

01146



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

## **“TECNOLOGÍA DEL CONCRETO ANTIBACTERIAL”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE :

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
(CONSTRUCCIÓN)**

PRESENTA:  
**ING. JAVIER ALONSO CHÁVEZ PÉREZ**

DIRIGIDA POR:  
**M.I. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES**



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F. JUNIO DE 2004.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios**, por haberme permitido cumplir una meta más.

**A mis padres**, Dora Maria y Javier Chávez, por ser mi ejemplo de superación a pesar de las adversidades.

**A mis hermanos**, Nohemí Chávez y Eloy Chávez, por su paciencia y cariño.

**A mi novia**, Jessie Denise, por su paciencia, cariño y comprensión.

**A mi tía**, Catalina Ortiz, por darme su apoyo en todo momento.

**A mis amigos**, que siempre estuvieron dispuestos en darme su apoyo.

**A mis compañeros**, por todos aquellos momentos buenos y malos que pasamos juntos.

**A todos mis maestros**, por transmitirme todo su conocimiento.

**A todas las Instituciones Educativas**, que me brindaron la oportunidad de crecer y desarrollarme como profesionista.

*Por todo eso y mucho más, ¡gracias!*

*Ing. Javier Alonso Chávez Pérez*

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: JAVIER ALONSO

CHÁVEZ PÉREZ

FECHA: 25/JUNIO/04

FIRMA: 

## **DEDICATORIA**

*A mis padres*

*A mis hermanos*

*A mi novia*

# ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	i
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES .....	1
1.1. Reseña Histórica .....	1
1.1.2. Avances tecnológicos del concreto.....	3
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Alcances.....	5
CAPÍTULO 2 TECNOLOGIA DEL CONCRETO ANTIBACTERIAL.....	6
2.1. Generalidades .....	6
2.2. Características .....	8
2.3. Propiedades .....	8
2.3.1. Resistencia.....	8
2.3.2. Durabilidad.....	9
2.3.3. Permeabilidad.....	10
2.3.3.1. Influencia de la relación agua/cemento .....	12
2.3.3.2. La prueba de permeabilidad rápida a cloruros como índice de la durabilidad de las estructuras de concreto .....	16
2.3.4. Trabajabilidad .....	17
2.3.5. Inhibición del crecimiento de microorganismos.....	19
2.3.5.1. Tipos de microorganismos.....	20
2.3.5.2. Pruebas para detectar microorganismos.....	20
CAPÍTULO 3 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES.....	21
3.1. El Cemento.....	21
3.1.1. Tipos de cemento .....	21
3.2. Los Agregados .....	24
3.3. El Agua.....	31
3.4. Aditivos.....	33

3.4.1. Tipos de aditivos .....	33
3.4.1.1 Aditivos químicos .....	34
3.4.1.2. Aditivos minerales .....	36
3.4.1.3. Aditivos diversos .....	40
3.4.2. Influencia de los aditivos.....	41

**CAPÍTULO 4 PRUEBAS PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DEL CONCRETO .....** 43

4.1. Pruebas al Concreto Fresco .....	43
4.1.1. Finalidad.....	43
4.1.2. Tipos de pruebas.....	44
4.1.2.1. Revenimiento .....	45
4.1.2.1.1. Equipo para la prueba de acuerdo a la NMX C-156 .....	46
4.1.2.1.2. Procedimiento .....	46
4.1.2.2. Temperatura .....	48
4.1.2.3. Peso unitario .....	49
4.1.2.3.1. Definiciones.....	50
4.1.2.3.2. Cálculo de la masa unitaria y el rendimiento de acuerdo a la NMX C-162.....	50
4.1.2.4. Contenido de aire .....	52
4.2. Pruebas al Concreto Endurecido.....	53
4.2.1. Finalidad.....	53
4.2.2. Tipos de pruebas.....	55
4.2.2.1. Prueba de resistencia a la compresión .....	55
4.2.2.1.1. Pruebas al concreto colocado y endurecido .....	59
4.2.2.2. Módulo de elasticidad .....	59
4.2.2.3. Permeabilidad .....	60

**CAPÍTULO 5 CUIDADOS EN EL CONCRETO PARA CONSERVAR LAS PROPIEDADES DE DISEÑO .....** 63

5.1. Generalidades.....	63
5.2. Transporte .....	64

5.3. Colocación.....	66
5.3.1. Planeación .....	66
5.3.2. Precauciones .....	67
5.4. Vibrado.....	67
5.4.1. Métodos de compactación .....	68
5.4.1.1. Métodos mecánicos.....	68
5.4.2. Equipo para vibrado .....	68
5.4.2.1. Vibradores internos.....	68
5.4.2.1.1. Selección de un vibrador interno para la obra .....	69
5.4.2.2. Vibradores externos .....	69
5.4.2.1.1. Selección de un vibrador externo para cimbras verticales .....	70
5.4.3. Aplicación de métodos combinados .....	71
5.4.4. Prácticas de vibración recomendadas para la construcción en general .....	71
5.4.4.1. Procedimiento para vibración interna.....	71
5.4.4.2. Vibrado del acero de refuerzo .....	73
5.4.5. Juzgando la adecuación de la vibración interna.....	73
5.4.6. Consecuencias de la vibración impropia .....	74
5.4.6.1. Apanalamiento.....	74
5.4.6.2. Exceso de huecos debidos al aire atrapado.....	74
5.4.6.3. Vetas de arena .....	75
5.4.6.4. Líneas de colado.....	75
5.4.6.5. Juntas frías .....	75
5.5. Curado .....	76
5.5.1. Importancia del curado .....	76
5.5.1.1. Contenido satisfactorio de humedad .....	77
5.5.2. Métodos y materiales para el curado .....	78
5.5.3. Protección y curado en clima frío .....	79
5.5.4. Protección y curado en clima cálido .....	79
5.5.5. Curado del concreto de alto comportamiento.....	80



CAPÍTULO 6	USOS Y BENEFICIOS.....	82
6.1.	Usos.....	82
6.2.	Beneficios.....	90
CONCLUSIONES.....		93
BIBLIOGRAFÍA.....		96
ANEXO A.....		99

---

---

## INTRODUCCIÓN

Actualmente en México, son cada vez mayores los problemas que se presentan en las estructuras de concreto, ya que estas una vez puestas en servicio no son capaz de resistir las condiciones para las cuales han sido diseñadas, lo que conlleva a una vida de servicio más corta y con ello pérdidas económicas.

