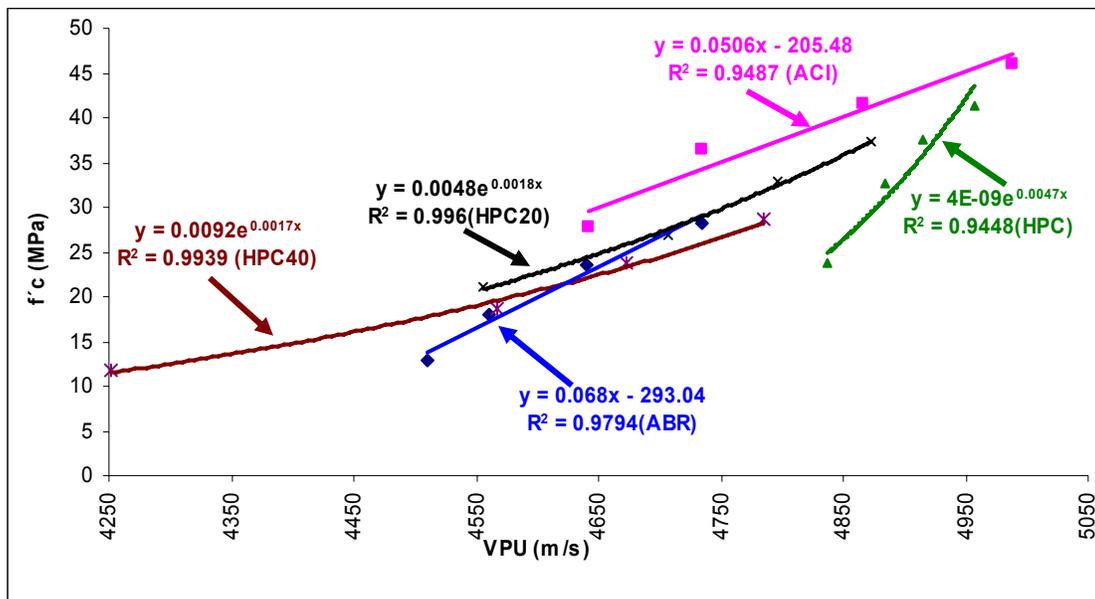


Figura 5. 9 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a compresión por mezcla

5.7 Coeficientes de difusión de cloruros

Los resultados obtenidos de la literatura se resumen en la Tabla 5.6; dichos resultados indican que el coeficiente de penetración de cloruros es alto para un concreto con una relación agua cemento alta (0.55); y cuando se disminuye la relación agua/cemento el coeficiente también disminuye considerablemente.

Los resultados mostrados a continuación indican que el coeficiente de penetración de cloruros se incrementa conforme se incrementa el contenido de ceniza volante en el concreto; sin embargo, no existe mucha variación de los resultados de

penetración de cloruros y parecen ser más uniformes en mezclas de concreto elaboradas con el método de HPC y con cenizas volantes, que en mezclas de concreto diseñada por el método de ABR. Así mismo, se observa que cuando las mezclas se diseñan con criterios de durabilidad (HPC y ACI) y con relaciones agua/cemento bajas no existe mucha variación entre los coeficientes de penetración de cloruros.

Tabla 5. 6 Resumen de coeficiente de penetración de cloruros De (m^2/s)

ABR A/C = 0.55	HPC40 A/C = 0.41	HPC20 A/C = 0.41	HPC A/C = 0.41	ACI A/C = 0.40
4.00×10^{-11}	7.10×10^{-12}	6.40×10^{-12}	2.00×10^{-12}	1.72×10^{-12}
4.80×10^{-11}	9.60×10^{-12}	3.50×10^{-12}	4.40×10^{-12}	1.52×10^{-12}
5.10×10^{-11}	8.10×10^{-12}	4.50×10^{-12}	5.40×10^{-12}	1.78×10^{-12}
2.87×10^{-11}	8.30×10^{-12}	3.40×10^{-12}	2.80×10^{-12}	2.80×10^{-12}
3.15×10^{-11}	7.10×10^{-12}	4.80×10^{-12}	5.00×10^{-12}	1.00×10^{-12}
2.17×10^{-11}	7.10×10^{-12}	4.00×10^{-12}	2.80×10^{-12}	2.80×10^{-12}
3.50×10^{-11}		4.13×10^{-12}	2.00×10^{-12}	1.10×10^{-12}
		4.40×10^{-12}	1.60×10^{-12}	2.00×10^{-12}
		4.30×10^{-12}		1.60×10^{-12}
		3.49×10^{-12}		1.73×10^{-12}
		3.61×10^{-12}		1.86×10^{-12}

En la tabla anterior las mezclas de concreto se ordenaron con base en el coeficiente de penetración de cloruros; dichos valores fueron superiores en el concreto ABR que en el concreto HPC40 y HPC20. Sin embargo, la velocidad de pulso ultrasónico a la edad de 70 días fue menor en el concreto ABR comparada con las velocidades determinadas en las demás mezclas de concreto como se puede observar en el Anexo (Tabla B.6).

Los resultados resumidos en la Tabla 5.6 indican que efectivamente existe una relación directa entre la velocidad de pulso ultrasónico, relación agua/cemento y coeficiente de penetración de cloruros, ya que para el concreto ABR con una relación agua/cemento de 0.55, la velocidad de pulso ultrasónico es baja con respecto a la velocidad de pulso que se presenta en el concreto HPC y con una relación agua/cemento baja (0.41). Además, el coeficiente de penetración de cloruros para el concreto ABR es mayor con respecto al coeficiente de difusión de cloruros correspondiente para la mezcla de concreto HPC y ACI. Por lo tanto, el concreto que no considera criterios de durabilidad en su diseño tiene un coeficiente de penetración de cloruros más alto.

El coeficiente de penetración de cloruros tiene mayor variación en un concreto con una relación agua/cemento alta ($A/C > 0.50$). Además, el contenido de cemento en una relación agua/cemento alta posee mayor efecto en las propiedades de durabilidad, ya que un incremento de $\pm 5\%$ de contenido de cemento puede afectar significativamente las propiedades del concreto. En cambio para una relación agua/cemento baja se puede variar hasta un $\pm 10\%$ el contenido de cemento sin que el coeficiente de penetración de cloruros presente cambios importantes.

5.8 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y coeficiente de difusión de cloruros

Los resultados de VPU y D_e se correlacionaron como se muestra en la Figura 5.10. El resultado obtenido indica que existe una correlación elevada entre las dos variables estudiadas. Así mismo para determinar la ecuación que representó mejor al fenómeno de la difusión de penetración de cloruros se optó por utilizar el programa gráfico *TableCurve 2D v5.0*®, ya que lo respaldan más de 3600 modelos lineales y no lineales de todas las disciplinas que permiten extrapolar una serie de datos con mayor precisión. Además, la curva que se obtiene con dicha expresión se aproxima a

la forma de la curva que se reportan en las normas ASTM C 1556-04 y NTBUILD 445.

En la Figura 5.10 se muestran tres curvas a, b y c. Para la curva (a) se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.88$, dicha curva representa todos los datos reportados en este trabajo; además, permite hacer variaciones de contenido de cemento Pórtland de aproximadamente ± 100 kg de cemento por 1m^3 de concreto. Para la curva (b) se obtuvo un coeficiente de correlación alta $R^2 = 0.93$. Sin embargo, representa a mezclas de concreto que tienen una variación de aproximadamente ± 50 kg de cemento por 1m^3 de concreto. Finalmente la curva (c) representa a mezclas de concreto que tienen variaciones de ± 20 kg de cemento por 1m^3 de concreto. Debido al rango de variación que permite la curva (a) se adoptó dicha ecuación de correlación para estimar el coeficiente de penetración de cloruros.

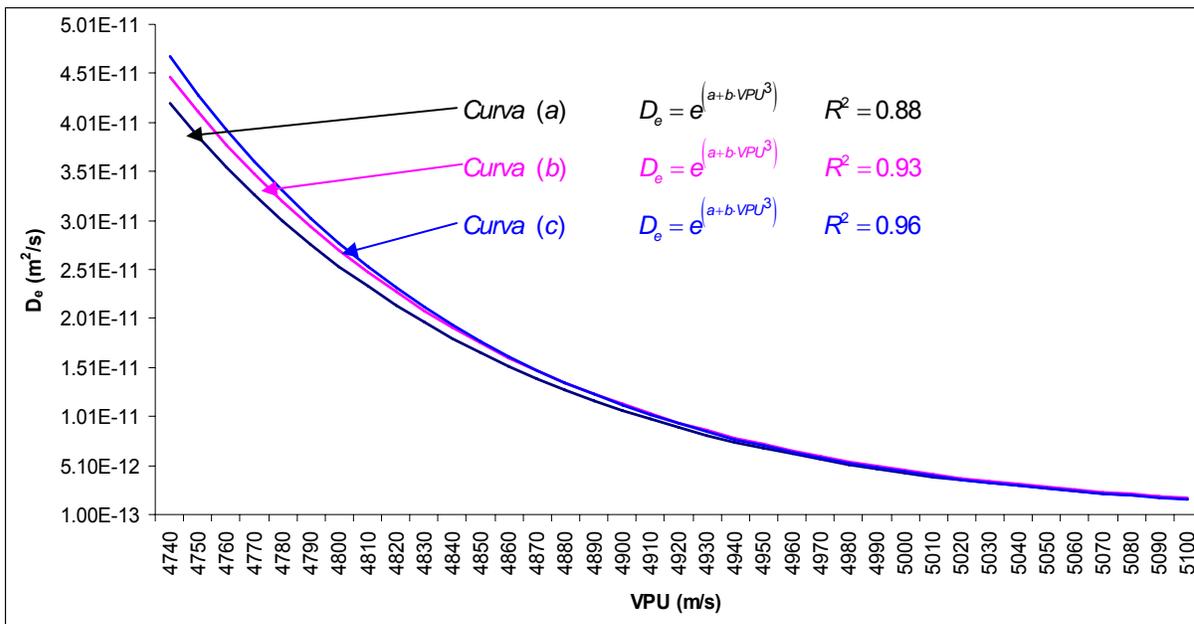


Figura 5. 10 Correlación entre velocidad de pulso ultrasónico y coeficiente de penetración de cloruros

El resultado obtenido indica que es posible estimar el coeficiente de penetración de cloruros con base en la velocidad de pulso ultrasónico. Además, el coeficiente de

penetración de cloruros es de un orden de 3×10^{-11} m²/s cuando la velocidad de pulso ultrasónico es de aproximadamente 4750 m/s; sin embargo, cuando la VPU se incrementa de aproximadamente 5000 m/s, el coeficiente de difusión de cloruros disminuye cambiando aproximadamente a 1×10^{-12} m²/s. La ecuación de correlación obtenida y correspondiente a la curva (a) fue la siguiente:

$$D_e = e^{(a+b \cdot VPU^3)} \quad (5.2)$$

en donde

$$D_e \quad \text{Coeficiente de difusión de cloruros} \left(\frac{m^2}{s} \right)$$

$$a = -10.85$$

$$b = -1.22 \times 10^{-10}$$

$$VPU \quad \text{Velocidad de pulso ultrasónico} \left(\frac{m}{s} \right)$$

Sustituyendo los valores de las constantes a y b, en la ecuación 5.2, se obtiene una ecuación que sirve para estimar el coeficiente de penetración de cloruros del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico (Ec. 5.3).

$$D_e = e^{(-10.85 - 1.22 \times 10^{-10} \cdot VPU^3)} \left(\frac{m^2}{s} \right) \quad (5.3)$$

5.9 Discusión

En estado fresco no se observaron efectos negativos que afectaran la trabajabilidad del concreto, ya que los valores de revenimiento estuvieron dentro del rango 75 y 112 mm, y los contenidos de aire atrapado mostraron buena correspondencia con los pesos volumétricos experimentales.