Entre las causas que generan esta problemática podemos encontrar: prácticas de construcción deficientes, un mal control de calidad de las obras, la selección de un concreto inadecuado para el tipo de servicio a que será sometido; incapaz de soportar el ataque de los agentes dañinos, como pueden ser: ataque de sulfatos, cloruros, el fenómeno de la carbonatación y microorganismos. Una de las causas más importante es sin duda el ataque de agentes dañinos, que aún en nuestros días no está bien comprendida por algunos ingenieros, los cuales diseñan estructuras de concreto sólo para soportar las fuerzas mecánicas a las que estarán sometidas y no toman en cuenta en el diseño los efectos que provocan estos agentes dañinos.

Hace algunos años viene tomando auge una clase de concreto denominada de alto comportamiento (CAC), que se presentan como una alternativa para la solución a esta problemática. Este tipo de concreto esta diseñado para que sus propiedades respondan adecuadamente a un tipo de servicio determinado y así obtener una estructura durable.

La presente tesis pretende dar a conocer el *concreto antibacterial*, el cual figura entre los concretos de alto comportamiento (CAC), con ello se quiere dar difusión a este nuevo concreto, para que sea ampliamente conocido por ingenieros, arquitectos y técnicos de la construcción; y sea tomado en cuenta como una alternativa más para dar solución a este tipo de problemas.

La tesis se divide en seis capítulos, en los cuales en el primero se habla de la evolución del concreto y como se fueron dando los avances tecnológicos en el mismo. En el segundo capítulo se mencionan las características y propiedades del *concreto antibacterial*, que en lo sucesivo también se la llamará *concreto impermeable*. En el

tercer capítulo se ve la selección adecuada de los materiales que forman el concreto. En el cuarto capítulo se analiza las pruebas que se le deben realizar el concreto tanto en estado fresco, como en estado endurecido y así asegurar la calidad del concreto. En el quinto capítulo se mencionan los cuidados que se deben tener el concreto, tanto el transporte, colocación, vibrado y curado, para así conservar las propiedades de diseño. En el sexto y último capítulo se ven los usos y beneficios que se obtendrán con la utilización de este tipo de concreto.

Por último se presentan las conclusiones, como una parte importante del trabajo, ya que se ve la experiencia obtenida con la realización de ésta tesis.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

### 1.1. Reseña Histórica

La necesidad del cemento comienza cuando el ser humano pretende pegar una piedra con otra para formar una masa estable y construir una pared, una muralla protectora contra sus enemigos o un lugar fijo donde vivir.

Ingeniero casi por instinto, constructor de ciudades, el humano comenzó a levantar su morada próxima a la siembra, con los materiales que la naturaleza ponía a su alcance. Los techos, muros y pisos se materializaban con mezclas y combinaciones. Desde entonces el hombre fue buscando cementantes, estudiando sus cualidades adhesivas, su ductibilidad y solidez.

Lodo, hierbas, madera, piedra y cal fueron los primeros materiales de construcción con que nuestros antepasados experimentaron para hallar, cada vez, mejores maneras de erigir viviendas, muros, techos y pisos, así como monumentos religiosos y civiles. Entre las culturas que se destacan por la utilización de estos materiales están: los Egipcios, Griegos, Romanos y Mesoamericanos.

Fue en 1824, cuando el constructor Joseph Aspdin, descubrió el **cemento portland**, al realizar una mezcla de caliza arcillosa dura, molida y calcinada con arcilla, a la que agregó agua y sometió a temperaturas mayores de 1300 °C, para calcinarla nuevamente, molerla y batirla con un porcentaje pequeño de yeso, hasta producir un polvo fino.

Así nació el producto que Aspdin bautizó como **cemento portland**, debido a la similitud de su color con las rocas de la isla de Pórtland y que construiría, por fin, el polvo de la creación humana.

El intenso desarrollo de la construcción de ferrocarriles, puentes, puertos, diques, etc., en la segunda mitad del siglo XIX, da una importancia enorme al cemento y las fábricas de éste, especialmente los de cemento natural, empiezan a extenderse por doquier.

Es a partir de 1900 cuando los cementos portland se imponen en las obras de ingeniería y cuando empieza un descenso veloz en el consumo de cementos naturales.

Desde entonces, el cemento es el material de construcción más utilizado del mundo, al ser mezclado con agua, la reacción química que sobreviene lo transforma en roca sólida que el constructor puede formar y moldear. Debido a ésta y otras cualidades admirables, a este fino polvo se le ha llamado "**polvo mágico**".

Los cementos empleados en la actualidad no se parecen en nada al cemento de Aspdin, las mejoras que han experimentado han sido muy importantes, no sólo en cuanto ahorro energético, (actualmente un cemento requiere para su fabricación menos de la mitad de calorías por tonelada que la que se precisaba en 1940), sino también en cuanto a sus características de composición y granulometría que han hecho que la evolución de sus resistencias a edades de 28 días sea más rápida que la de los cementos de hace sólo unos años.

Actualmente, el cemento portland ha llegado a una gran perfección y es el material industrializado de construcción de mayor consumo en el mundo. Se puede decir que el cemento es el alma del concreto, ya que su producción está destinada a enlazar piedras sueltas para crear el material pétreo llamado concreto.

Con la aparición del cemento portland en 1824, y con el paso de los años, el concreto evolucionó crecientemente. Su utilización traspasaría todas las fronteras y se volvería de uso universal. Sus grandes posibilidades constructivas, su relativo bajo costo y su lugar histórico como sucesor de la piedra natural, lo han hecho, por excelencia, el material del siglo XX.

Gracias al concreto, se han podido levantar obras espectaculares de la arquitectura y de la ingeniería: majestuosos edificios, largas carreteras, inmensas fábricas, grandes establecimientos comerciales, presas y canales de todos los tamaños, en fin, la civilización entera tal como la vemos en nuestra vida cotidiana.

Las ciudades modernas no pueden ser concebidas sin esa roca artificial llamada concreto. Nuestra vida transcurre entre el cemento: entre concreto nacemos, crecemos, estudiamos, viajamos, nos divertimos y trabajamos todos.

Con el avance del concreto crecen las posibilidades de bienestar y desarrollo de los pueblos y las naciones. Donde el concreto avanza, el subdesarrollo disminuye. Donde hay progreso, el concreto lo promueve y acrecienta. El cemento y su derivado el concreto, crean cultura y originan civilización.

### **1.1.2. Avances tecnológicos del concreto**

El desarrollo de la industria del concreto ha sido muy lenta en comparación con otras áreas. Las excepciones más notables han sido el descubrimiento de la relación agua/cemento, en 1919, y la introducción del aire en el concreto, en 1938.

En los últimos 15 años han aparecido algunos nuevos conceptos en el campo del concreto, entre los que figura el Concreto de Alto Comportamiento (CAC); pero, ¿qué es exactamente lo que significa esto?. Si analizamos detenidamente la frase se puede entender que son concretos diseñados para que sus propiedades respondan adecuadamente a un tipo de servicio determinado.<sup>1</sup>

Aún cuando sus componentes principales son similares a los de un concreto normal, cemento, agregados, aditivos y agua, se requiere de propiedades especiales de cada uno de ellos, además de técnicas de colocación, compactación y curado, cuidadosamente aplicadas.

Su evolución fue gradual, y se debió, a la producción de concretos con resistencias cada vez más altas: 80, 90, 100, 120 Mega pascales (Mpa), y a veces inclusive mayores.

Pero el concreto de alto comportamiento no es lo mismo que el concreto de alta resistencia. El énfasis ha cambiado de una resistencia muy alta a otras propiedades deseables en algunas circunstancias. Éstas son: alto módulo de elasticidad, alta densidad, baja permeabilidad y resistencia a algunas formas de ataque.

---

<sup>1</sup> JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES, *Concretos de Alto Comportamiento*, en revista Construcción y Tecnología, n. 75, México D.F., Mayo de 1998, pág. 18.

Entre los concretos de alto comportamiento (CAC), podemos encontrar los siguientes:

- ✦ Autocompactable
- ✦ Muy alta resistencia a la compresión
- ✦ Resistente al ataque por cloruros
- ✦ Resistente al ataque por sulfatos
- ✦ Alto módulo elástico
- ✦ Muy baja permeabilidad
- ✦ Pesado
- ✦ Ligero Celular
- ✦ Con aire incluido
- ✦ **Antibacterial**

Es en el *concreto antibacterial*<sup>2</sup>, donde centraremos nuestro trabajo de investigación, este concreto presenta propiedades innovadoras, por lo cual, se justifica la investigación del mismo.

El empleo de subproductos como adición integrante de la mezcla, han sido de suma importancia en la elaboración de los concretos de alto comportamiento (CAC). El desarrollo comercial de los aditivos comenzó a finales del siglo pasado y en los albores del presente. Algunos, por ejemplo los inclusores de aire, han marcado épocas en la tecnología del concreto, en tanto que otros han desempeñado un papel complementario dentro del desarrollo tecnológico, al servir de complemento a los aditivos nuevos.

Entre los recientes desarrollos están la nueva generación de aditivos superfluidizantes, aditivos de innovación para el colado de concreto en climas fríos, agentes inclusores de aire, desarrollo de cementos libres de macrodefectos, aditivos activadores de escoria, aditivos inhibidores de la expansión álcali-agregado, aditivos para colados bajo el agua, aceleradores de fraguado libre de cloruros, aditivos controladores de fraguado y aditivos inhibidores de corrosión.

---

<sup>2</sup> [www.cemex.com.mx](http://www.cemex.com.mx)

## **1.2. Objetivo**

El presente estudio tiene como objetivo:

Recabar y analizar toda la información disponible de fuentes primarias y secundarias, sobre el *concreto antibacterial*. Para así, proporcionar una guía básica de las características y propiedades del *concreto antibacterial*, así como también las normas y pruebas que se deben realizar, para verificar el comportamiento satisfactorio del mismo.

## **1.3. Alcances**

El trabajo de investigación es del tipo descriptivo, el cual se enfoca principalmente en el análisis bibliográfico del concreto antibacterial. Con ello se pretende dar difusión a este nuevo concreto, para que sea ampliamente conocido por ingenieros, arquitectos y técnicos de la construcción. Quedando abierta la posibilidad para futuras líneas de investigación, por ser éste, un producto innovador, con un desarrollo en aumento en estos últimos años.



## CAPÍTULO 2

# TECNOLOGÍA DEL CONCRETO ANTIBACTERIAL

### 2.1 Generalidades

En nuestro medio ambiente existen una gran variedad de microorganismos responsables de enfermedades e infecciones. Estos microorganismos pueden provocar daños incalculables a diferentes industrias, además de ser un peligro intrínseco en áreas donde la salubridad es muy importante; tales como hospitales, clínicas, etc.

Estos microorganismos tienen la capacidad de desarrollarse en cualquier, medio y reproducirse de una manera impresionante, con lo cual pueden convertirse en focos de infección en muy poco tiempo.

La manera tradicional de evitar y combatir el crecimiento de los microorganismos es utilizar agentes químicos (desinfectantes). Los desinfectantes empleados para la sanitización y que tienen una acción bactericida, fungicida o germicida, generalmente son a base de compuestos de amonio, iones de metales pesados como son las sales de mercurio, plata y cobre, pero resultan perjudiciales para el ser humano o de cualquier ser vivo.

Sin embargo, hay que tener en cuenta, que actualmente existen nuevos sistemas y/o productos que se presentan como una alternativa más segura y eficaz que los métodos tradicionales; entre los que figura el *concreto antibacterial o impermeable*, ya que la base para lograr el concreto antibacterial es hacer un *concreto impermeable* al cual se le adiciona un aditivo especial (antibacterial) con ello se evita que penetren los agentes dañinos a la masa del concreto, como lo son las bacterias.

En estudios en años recientes, se ha comprobado la presencia de diferentes tipos de bacterias en los concretos tradicionales, dado que por sus características posee un grado importante de porosidad, además de manifestar discontinuidades en diversas etapas de la vida

del concreto, las cuales se muestran en la tabla 2.1<sup>3</sup>. Debido a esto, se permite a los microorganismos alojarse en el concreto, ya sea en su superficie o en su interior.

ETAPA Y CONDICIONES DEL CONCRETO	DISCONTINUIDADES CARACTERÍSTICAS
<u>En estado fresco:</u> Al término de la colocación y la compactación  Antes y durante el proceso de fraguado	Poros y cavidades, según el grado de compactación.  Vacíos laminares y capilares provocados por el asentamiento y el sangrado. Grietas por cambio de volumen (contracción plástica).
<u>En curso de endurecimiento:</u> Recién fraguado  En las primeras semanas de edad	Grietas por secado prematuro.  Grietas por cambios de temperatura y humedad (contracción térmica y por secado). Microfisuras por cambio de volumen durante la hidratación del cemento (contracción autógena).
<u>En estado endurecido:</u> A la edad de servicio, sin carga externa  En condiciones de carga externa	Grietas de contracción por secado, y por cambios diferenciales de volumen entre los agregados y la pasta endurecida (grietas interfaciales).  Crecimiento de grietas y discontinuidades existentes. Propagación de las grietas interfaciales a la pasta de cemento. Aparición de nuevas grietas.

**Tabla 2.1. Origen y manifestación de discontinuidades en diversas etapas de la vida del concreto.**

Además de las bacterias encontradas en el concreto normal, se suman los problemas ya conocidos, como lo son: el ataque de sulfatos, cloruros, el fenómeno de la carbonatación, etc.