En lo referente a la resistencia a la compresión, se puede decir que, en general, cuando se incrementaba la resistencia de diseño, se incrementaba también la variabilidad de los resultados para cada mezcla, y que, a pesar de esto, la estimación del módulo de elasticidad a diferentes edades puede llevarse a cabo de manera confiable utilizando tal resistencia.

Otro aspecto importante a resaltar del presente trabajo fue la alta correlación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico, la cual sirvió para validar esta última. El análisis de esta relación también fue útil para establecer que el desarrollo de resistencia a diferentes edades para las mezclas diseñadas con los métodos ABR y ACI se ajustaban mejor a una recta, y que las diseñadas con el método HPC se ajustaban mejor a una curva.

La inclusión de cenizas volantes contribuyó a aumentar el valor del coeficiente de penetración de cloruros (D_e) a edades tempranas, el cual es un indicativo de la permeabilidad del concreto (Malhotra y Ramezani pour, 1994, Martínez, 2006). Dichos resultados validaron los valores de D_e utilizados en el presente estudio.

A pesar de haber obtenido una correlación muy alta entre la velocidad de pulso ultrasónico y los coeficientes de penetración de cloruros para las mezclas evaluadas, se debe tener en cuenta que solamente se consideraron cinco puntos. Además, es necesario corroborar dichos coeficientes mediante experimentos. Investigaciones futuras servirán para validar la correlación establecida.

La utilización de un método no destructivo tal como la VPU puede ser útil para estimar en obra la resistencia a la compresión y el coeficiente de penetración de cloruros. Ya que en un futuro cercano la resistencia dejará de ser el parámetro para estimar la calidad del concreto enfocándose en su durabilidad, la cual dependerá de que tan impermeable sea el concreto al ingreso de agentes agresivos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

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

- Existe una interacción importante entre el tipo de concreto y la edad en que éste adquiere resistencia; el desarrollo de la resistencia para concreto diseñado con los métodos de ABR y ACI pueden representarse por medio de una relación lineal, mientras que para concretos HPC con y sin ceniza volante la relación es exponencial.
- La ecuación de correlación obtenida en este estudio permite estimar los coeficientes de penetración de cloruros con base en la velocidad de pulso ultrasónico.

Recomendaciones

Al término del presente trabajo se recomienda lo siguiente:

Es necesario determinar los coeficientes de penetración de cloruros para las mezclas estudiadas y así validar la ecuación de correlación propuesta. Cabe mencionar que debido a la gran variabilidad de resultados obtenidos de la literatura, se deben utilizar para la determinación de contenidos de cloruros al menos dos métodos, por ejemplo: titulación de Volhard e ion selectivo. Sin embargo, esto es motivo de otra tesis.

Así mismo, se recomienda validar la ecuación de correlación para otros tipos de concreto; por ejemplo, que contengan diferentes tipos de adiciones minerales, edades de curado, tipo de agregados, cantidad de cemento y diferentes relaciones agua/cemento.

Bibliografía

Aquino, B, E. (2004). Diagnóstico de la interacción entre la corrosión y el Daño sísmico en las estructuras de concreto reforzado localizadas en la costa Oaxaqueña. Tesis de maestría. pp 132.

Ahmad, S.H., Shah, S.P. (1985). Structural properties of high Strength concrete and its implication for precast prestressed concrete. PCI. Journal, Vol. 30. pp 91-119.

Aitcin P.C. (2003). The durability Characteristics of high Performance Concrete. Faculty of Engineering Department of civil Engineering. Québec. Canada. pp 409 -420

Aitcin, P.C. (1998). High-Performance Concrete. Universite de Cherbrooke, Quebec Canada. Ed. E &TN SPON. HAND BOOK.

Aitcin, P.C. (2000). Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow.Canada. Universite de Sherbrooke, QC. pp 1349-1359

Ali, M. M. (2001). Evolution of concrete Skyscraper: form Ingalls to jin mao. Electronic Journal of Structural Engineering Vol.1 No. 1 pp 2-14

Barkhatov, V.A. (2002). Development of methods of Ultrasonic Nondestructive Testing of Welded Joints. Institute on Metal Physics. Ural Division, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. pp 23-47.

Baumeister, T., Eugene, A. (1984). Manual del Ingeniero Mecánico. Méx D.F.Mc. Grauw-Hill. pp 30-50

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. Magnel Laboratory for Concrete Research, Department. of Structural Engineering, Ghent University. Belgium. pp 2087-2094

Bhanja, B., Sengupta, B. (2004). Influence of silica fume on the tensile strength of concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 35, pp743-747.

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

Bryant Mather y Celik Ozyildirin. (2004). IMCYC. Cartilla del Concreto, Méx., D.F.

Bharatcumar, B. H., Narayanan, R., Raghuprasad, B. K., Ramachandramurthy, D.S. (2001). Mix proportioning of high performance concrete. Structural Engineering, Taramani. India. pp 71-80

Chambers A. (2000). Innovation Takes coal Combustion Byproducts from liability to asset. Power Engennering. Revista técnica. USA.

Carrión, F. J. V., Hernández, R.J., y Esqueda, M. A. (1999). Estudios de corrosión en puentes de concreto Pre-esforzado. Publicación técnica. Instituto Mexicano del Transporte. Queretaro, Méx. 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 P. B., Sanjuán, M. M. (2001). Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C IMCYC. pp 50.

Castro, B. P. (2000). Infraestructura de Concreto Armado: Deterioro y Opciones de Reparación. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C IMCYC. pp 193.

Castro B. P. (2001). Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, inspección. Diagnóstico, vida útil y reparaciones. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. imcyc. Méx. D.F. pp 10-126

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

Canacem. (2006). Producción y consumo de cemento Portland en México. México. D.F. (Camara Nacional del cemento). Publicación Técnica.

Chang, Y. F., Wang, C. Y. (1997). A 3-D Image Detection Method of a Surface Opening Crack in Concrete Using Ultrasonic Transducer Arrays. Journal of nondestructive Evaluation. Vol. 16, No. 4, Pp 193-203.

Chang, P.K., Peng, Y. N. (2000). Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete. Department of Civil Engineering, National Chiao Tung University. Taiwan. pp 87-95

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.

Comisión Federal de Electricidad (1998). Cálculo y diseño de estructuras de concreto por el método de Duff Abrams. México: CFE.

Cranck, J. (2004). The mathematics of diffusion. USA. Formerly of brunel university Uxbridge. Ed. Oxford University. pp 5.

Cyr, M. Lawrence, F., Ringot, E. (2005). Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions INSA-UPS, France. pp 264-277

Das, S. K. (2006). A simplified model for prediction of pozzolanic characteristics of fly ash, based on chemical composition. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India. pp 1827-1832

De la Peña R, R., Vernal A, R. (2007). Nuevos aditivos Reductores de Agua su aporte a la tecnología del hormigón. Artículo técnico. Santiago de Chile. SIKAS.A

Demirboga, R., Turkmen, I., Karakoc, M. B. (2003). Relationship between Ultrasonic velocity and Compressive Strength for high-volume mineral-admixed concrete, Department of Civil Engineering, Turkey. Cement and Concrete Research. Pp 2329-2336.

Dieb, A.S., Hooton, R. D.(1995). Water-permeability measurement of high performance concrete using a high-pressure triaxial cell. Lecturer, Department of Civil Engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt. Vol. 25, No. 6, pp 1199-1208

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.

Gesoglu, M., Guneyisi, E. (2007). Strength development and Chloride penetration in rubberized concretes with and without Silica Fume. Turkey. Materials and structures. Department of civil Engineering, Gaziantep University. pp 953-964.

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

Habel, K., Viviani, M., Denarie, E., Bruhwiler, E. (2005). Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). University of Toronto Canada. Department of civil Engineering. Cement and concrete research pp. 1362-1370.

Huerta, R.M., Tena, B. M. (2004). Proporcionamiento de Mezclas Concreto normal, pesado y masivo. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. IMCYC.Méx. D.F pp 1-50

Hines, W. W., Montgomery, C. D., Goldsman, M. D., Borrer, M. C. (2005). Probabilidad y estadística para ingeniería. México. D.F. Ed. CECSA. pp 387-425

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

Ji, T., Lin, T., Lin X. (2006). A concrete mix proportion design algorithm based on artificial neural networks. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian Province. China. pp 1399-1408

Kosmatka., S.H., Kerkhoff, B., Panarese, C.W., Tanesi, J.(2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Méx. D.F. Portland Cement Association. Mex.D.F pp 500

Larrad, F., Sedran, T. (2002). Mixture-proportioning of high-performance concrete, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France. Cement and Concrete Research. Vol. 70 Pp 1699-1704.

Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H. and Bae, D. B. (2004). Ultrasonic in-situ Monitoring of Setting Process of High Performance Concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 34 pp 631-640.

Leng, F., Feng, N., Xinying, L. (2000). An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete. pp 289-292

Li, D., Chen, Y., Shen, J., Su, J., Wu, X. (2000). The influence of alkalinity on activation and microstructure on fly ash. Cement and Concrete Research, China. Vol 30. pp 881-886.

Livingston, R.A. (2001). Nondestructive Testing of Historic Structures. Research and Development, Federal Highway Administration, USA. Vol 13. pp 249-271.

Liu, B., Xie, Y., Li, J. (2004). Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials. Civil Engineering College, Central South University, China. pp 994-998

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

Martínez, H. A. (2006). Determinación de los perfiles de cloruro en diferentes tipos de concretos. Oaxaca. Tesis de ingeniería civil. pp 64

Malhotra, V. K., Mehta, P.K. (2005). High-Performance High volume Fly Ash Concrete. Ottawa Canada. Materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories. pp.1-119

Malhotra, V.M., Ramezani-pour, A. A. (1994). Fly ash in Concrete. CANMET. Ottawa. Canada. Ed. V.M Malhotra. pp 135-136

Mehta, K., Monteiro, P. (1998). Concreto Estructuras, propiedades y materiales. Mex: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. IMCYC. pp 378.

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.

Montes, P., Bremmer, T.W., Lister, H.D. (2004). Influence of calcium nitrite inhibitor and crack width on corrosion of steel in high performance concrete subjected to a simulated marine environment. Cement and Concrete Research.

Montes, P., Bremner, W. T., Mrawira, D. (2005). Effects of Calcium Nitrate-Based Corrosion Inhibitor and Fly Ash on Compressive Strength of High-Performance Concrete. ACI. Materials Journal. No. 101. pp 1-6

Neville, A. M. (2000). Properties of Concrete. Pearson Education Limited, England. pp 623-641

Panarese, W.C. Farny, J.A. (1994). High-Strength Concrete. USA. Portland Cement Association. (PCA). pp 29.

Park. R. y Paulay. T, (1994). Estructuras de Concreto Reforzado. Méx. D.F. Ed. Limusa S.A de C.V. pp 14

Persson, B. (2003). Justification of Federation International de Béton, fib, 2000 model for elastic modulus of normal and high-performance concrete, HPC. Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund University, Suecia, pp 651-655

Pedersen, V., and Arntsen, B., 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, 1998

Pierre, R. (2001). Handbook of corrosion engineering. Edition. Mc Graw Hill. USA. pp 360

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

PUNDIT. 6 (1998). Operating manual. cns electronics. A Division of Fulton Group Limited, 61-63 Holmes Road. London NWS 3AL UK.