El concreto antibacterial se presenta como una alternativa al uso de los procedimientos actuales para garantizar la sanidad, con una baja toxicidad, trabajando desde el inicio de la vida útil de las estructuras y protegiéndolas desde el momento de su construcción, lo que

<sup>3</sup> C.F.E., Instituto de Ingeniería de la UNAM, *Manual de Tecnología del Concreto sección 3*, Limusa- Noriega Editores, México, D.F., 1994, pág. 27.

impide que los microorganismos se desarrollen en el mismo, haciendo de las estructuras realizadas con el concreto antibacterial, un lugar con un alto grado de salubridad, y una alta probabilidad de no sufrir degradaciones durante su vida útil con programas de mantenimiento casi nulos y que difícilmente requieran reparaciones futuras.

## **2.2 Características**

El concreto antibacterial tiene características físicas iguales a los concretos convencionales, pero que por su principal propiedad, la baja permeabilidad y la adición de un aditivo especial (antibacterial), reduce y controla la proliferación de microorganismos como bacterias, hongos, moho; además de evitar los ataques de agentes externos en el ambiente, que llegan a depositarse en la superficie de los concretos y que llegan a penetrar en su masa.

Además de ser un concreto elaborado, transportado y colocado con equipo y condiciones iguales que los convencionalmente fabricados por la industria del concreto premezclado.

## **2.3. Propiedades**

### **2.3.1. Resistencia**

La resistencia del concreto es comúnmente considerada como la propiedad más valiosa. La resistencia suele dar un panorama general de la calidad del concreto, por estar directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento.

En términos generales, la resistencia mecánica (compresión o tensión) que potencialmente puede desarrollar el concreto depende de la resistencia individual de los agregados y de la pasta de cemento endurecido, y la adherencia que se produce entre ambos materiales.

La selección de los materiales para la elaboración de este tipo de concretos debe ser muy cuidadosa, además de tener ciertas características especiales, las cuales se comentaran en el siguiente capítulo. Con la selección adecuada de los materiales, y logrando evitar que se presenten discontinuidades en la etapa del concreto (ver tabla 2.1), se logrará obtener la resistencia requerida por el proyecto.

Se ha determinado que en resistencias a compresión desde 300 kg/cm<sup>2</sup> y hasta 600 kg/cm<sup>2</sup>, la permeabilidad es inversamente proporcional al incremento de la resistencia. Cuando los incrementos de resistencias superiores a los 600 kg/cm<sup>2</sup>, se logran principalmente con altos consumos de cemento, el calor de hidratación generado podría resultar en microfisuramientos<sup>4</sup>. Para reducir el calor de hidratación es necesario el uso de puzolanas y aditivos, este aspecto se tratará en el siguiente capítulo.

Sin embargo, es pertinente hacer notar que el uso de la resistencia mecánica del concreto como índice general de su aptitud para prestar un buen servicio permanente, no siempre es acertado por que hay ocasiones en que pueden ser más importantes otras características y propiedades del concreto, de acuerdo con las condiciones específicas en que opera la estructura. Inclusive es costumbre especificar y aceptar la calidad del concreto con base solamente en la resistencia mecánica, es una de las causas que suelen originar problemas de durabilidad en las estructuras, debido a que una resistencia suficiente no siempre es garantía de una duración adecuada del concreto en servicio.

### 2.3.2. Durabilidad

La durabilidad del concreto a través de la vida de una estructura es una de sus propiedades más importantes, porque es esencial que sea capaz de resistir las condiciones para las cuales ha sido diseñado.

Una larga vida de servicio es considerada sinónimo de durabilidad. Según el comité ACI 201, la durabilidad del concreto de cemento portland se define como su capacidad para resistir la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga al medio ambiente.

Una material alcanza el final de su vida de servicio, cuando sus propiedades bajo ciertas condiciones de uso se han deteriorado a tal punto que continuar utilizando tal material se considera ya sea inseguro, o antieconómico.

<sup>4</sup> B. MARTÍNEZ SÁNCHEZ, *Materiales de Construcción, La Prueba de Permeabilidad Rápida a Cloruros como Índice de la Durabilidad de las Estructuras de Hormigón*, Instituto Eduardo Torroja, vol. 53, nos. 271-272, Madrid/España, Julio-Diciembre de 2003, pág. 176.

Se acepta generalmente ahora, que al diseñar estructuras, las características de durabilidad de los materiales considerados deberán evaluarse tan cuidadosamente como otros aspectos como las propiedades mecánicas y el costo inicial.

Cada vez más, los costos de reparación y de sustitución de las estructuras que se requieren por fallas del material, se han convertido en una parte importante del presupuesto total de la construcción. Por ejemplo, se calcula que en los países industrialmente desarrollados, más de 40% de los recursos totales de la industria de la construcción se aplican a la reparación y al mantenimiento de las estructuras existente, y menos de 60% a las nuevas instalaciones. La escalada de los costos de sustitución de las estructuras y el creciente énfasis en el costo del ciclo de vida y no del costo inicial, están obligando a los ingenieros a estar conscientes de la durabilidad<sup>5</sup>.

La falta de durabilidad puede ser causada por agentes externos en el ambiente o por agentes internos dentro del concreto. Las causas se clasifican en físicas, mecánicas y químicas. Las causas físicas provienen de la acción de la congelación y de las diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento, mientras que las causas mecánicas están asociadas principalmente con la abrasión, y las químicas son debido a: ataque de sulfatos, ácidos, agua de mar y también cloruros.

Unas de las maneras de tener una estructura con una larga vida, es utilizar un concreto durable, que soporte los ataques de los agentes dañinos. Una manera de lograr esto, es hacer un concreto con una muy baja permeabilidad, justamente esta es una de las principales propiedades del concreto antibacterial, lo cual para lograr esta propiedad se requiere de una serie de características que se comentan en seguida.

### 2.3.3. Permeabilidad

La necesidad de información sobre la permeabilidad del concreto data desde principio de los años treinta. Los diseñadores de presas y de otras grandes estructuras hidráulicas, necesitaban conocer la velocidad a la cual el agua pasaba a través del concreto que estaba sujeto a presiones hidráulicas relativamente altas.

<sup>5</sup> P. KUMAR MEHTA y PAULO J. M. MONTEIRO, *Concreto: Estructura, Propiedades y Materiales*, IMCYC, México, 1999, págs. 83-84.

Hoy en día hay un renovado interés en la permeabilidad del concreto. Pero este interés no se centra nada más en el flujo del agua a través del concreto en estructuras de obras para agua. Se relaciona más bien con la permeabilidad a las sustancias dañinas tales como los iones de cloruro del agua de mar, sulfatos, y otras sustancias químicas agresivas, y recientemente se han agregado las bacterias.

La permeabilidad de un material se define por la facilidad con que puede ser penetrado por un fluido, ya sea líquido o gaseoso, bajo determinadas condiciones de aplicación. En el caso del concreto interesa principalmente su permeabilidad al agua y al aire, dado que son los fluidos con los que ordinariamente tiene contacto<sup>6</sup>.