Qasrawi, H. Y., Marie, A. I. (2003). The use of USPV to anticipate failure in concrete under compression. Civil Engineering Department, Hashemite University, Jordan. Cement and Concrete Research. Vol. 33, Pp 2017-2021.

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

Sakai, E., Kasuga, T., Sugiyama, T., Asaga, K., Daimon, M. (2006). Influence of superplasticizers on the hydration of cement and the pore structure of hardened cement, Department of Metallurgy and Ceramic Science, Tokyo Institute of Technology. Japan. pp 2049-2053

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.

Sánchez, D. G. (2003). Durabilidad y patología del Concreto. Asociación colombiana de productores de concreto-Asocreto. Bogotá Colombia. pp 11-220.

Shin, S. W., Yun, C.B., Futura, H., Popovics, J. S. (2007). Nondestructive Evaluation of Crack Depth in Concrete Using PCA-compressed Wave Transmission Function and Neural Networks. Society for Experimental Mechanics, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology pp1-7

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. Revista técnica de ingeniería. pp 41-52

Suryavanshi, A.K., Narayan R. S., Cardew, E. H.(2002).Estimation of diffusion coefficients for chloride ion penetration into structural concrete. ACI Material Journal. Vol. 99 No. 5. pp 441-449

Teng, P.E (2000).High performance concrete in Washington, Department of transportation Federal Highway administration U.S. pp. 1-5

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

Wang, A., Zhang, C., Sun W. (2003). Fly ash effects: I. The morphological effect of fly ash. Beijing China. Cement and Concrete Research. Vol.10, pp 2023-2029.

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

Yeih, W., Huang, R. (1998). Detection of the corrosion damage in reinforced concrete members by ultrasonic testing. Department of Harbor and River Engineering, National Taiwan Ocean University. Cement and Concrete Research, Vol 28, No. 7, pp 1071-1083.

Young, J. F., Sidney, M., Gray, R.J., Bentur, A.(1998). The Science and Technology of Civil Engineering Materials. USA. William Hall. Series Editor. pp 85-115.

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 C 597-02. (2002). Standard test Method for Pulse Velocity Trough Concrete. United States. ASTM International.

ASTM C 143/C 143M – 05. (2005).Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete. United States. ASTM International.

ASTM C 231 – 04. (2004). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. United States. ASTM International.

ASTM C 39/C 39M – 04a. (2004). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. United States. ASTM International

ASTM C 469 – 02. (2002). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. United States. ASTM International

ASTM C 33 – 03. (2003). Standard Specification for Concrete Aggregates. United States. ASTM International

ASTM C 127 – 04. (2004). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. United States. ASTM International

ASTM C 70 – 94. (2001). Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate. United States. ASTM International

ASTM C 29/C 29M – 97. (2003). Standard Test Method for Bulk Density and Voids in Aggregate. United States. ASTM International

ASTM C 172 – 04. (2004). Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete. United States. ASTM International

ASTM C 1556 – 04. (2004). Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. United States. ASTM International

ASTM (2003). Standard Specification for Concrete Aggregates. Copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

ASTM C 150 – 04. (2004). Standard specification for Portland Cement. United States. ASTM International

NT BUILD 443. (1995). Concrete, Hardened. Accelerated Chloride Penetration. Finland. Nordtest method.

Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto del Distrito Federal (2004). Publicación en el diario oficial de la federación. 6 de octubre, Tomo I, No. 103-BIS.

ANEXOS

A) Dosificación de mezclas de concreto

Tabla A.1 Dosificación del concreto ABR.

DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO POR EL MÉTODO DE LAS CURVAS DE ABRAMS							
MATERIAL	PVSS (kg/m ³)	PVSC (kg/m ³)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1385	1505	2.58	1.04	0.16		3/4"
ARENA	1553	1664	2.65	2.36	0.50	2.83	
CEMENTO			2.9				
<p> $f_c = 275 \text{ kg/cm}^2$ rel A/C = 0.55 Valores obtenidos de la curva "A" rel G/A = 1.31 Valores obtenidos de la curva lamina 1 AGUA = 193.5 kg/m^3 agua/cemento en vol = 1.595 lts CEMENTO EN VOL = 121.32 lts agua + cemento = 314.82 lts grava + areva = 685.18 lts rel G/A en vol = 2.35 lts ARENA = 292.12 lts GRAVA = 393.06 lts </p>							
RESUMEN TOTAL DE MATERIALES PA 1m ³ DE CONCRETO							
Kg							
AGUA	CEMENTO	GRAVA	ARENA				
193.50	351.82	1014.10	774.12				

Tabla A.2 Dosificación del concreto ACI

MATERIAL	PVSS (kg/m ³)	PVSC (kg/m ³)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	"1385"	1505	2.58	1.04	0.064		3/4"
ARENA	"1553"	1664	2.65	2.36	1.95	2.83	
CEMENTO			2.9				

DISEÑO DE MEZCLAS POR EL MÉTODO DEL ACI

$f'c = 334$ kg/cm²
 Rev = 75 mm revenimiento deseado
 rel A/C = **0.50** Valor interpolado tabla 3
 REL A/C = **0.40** relación agua/cemento correspondiente a diseño por durabilidad para una zona agresiva Tabla 9.1
 Agua = **202** kg/m³ Para agregado de 3/4" y rev de 75 mm sin aire incluido
 No es grava redondeada por lo tanto no se disminuye en un 10% el contenido de agua
 Cemento = **505** kg/m³ > a 335 kg/m³ de cemento necesario para una zona agresiva
 Grava = 0.617 **928.6** kg/m³
 superplastificante = **1.5** kg/m³
 AGUA = 0.202
 CEMENTO = 0.174
 GRAVA = 0.360
 AIRE = 0.000
 TOTAL = 0.736
 Diferencia = 0.264
 ARENA = **699.46** kg/m³
 corrección por humedad
 GRAVA = **929.2** kg
 ARENA = **713.1** kg
 Total de agua a adicionarse para 1 m³ de concreto = **213.9** kg/m³