El papel del agua tiene que verse desde una perspectiva adecuada porque, como un ingrediente necesario para las reacciones de hidratación del cemento y como un agente plastificador para los componentes de las mezclas de concreto, el agua está presente desde el principio. Gradualmente y dependiendo de las condiciones ambientales y del espesor del elemento de concreto, la mayor parte del agua evaporable en el concreto (toda el agua capilar y una parte del agua absorbida), se perderá, dejando los poros vacíos o insaturados. Puesto que es el agua evaporable la que es congelable y la que también está libre para movimiento interno, un concreto no será vulnerable a los fenómenos destructivos relacionados con el agua siempre que haya quedado poca o ninguna agua evaporable después del secado y siempre que la siguiente exposición del concreto al ambiente no conduzca a la restauración de los poros, ya que esto contribuirá al riesgo de corrosión del acero de refuerzo, y al deterioro prematuro del concreto en general<sup>7</sup>.

La permeabilidad al aire es importante por que favorece al fenómeno de carbonatación, con sus consiguientes efectos perjudiciales sobre la contracción del concreto.

La permeabilidad del concreto en general depende de su porosidad, y ésta a su vez depende de la relación agua/cemento con que se elaboran. Los concretos que se elaboran con altas relaciones agua/cemento resultan más porosos y permeables, y por consiguiente son más fáciles de penetrar por el aire y las bacterias, y por ello son más proclives a sufrir los efectos de la carbonatación.

<sup>6</sup> Cfr. C.F.E., Instituto de Ingeniería de la UNAM, sección 3, op. cit., pág. 219.

<sup>7</sup> Cfr. P. KUMAR MEHTA y PAULO J. M. MONTEIRO, op. cit., pág. 86.

Sin duda es ésta una de las propiedades más importantes del concreto antibacterial, ya que al contar con una muy baja permeabilidad obtenemos uno de nuestros principales objetivos en la actualidad, un concreto durable, además de prolongar la vida útil de la estructura, debido a que no se permite el ataque de los agentes, tanto físicos y químicos. Con ello logramos una alta probabilidad de no sufrir degradaciones durante su vida útil con programas de mantenimiento casi nulos y que difícilmente requieran reparaciones futuras.

Por la tanto podemos decir que la permeabilidad está determinada principalmente por la relación agua/cemento, el proceso de curado, y por los inclusión de aditivos químico y minerales; estas dos últimas actividades se comentarán más adelante.

### 2.3.3.1. La influencia de la relación agua/cemento

La relación agua/cemento ( $a/c$ ), no solamente afecta la resistencia a la compresión del concreto sino que también afecta la permeabilidad. Pequeños cambios en la relación  $a/c$  pueden significar grandes diferencias en la permeabilidad<sup>8</sup>.

La relación  $a/c$  se define como el peso del agua presente por unidad de peso de cemento. Una relación de 0.5 significa que la pasta de cemento está compuesta por 50 kg de agua por cada 100 kg de cemento. A menor relación  $a/c$ , mayor es la concentración de la pasta. A mayor relación  $a/c$ , mayor es la dilución de la pasta<sup>9</sup>.

A menores relaciones  $a/c$ , la concentración creciente de granos de cemento en la pasta deja menos espacio entre ellos para ser ocupados por el agua, es decir, los granos están más unidos unos con otros. En resumen, hay mayor espacio entre los granos de cemento de una pasta a medida que aumenta la relación  $a/c$ .

Inicialmente, el espacio entre los granos de cemento forma una red continua, llena de agua, formada por los poros capilares (ver figuras 2.1 y 2.2)<sup>10</sup>. A medida que los granos de cemento se van hidratando, generan cristales que bloquean los poros (ver figura 2.3)<sup>11</sup> y esto hace al concreto menos permeable. Los pequeños poros son bloqueados más fácilmente que

<sup>8</sup> KENNETH C. HOVER, *Cerrando los Vacíos: Como Hacer Concreto menos Permeable y más Durable*, en Boletín del Instituto Colombiano Productores de Concreto, n. 47, Colombia, Octubre-Diciembre de 1989.

<sup>9</sup> Ibid.

<sup>10</sup> Ibid.

<sup>11</sup> Ibid.

los grandes y mientras más granos de cemento se tengan (menor relación a/c) el bloque será mayor, con lo que se consigue una menor permeabilidad y un concreto más durable.

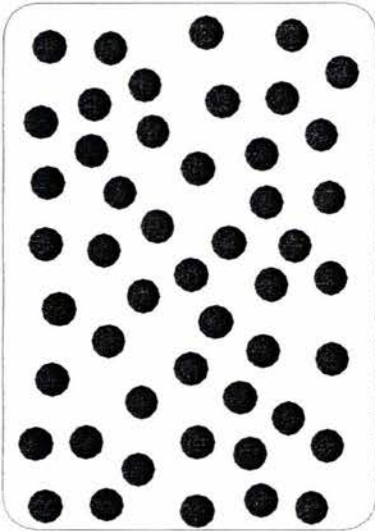


Fig. 2.1. Esta representación de la concentración del cemento en agua ( $a/c=0.4$ ) muestra los pequeños poros de capilaridad (espacios llenos de agua). Durante el curado, los productos de la hidratación bloquean los poros creando un concreto más durable y menos permeable.

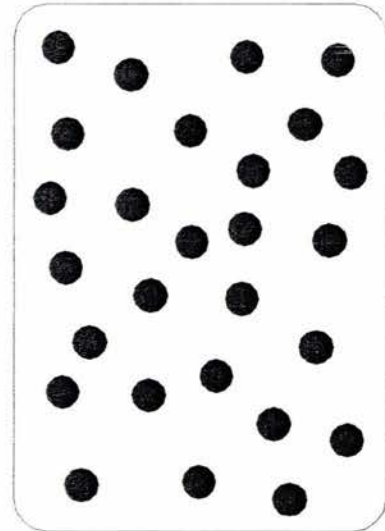


Fig. 2.2. Esta representación de la concentración del cemento en agua ( $a/c=0.7$ ) muestra los grandes poros de capilaridad que se desarrollan. Los granos de cemento no se encuentran lo suficientemente cerca para cerrar los poros durante la hidratación. Este concreto es muy permeable.