RESUMEN TOTAL DE MATERIALES PARA 1 m ³ DE CONCRETO				
Kg/m ³				
agua	cemento	grava	arena	superplast.
213.94	505.00	929.18	713.08	1.52

S

Tabla A.3 Dosificación del concreto HPC

MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1385	1505	2.58	1.04	0.061		1/2"
ARENA	1553	1664	2.65	2.36	0.17	2.83	
CEMENTO			2.9				

PASO 1 DETERMINACION DE LA RESISTENCIA
 La resistencia que se quiere obtener se escoge de la tabla 1

65	Mpa
----	-----

El contenido de agua lo proporciona el método de diseño para diferentes resistencias:

180	kg/m3
-----	-------

El contenido de aire también es proporcionada por el método, donde esta cantidad es la que se atrapa durante el mezclado del concreto

0.02	m3
------	----

PASO 2 VOLUMEN TOTAL DE MATERIAL CEMENTANTE
 El valor recomendado y para tener una resistencia óptima es de 0.35 %
 y el valor recomendado para la porcion de agregados es de 0.65 %
 total de material cementante es =

0.15

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 selecciona la popporción es de:

arena	grava
2	3

PASO 4 PESO DE LOS AGREGADOS PARA 1 m3 DE CONCRETO
 Contenido de arena =

689	kg/m3
-----	-------

contenido de grava=

1006.2	kg/m3
--------	-------

PASO 5 CALCULO DE CONTENIDO DE CEMENTO
 Existen 2 opciones para adicionar cemento en el concreto:
 opción 1 concreto sin adiciones minerales = 100 % de cemento
 opción 2 reemplazo parcial de cemento por algun material cementante suplementario, en este caso por ceniza volante y la relacion es de:

cemento	C.V
0.75	0.25

Para el desarrollo de este cálculo se toma la opcion 1
 Entonces el contenido de cemento por 1m3 de concreto es=

435	kg/m3
-----	-------

PASO 6 CORRECCIÓN POR HUMEDAD DE LOS MATERIALES
 Se toman en cuenta el porcentaje de absorción y humedad de los materiales

Arena	-15.0891 kg/m3
Grava	-9.850698 kg/m3

En donde la catidad total de los materiales en estado SSS para 1m3 es:

ARENA	673.9109 kg/m3
GRAVA	996.349302 kg/m3

PASO 7 CORRECCIÓN DEL AGUA PARA 1m3 DE CONCRETO

-24.939798	Lts/m3
204.939798	lts/m3

cantidad total de agua por 1m3 de concreto es:

Ajuste de agua por la adición de superplastificante de alto rango PLASTOL 4000
 Donde el fabricante recomienda una adición inicial mínima igual a:

2	ml/kg de cemento sólido
---	-------------------------

Así mismo la cantidad de sólido que contiene el superplastificante es de 30%
 y está compuesto por otro 70% de agua == 0.7 % de líquido

RESUMEN TOTAL DE MATERIALES			
para 1m ³			
Arena (kg)	Grava (kg)	Cemento (kg)	Agua (kg)
673.91	996.35	435.00	204.94

B) Resultados en estado endurecido

Tabla B.1 Resistencia a compresión del concreto diseñado por el método de Duff Abrams y ACI

	ABR				ACI			
	3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d
	12	17	23	29	27	36	41	47
	13	17	24	27	27	36	45	41
	13	19	23	27	29	39	44	48
	14	19	24	29	29	35	37	46
				29				49
				30				46
f'c promedio (MPa)	13	18	24	29	28	37	42	46

Tabla B.2 Resistencia a compresión del concreto diseñado por el método de HPC

	HPC				HPC20				HPC40			
	3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d
	23	32	38	42	19	25	33	38	11	19	23	31
	25	34	39	42	23	28	33	36	12	19	23	27
	24	33	38	40	21	29	34	37	13	19	25	24
	23	32	35	40	21	27	32	38	11	18	23	30
				42				36				30
				42				38				30
f'c promedio (MPa)	24	33	38	41	21	27	33	37	12	19	24	29

Tabla B.3 Módulo de elasticidad del concreto diseñado por el método de Duff

Abrams y ACI

ABRAMS	Módulo de elasticidad (E)				Relación de poisson (μ)			
	3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d
	17816	22129	23436	24823	0.10	0.10	0.13	0.10
	22566	21521	23131	25243	0.10	0.10	0.13	0.11
	17274	21023	21492	25060	0.10	0.11	0.10	0.15
				24984				0.14
<i>Promedio (MPa)</i>	<i>19219</i>	<i>21558</i>	<i>22686</i>	<i>25028</i>	<i>0.10</i>	<i>0.10</i>	<i>0.12</i>	<i>0.13</i>
ACI	Módulo de elasticidad (E)				Relación de poisson (μ)			
	3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d
	24124	28998	30222	31153	0.13	0.18	0.11	0.16
	26076	34012	49179	32015	0.10	0.13	0.24	0.16
	24361	27597	31706	32079	0.12	0.12	0.18	0.18
				31478				0.14
<i>Promedio (MPa)</i>	<i>24854</i>	<i>30202</i>	<i>37036</i>	<i>31681</i>	<i>0.12</i>	<i>0.14</i>	<i>0.18</i>	<i>0.16</i>