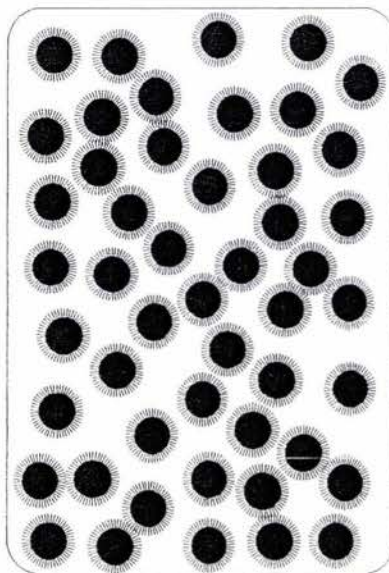


Fig. 2.3. Esta representación del cemento hidratado muestra como los productos de la hidratación, en una pasta con una relación a/c baja, bloquean los poros de capilaridad. El concreto es casi impermeable.



La porosidad de la pasta de cemento en un momento dado depende de la relación a/c con que se elabora y del estado de avance en su hidratación, el cual puede ser referido al tiempo que transcurre desde su elaboración, si las condiciones de humedad y temperatura son favorables. Así, en la fig. 2.4<sup>12</sup>, se indica la variación de la permeabilidad de pastas con diferente relación a/c, de acuerdo con el avance en el tiempo de hidratación. Como ahí se observa, para propiciar una reducida permeabilidad en la pasta y en el concreto se requiere emplear una baja relación a/c y concederle un tiempo de hidratación adecuado (por lo menos 28 días).

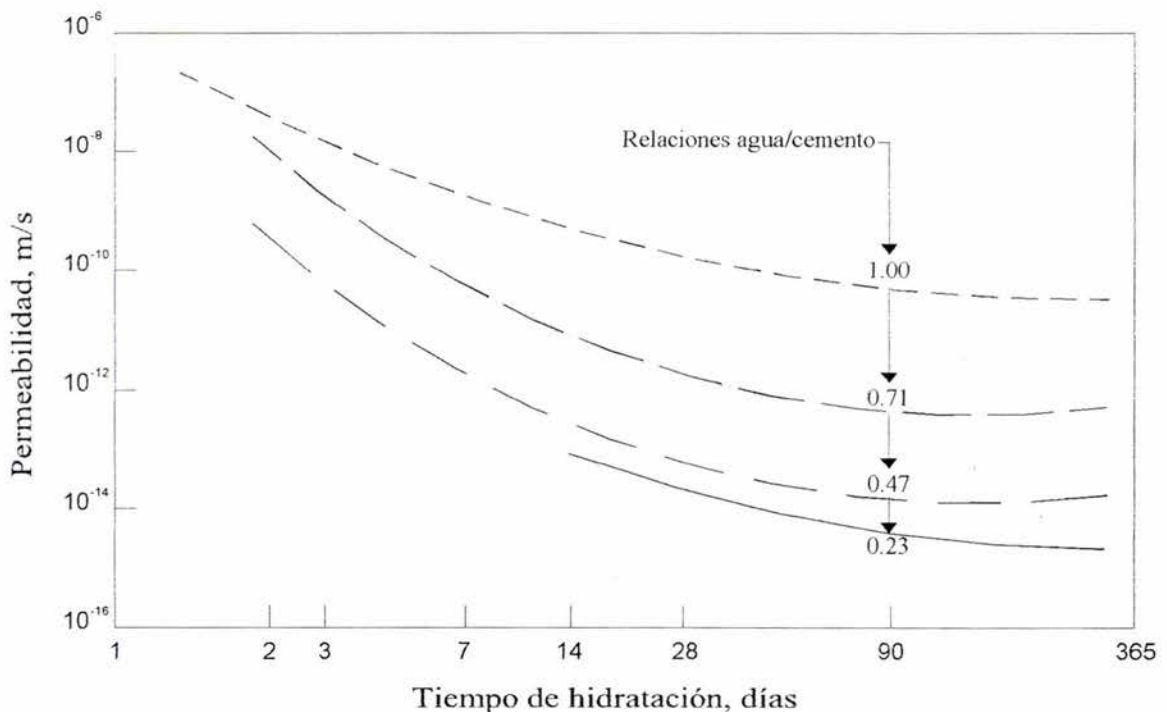


fig. 2.4. Variación de la permeabilidad de pastas con diferente relación agua/cemento, de acuerdo con el tiempo de hidratación.

Con base en este vínculo entre la relación a/c y la permeabilidad de la pasta, cuando se requiere inducir una baja permeabilidad en el concreto, es usual prescribir un límite máximo para la relación a/c que debe utilizarse en su elaboración. Tal requerimiento tiene normalmente el propósito de inhibir la penetración en el concreto de sustancias o agentes deteriorantes que se hallan presentes por sí solos o mezclados en el medio de contacto de la estructura. A modo de ejemplo en la tabla 2.2 se indican algunos valores máximos recomendados de la relación

<sup>12</sup> Cfr. C.F.E., Instituto de Ingeniería de la UNAM, sección 3, op. cit., pág. 224.

a/c, para concretos que deben prestar servicio en condiciones de exposición donde se requiere propiciar una baja permeabilidad de los mismos, con el fin de proteger a la estructura contra el deterioro predecible<sup>13</sup>.

Condiciones de riesgo de deterioro en que se requiere baja permeabilidad del concreto	Relación agua/cemento máxima recomendada	Intervalo de magnitud probable del coeficiente de permeabilidad de la pasta madura, m/s
Según ACI 201: Alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo	0.4	$7.5 \times 10^{-15} / 2.5 \times 10^{-14}$
Ataque severo por sulfatos y/o mediano riesgo de corrosión del acero de refuerzo	0.45	$10 \times 10^{-15} / 5 \times 10^{-14}$
Ataque moderado por sulfatos y/o riesgo moderado de corrosión del acero de refuerzo	0.5	$2.5 \times 10^{-14} / 7.5 \times 10^{-14}$
Según ACI 301: Exposición a la intemperie en lugares de clima frío (por efecto de congelación y deshielo, ysales descongelantes)	0.53	$5 \times 10^{-14} / 10 \times 10^{-14}$

**Tabla 2.2. Valores máximos recomendados de la relación agua/cemento, para condiciones en que se requiere obtener baja permeabilidad en el concreto.**

Por lo tanto la relación agua/cemento debe ser lo más bajo posible, nunca mayor de 0.6, preferible bajo 0.5. En concretos expuestos a ambientes muy agresivos, la relación agua/cemento no debe ser mayor a 0.4.

Para efecto de poder lograr que el concreto antibacterial (impermeable), evite la penetración de agentes dañinos, es necesario usar una relación a/c menor a 0.4.

<sup>13</sup> Ibid., pág. 225.

### 2.3.3.2. La prueba de permeabilidad rápida a cloruros como índice de la durabilidad de las estructuras de concreto<sup>14</sup>.

A partir de 1983, la prueba de permeabilidad rápida de cloruros (RCPT), fue adoptada por la American Association of State and Highway Transportation Officials (ASTHO T 277) y por la American Society for Testing and Materials, (ASTM C 1202), este método, “Estándar Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” determina la resistividad que presenta el concreto al paso del ion cloruro en tan sólo 6 horas, al inducir un voltaje que polariza dos soluciones en positivo y negativo obligando a los iones de cloruro a penetrar en el concreto.