Tabla B.4 Módulo de elasticidad del concreto diseñado por el método de HPC

HPC	Módulo de elasticidad (E)				Relación de poisson (μ)			
	3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d
	22178	26314	29812	33855	0.10	0.10	0.12	0.15
	24911	26239	26437	29786	0.12	0.11	0.13	0.15
	24023	25075	30863	31244	0.10	0.10	0.14	0.16
				30810				0.16
<i>Promedio (MPa)</i>	<i>23704</i>	<i>25876</i>	<i>29037</i>	<i>31424</i>	<i>0.11</i>	<i>0.10</i>	<i>0.13</i>	<i>0.16</i>
HPC20	Módulo de elasticidad (E)				Relación de poisson (μ)			
	3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d
	24877	22868	26706	28482	0.10	0.12	0.10	0.14
	21867	23851	26282	27833	0.10	0.10	0.13	0.10
	23350	22785	24592	27619	0.10	0.10	0.10	0.15
				29066				0.13
<i>Promedio (MPa)</i>	<i>23365</i>	<i>23168</i>	<i>25860</i>	<i>28250</i>	<i>0.10</i>	<i>0.11</i>	<i>0.11</i>	<i>0.13</i>
HPC40	Módulo de elasticidad (E)				Relación de poisson (μ)			
	3 d	7 d	14 d	28 d	3 d	7 d	14 d	28 d
	17141	21142	20096	26889	0.10	0.10	0.10	0.10
	19394	19401	21299	25739	0.10	0.10	0.11	0.10
	18837	20867	23615	23779	0.10	0.10	0.10	0.10
				25036				0.12
<i>Promedio (MPa)</i>	<i>18457</i>	<i>20470</i>	<i>21670</i>	<i>25361</i>	<i>0.10</i>	<i>0.10</i>	<i>0.1033</i>	<i>0.105</i>

Tabla B.5 Resumen de Módulos de elasticidad obtenidos experimentalmente y con las expresiones empíricas propuestas en el (PCA)

Tipo de mezcla	M.E (experimental) MPa	M.E (PCA) MPa
ABR	24823	24716
	25243	23987
	25060	24061
	24984	24816
ACI	25027	24876
	31153	29754
	32015	28164
	32079	29812
	31478	29297

Continuación tabla B.5

Tipo de mezcla	ME (experimental) MPa	M.E (PCA) MPa
HPC	31681	30069
	33855	28429
	29786	28396
	31244	27903
	30810	27925
HPC20	31423	28413
	28482	27373
	27833	26849
	27619	27131
	29066	27327
HPC40	28250	26942
	26889	25279
	25739	24265
	23779	23192
	25036	25002
	25361	24980

Tabla B.6 Resumen de velocidad de pulso ultrasónico para todas la mezclas de concreto

Edad (días)	ABR	ACI	HPC	HPC20	HPC40
1	4506	4490	4283	4228	4046
2	4506	4530	4785	4510	4167
3	4511	4641	4837	4556	4251
4	4516	4624	4855	4556	4283
5	4516	4679	4896	4651	4363
6	4536	4717	4926	4673	4470
7	4561	4734	4884	4706	4566
8	4582	4745	4890	4768	4587
9	4572	4878	4878	4768	4608
10	4572	4908	4890	4768	4608
11	4572	4866	4891	4768	4614
12	4540	4866	4896	4779	4640
13	4505	4866	4902	4779	4662
14	4640	4866	4914	4796	4673
15	4695	4866	4914	4831	4689
16	4640	4878	5019	4831	4706
17	4624	4890	5057	4791	4734
18	4619	4902	4914	4791	4745
19	4619	4920	4866	4802	4751
20	4619	4944	4908	4819	4756

Continuación Tabla B.6

Edad (días)	ABR	ACI	HPC	HPC20	HPC40
21	4640	4951	4890	4843	4762
22	4657	4981	4938	4849	4768
23	4673	4975	4938	4848	4768
24	4684	4988	4975	4848	4773
25	4695	4975	4957	4860	4779
26	4706	4963	4957	4860	4779
27	4723	4969	4957	4872	4785
28	4734	4988	4957	4872	4785
29	4690	5051	4957	4872	4796
30	4667	5051	4969	4872	4796
31	4662	5070	4963	4872	4796
32	4723	5128	4981	4860	4808
33	4831	5089	4981	4854	4814
34	4779	5115	4975	4860	4813
35	4820	5168	4975	4872	4819
36	4814	5149	4988	4878	4802
37	4802	5298	4994	4884	4820
38	4785	5229	5006	4890	4825
39	4785	5216	5006	4890	4825
40	4918	5202	4988	4878	4814

Continuación Tabla B.6

Edad (días)	ABR	ACI	HPC	HPC20	HPC40
41	5051	5229	4994	4896	4802
42	4884	5181	4963	4908	4825
43	4792	5089	4944	4951	4837
44	4711	5168	4988	4878	4825
45	4877	5063	5006	4969	4837
46	4706	4969	5006	4920	4825
47	4717	5051	4988	4920	4831
48	4717	5025	4939	4890	4825
49	4646	5051	4939	4938	4837
50	4751	5076	4933	4914	4837
51	4717	5076	4927	4914	4860
52	4717	5063	4933	4902	4854
53	4762	5057	4951	4914	4866
54	4762	5057	4938	4914	4866
55	4762	5057	4944	4950	4872
56	4728	5057	4945	4938	4878
57	4728	5057	4951	4963	4890
58	4717	5063	4950	4981	4896
59	4728	5063	4969	4981	4902
60	4734	5070	4957	4951	4890

Continuación Tabla B.6

Edad (días)	ABR	ACI	HPC	HPC20	HPC40
61	4762	5070	4975	4969	4914
62	4728	5063	4988	4975	4896
63	4728	5063	4994	4951	4914
64	4745	5076	4981	4988	4902
65	4762	5083	5006	5000	4908
66	4762	5090	5006	5013	4908
67	4717	5077	5006	5019	4920
68	4728	5070	5019	5006	4908
69	4728	5090	5019	5031	4908
70	4745	5077	5019	5006	4920
71	4745	5032	5038	5006	4938
72	4762	5038	5038	4981	4938
73	4768	5057	5044	4951	4938
74	4814	5076	5044	4957	4938
75	4762	5076	5051	4944	4926
76	4756	5076	5057	4969	4944
77	4756	5070	5038	4957	4944
78	4756	5057	5025	4975	4932
79	4756	5070	5006	4988	4932
80	4745	5070	5006	4988	4920