Muchas y muy variadas son las opiniones acerca de la confiabilidad y eficiencia de la prueba, lo cierto es que, como en cualquier método experimental, la eficiencia dependerá, casi por completo, del grado de entendimiento y de la adecuada interpretación de resultados. Hoy en día, a pesar de todos los argumentos a favor y en contra del método, la RCPT es una prueba de calificación por durabilidad extensamente usada como especificación.

La edad de pruebas es un factor fundamental en los resultados de la prueba, a pesar que las normas para pruebas de permeabilidad no indican una edad de manera estricta, es recomendable que se hagan a edades tardías de 90 días o más. Debido a que en este periodo la reacción del hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , con los cementantes, ha alcanzado un desarrollo óptimo, sobre todo cuando se contemplan adiciones minerales. Cuando son probados los concretos a edades menores a los 28 días, se pueden producir incrementos súbitos en el amperaje y, con ello, en la temperatura de las soluciones modificando la velocidad de hidratación de los silicatos hidratados de calcio (S-H-C) y la naturaleza de la estructura porosa.

Además de las deficiencias que las muestras pueden provocar, existen problemas que pueden presentarse si los procedimientos o equipos de prueba no son los adecuados, o bien se cambia de operador o de laboratorio; algunas de estas deficiencias pueden provocar variaciones de hasta 50% en los resultados finales.

<sup>14</sup> Cfr. B. MARTÍNEZ SÁNCHEZ, op. cit., págs. 165-168.

Debido a que el diseño de la RCPT indica el movimiento de todos los iones en la estructura y no solamente los de cloro, cuando se usan adicionantes minerales o aditivos como reductores de agua, superfluidificantes o inhibidores de corrosión en exceso, pueden presentarse resultados erróneos, ya que existe una modificación de la composición química de la estructura porosa.

Sin, embargo, cuando estas deficiencias son entendidas y se toman las medidas necesarias para no incurrir en ellas, este método de prueba puede ser altamente funcional y fiable, una de las mayores ventajas, es que la obtención de resultados se hace en un tiempo relativamente corto y la interpretación de éstos no dependerá del técnico, si no de los propios márgenes que la propia norma marca, además, la correlación existente con la prueba AASHTO T 259 es bastante aceptable, aun utilizando aditivos minerales, como metacaolin o humo de sílice.

Tan es así, que este método de prueba, además de ser el rector de la calidad de especificaciones por durabilidad en diversos proyectos alrededor del mundo, es empleado también como evaluación del uso de materiales destinados a reducir la permeabilidad, como resinas epóxicas o selladores superficiales, u concretos que contemplan diversas adiciones de materiales cementante suplementarios donde se han obtenido ganancias en la disminución de la permeabilidad con el uso de humo de sílice de hasta el 90%. De igual manera, esta prueba se ha utilizado para analizar el comportamiento de otros adicionantes minerales como ceniza volante y para establecer la relación existente entre la resistividad y la constante de permeabilidad del concreto obtenida por métodos que funcionan con presión atmosférica.

#### **2.3.4. Trabajabilidad**

El principal atributo del concreto en estado fresco es el que se designa como “trabajabilidad” y que, de acuerdo con el Comité ACI 116, es aquella propiedad del concreto que determina la facilidad y homogeneidad con que puede ser mezclado, transportado, colocado, compactado y acabado. Cuando se habla de facilidad, puede interpretarse como el requerimiento de poco esfuerzo para que la mezcla se deforme y fluya, en otros términos, que su consistencia sea acorde con los medios de trabajo. En lo que respecta a la homogeneidad el concepto es más claro, pues evidentemente se refiere al hecho de conservar la distribución relativa de los componentes del concreto, durante y después de la realización de todas las

operaciones indicadas, es decir, que no se produzca segregación ni sangrado, en magnitud objetable.

De acuerdo con el Comité ACI 309, hay tres principales características funcionales del concreto en estado fresco que determinan su trabajabilidad:

**a) Estabilidad**

Esta característica se refiere a la resistencia que las mezclas oponen para segregarse y exudar agua (sangrado); en otras palabras, representa su disposición para conservarse homogéneas.

**b) Compactabilidad**

Corresponde a la facilidad con que las mezclas de concreto permiten la remoción del aire atrapado durante el moldeo, a fin de lograr un alto grado de compacidad en el concreto endurecido.

**c) Movilidad**

Representa la aptitud de las mezclas de concreto para deformarse y fluir; cuya característica depende de la cohesión, viscosidad y ángulo de fricción interna del concreto fresco.

Por otra parte, es pertinente mencionar, que el atributo de la trabajabilidad en el concreto fresco no es solamente una propiedad intrínseca del mismo, sino que también depende de factores extrínsecos relacionados con el uso a que se destina y la forma como se utiliza, y que además su evaluación es un tanto subjetiva, pues frecuentemente se apoya en el juicio personal de quien construye o de quien supervisa.

Cuando se requiere utilizar concreto para la construcción de una estructura, lo conveniente es que las características que el concreto en estado fresco deba poseer se definan de acuerdo con los requisitos impuestos por la propia estructura, y que los procedimientos y equipos de trabajo sean los adecuados para operar con un concreto de las características así establecidas. Es decir, la definición de las mezclas de concreto, los procedimientos de construcción y los equipos de trabajo deben de supeditarse a los requerimientos de la

estructura, ya sea por consideraciones geométricas, dimensionales, de refuerzo o de exposición y servicio.

Planteado de esta manera, puede decirse que la práctica correcta consiste en que las operaciones con el concreto fresco se realicen empleando procedimientos y equipos apropiados a las características del concreto requerido para un uso específico. En tales condiciones, si resulta posible juzgar comparativamente la trabajabilidad de diferentes mezclas de concreto, y concluir si una mezcla es o no trabajable por esos medios, para el uso indicado.

Como se mencionó, para la elaboración del concreto impermeable se requiere una baja relación agua/cemento, lo que nos conduce a una masa densa, con lo cual no obtendríamos la trabajabilidad que se requiere en el concreto fresco, una manera de obtener todas estas características planteadas de la trabajabilidad es la adición de aditivos, con lo cual obtenemos una muy buena trabajabilidad. Los tipos de aditivos que se requieren para lograr esta propiedad, se comentaran en el siguiente capítulo.

### **2.3.5. Inhibición del Crecimiento de Microorganismos**

Como ya se dijo, con este concreto antibacterial, se logrará evitar la penetración de agentes dañinos, como lo son: los sulfatos, cloruros, además de las bacterias. A estas últimas se evitara su desarrollo y reproducción, así como también evitar que se conviertan en focos de infección, logrando así, estructuras con un mayor grado de salubridad.