Continuación Tabla B.6

Edad (días)	ABR	ACI	HPC	HPC20	HPC40
81	4762	5070	5044	5000	4944
82	4756	5076	5038	4988	4932
83	4768	5070	5063	4969	4944
84	4762	5083	5051	4988	4932
85	4762	5070	5063	4981	4944
86	4756	5070	5063	4981	4932
87	4756	5070	5063	4994	4932
88	4751	5089	5076	4994	4938
89	4745	5128	5063	5013	4938
90	4751	5083	5070	5000	4951
91	4773	5083	5070	5000	4938
92	4773	5096	5063	5019	4926
93	4768	5076	5070	5025	4932
94	4768	5089	5076	5019	4944
95	4768	5089	5083	5013	4938
96	4774	5115	5070	5025	4938
97	4779	5083	5083	5025	4938
98	4768	5102	5083	5038	4950
99	4774	5102	5063	5019	4950
100	4774	5109	5057	5019	4950

C) Coeficiente de penetración de cloruros (D_e)

Tabla C.1 concreto diseñado por el método de duff abrams $a/c = 0.55$

Autores	Relación A/C	De (m²/s) literatura	VPU (m/s)	CP (kg/m³)	CP (kg/m³)
Chavez, M. J. A., Buendía. R. H. (2003).	0.55	4.00x10 ⁻¹¹	4745	350	352
Chavez, M. J. A., Buendía. R. H. (2003).	0.55	4.80x10 ⁻¹¹		350	
Bamforth, P. (2003).	0.55	5.10x10 ⁻¹¹		345	RANGO
Torres, A. A. (1999).	0.55	2.87x10 ⁻¹¹		360	
Castro, Moreno y Torres (2003).	0.55	3.15x10 ⁻¹¹		355	± 20
Castro, Moreno y Torres (2003).	0.55	2.17x10 ⁻¹¹		360	
Castro, Moreno y Torres (2003).	0.55	3.50x10 ⁻¹¹		350	

Tabla C.2 método de volúmenes absolutos (ACI) $a/c = 0.40$

Autores	Relación A/C	De (m²/s) literatura	VPU (m/s)	CP (kg/m³)	CP (kg/m³)
Chian, C., She, S. C. (2006).	0.40	1.72x10 ⁻¹²	5077	474	505
Chian, C., She, S. C. (2006).	0.40	1.52x10 ⁻¹²		474	
Chian, C., She, S. C. (2006).	0.40	1.78x10 ⁻¹²		474	RANGO
Chian, C., She, S. C. (2006).	0.40	2.80x10 ⁻¹²		550	± 70
González, de la costera M. (1999).	0.40	1.00x10 ⁻¹²		500	
González, de la costera M. (1999).	0.40	2.80x10 ⁻¹²		500	
Luping, T., Nilsson, L. O. (1992).	0.40	1.10x10 ⁻¹²		550	
Luping, T., Nilsson, L. O. (1992).	0.40	2.00x10 ⁻¹²		530	
Yang, Chi y Huang (2002).	0.40	1.60x10 ⁻¹²		530	
Yang, Chi y Huang (2002).	0.40	1.73x10 ⁻¹²		450	
Yang, Chi y Huang (2002).	0.40	1.86x10 ⁻¹²		450	

Tabla C.3 método de HPC sin ceniza volante a/c = 0.41

Autores	Relación A/C	De (m²/s) literatura	VPU (m/s)	CP (kg/m³)	CP (kg/m³)
Polder, R. B. (1995).	0.41	2.00x10 ⁻¹²	5019	450	435
Polder, R. B. (1995).	0.41	4.40x10 ⁻¹²		420	RANGO
Diab, Bentur and Ben-Dor, L., (1998).	0.41	5.40x10 ⁻¹²		450	± 70
Diab, Bentur and Ben-Dor, L., (1998).	0.41	2.80x10 ⁻¹²		480	
Diab, Bentur and Ben-Dor, L., (1998).	0.41	5.00x10 ⁻¹²		420	
Diab, Bentur and Ben-Dor, L., (1998).	0.41	2.80x10 ⁻¹²		500	
COMPAT 2003	0.41	2.00x10 ⁻¹²		450	
COMPAT 2004	0.41	1.60x10 ⁻¹²		450	

Tabla C.4 método de HPC con 20 % de ceniza volante a/c = 0.41

Autores	Relación A/C	De (m²/s) literatura	VPU (m/s)	CP (kg/m³)	CP (kg/m³)
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	6.40x10 ⁻¹²	5006	340	348
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	3.50x10 ⁻¹²		350	RANGO
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	4.50x10 ⁻¹²		350	
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	3.40x10 ⁻¹²		350	± 20
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	4.80x10 ⁻¹²		350	
Hooton, Pun, Kojundic, Fidjestol (1997)	0.41	4.00x10 ⁻¹²		345	
Hooton, Pun, Kojundic, Fidjestol (1997)	0.41	4.13x10 ⁻¹²		345	
Pedersen, Arnsten (1998)	0.41	4.40x10 ⁻¹²		350	
Pedersen, Arnsten (1998)	0.41	4.30x10 ⁻¹²		350	
COMPAT (2003)	0.41	3.49x10 ⁻¹²		360	
COMPAT (2003)	0.41	3.61x10 ⁻¹²		360	

Tabla C.5 método de HPC con 40 % de ceniza volante a/c = 0.41

Autores	Relación A/C	De (m²/s) literatura	VPU (m/s)	CP (kg/m³)	CP (kg/m³)
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	7.10x10 ⁻¹²	4920	265	261
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	9.60x10 ⁻¹²		260	RANGO
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	8.10x10 ⁻¹²		265	± 20
Castellote, C., Andrade, C. (2006).	0.41	8.30x10 ⁻¹²		265	
Yang. (2006).	0.41	7.10x10 ⁻¹²		270	
Yang. (2006).	0.41	7.10x10 ⁻¹²		270	