Una de las maneras de evitar la penetración de bacterias es tener una muy baja permeabilidad en el concreto (hacer un concreto impermeable), además de esta propiedad es necesario la utilización de un aditivo especial (antibacterial)<sup>15</sup> que se encargará de la inhibición del crecimiento y reproducción de las bacterias tanto en la superficie del concreto como en el interior del concreto. Este aditivo es el que le da al nombre al concreto antibacterial, el cual tiene la función de un fungicida y germicida, pero con un menor grado de toxicidad en comparación con las agentes desinfectantes que se utilizan normalmente para eliminar las bacterias, los cuales tienen iones de metales pesados, que pueden llegar a ser perjudicial para los seres humanos.

---

<sup>15</sup> Cfr. ACI 212.3 R-91

### 2.3.5.1. Tipos de microorganismos

En nuestro medio ambiente existen una gran variedad de microorganismos responsables de enfermedades e infecciones desde las más leves hasta letales. Estos microorganismos tienen la capacidad de desarrollarse prácticamente en cualquier medio y reproducirse de una manera impresionante, con lo cual pueden convertirse en focos de infección en muy poco tiempo<sup>16</sup>.

Los microorganismos se clasifican en Gram positivos y Gram negativos. En las bacterias Gram positivas se encuentran las que provocan supuraciones, infecciones en la piel y mucosas, como es el caso del staphylococcus y el streptococcus. Las bacterias Gram negativas pueden producir enfermedades tales como tifoidea, salmonellosis, infecciones intestinales, como es el caso de las bacterias Escherichia Coli, Salmonella o Klebsiella<sup>17</sup>.

### 2.3.5.2. Pruebas para detectar microorganismos

El concreto antibacterial es producido con los más altos estándares de calidad. Su muy baja permeabilidad y la adición del aditivo antibacterial, permite reducir la reproducción de los microorganismos, lo cual ha sido demostrado por medio de pruebas microbiológicas, tal como la determinación del recuento total de bacterias mesofilicas aerobias, de acuerdo a la NOM-092-SSA1-1994<sup>18</sup>.

La efectividad de la acción del concreto antibacterial en el control de formación de colonias de microorganismos, también ha sido demostrada por medio de pruebas microbiológicas como es el método Kirby-Bauer-modificado<sup>19</sup>, en donde se demuestra que este producto inhibe el crecimiento de los microorganismos en el concreto formándose una zona exterior donde no existe crecimiento de los mismos.

<sup>16</sup> ROSA ELBA RODRÍGUEZ CAMACHO, *Concreto Profesional Antibacteriano*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, n. 140, México D.F., Enero de 2000.

<sup>17</sup> ROSA ELBA RODRÍGUEZ CAMACHO, *El Concreto Antibacteriano, Estudio Sobre su Capacidad de Inhibición Microbiana*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, n. 149, México D.F., Octubre de 2000.

<sup>18</sup> Cfr. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-092-SSA1-1994: "Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa".

<sup>19</sup> [www.cemex.com.mx](http://www.cemex.com.mx)

## CAPÍTULO 3

# SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

### 3.1. El cemento

Todos los cementos para concreto hidráulico que se producen en México son elaborados a base de clinker portland, por cuyo motivo se justifica centrar nuestro interés en éste y en los cementos que da lugar.

En el proceso para definir y especificar el concreto potencialmente idóneo para cada aplicación en particular, es de trascendental importancia la definición del cemento apropiado, ya que de éste dependerán significativamente las características y propiedades de la matriz cementante y por consiguiente del concreto.

Las condiciones que deben tomarse en cuenta para especificar el concreto idóneo y seleccionar el cemento adecuado para una obra, pueden determinarse por la indagación oportuna de dos aspectos principales: 1) las características propias de la estructura y de los equipos y procedimientos previstos para construirla, y 2) las condiciones de exposición y servicio del concreto, dadas por las características del medio ambiente y del medio de contacto y por los efectos previsibles resultantes del uso destinado a la estructura.

#### 3.1.1. Tipos de cemento

Primero será necesario hacer un recuento de las clases y tipos de cemento para concreto hidráulico que efectivamente se producen en México. Según la nueva norma para cementos en México, NMX-C-414-ONNCCE<sup>20</sup> los tipos de cemento son:

---

<sup>20</sup> Cfr. NORMA MEXICANA NMX-C-414-1999-ONNCCE: "Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba".



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

**Tabla 3.1. Tipos de cemento por su composición**

Los cementos también se clasifican por su resistencia mecánica a la compresión en cinco clases resistentes de acuerdo con la tabla 3.2.

Clase resistente	Resistencia a compresión (N/mm <sup>2</sup> )			Tiempo de fraguado (minutos)		Estabilidad de Volumen en autoclave (%)	
	3 días	28 días		inicial	final	Expansión	Contracción
	mínimo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	máximo	máximo
20	–	20	40	45	600	0.80	0.20
30	–	30	50	45	600	0.80	0.20
30 R	20	30	50	45	600	0.80	0.20
40	–	40	–	45	600	0.80	0.20
40 R	30	40	–	45	600	0.80	0.20

**Tabla 3.2. Cementos con diferente tipo de resistencia**

También existen cementos con características especiales como:

Características Especiales	
RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja Reactividad Alcali agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

**Tabla 3.3. Cementos con características especiales**

Podemos hacer de las tres tablas presentadas, una sola con las 3 características mencionadas de los cementos, y así tener una idea más clara, a la hora de elegir el tipo de cemento que vayamos a utilizar.

Tipo	Denominación	Clase Resistente	Características Especiales
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20 Mpa	RS (Resistente a los sulfatos)  BRA (Baja Reactividad Álcali Agregado)  BCH (Bajo Calor de Hidratación)  B (Blanco)
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	30 Mpa	
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R Mpa	
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40 Mpa	
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	40 Mpa	
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	40 R Mpa	

**Tabla 3.4. Productos a seleccionar**

Como mencionamos la selección del cemento dependerá de: 1) las características propias de la estructura, de los equipos y procedimientos previstos para construirla, y 2) las condiciones de exposición y servicio del concreto; con base en esto, seleccionaremos nuestro tipo de cemento, los cuales, pueden requerir de una o más características especiales.

Por ejemplo:

<b>Cemento portland ordinario</b>	+	<b>40</b>	=	<b>CPO 40</b>				
(Tipo de cemento)		(clase resistente)						
<b>Cemento portland compuesto</b>	+	<b>30</b>	+	<b>R</b>	=	<b>CPC 30 R</b>		
(Tipo de cemento)		(clase resistente)		(Resistencia Inicial)				
<b>Cemento portland compuesto</b>	+	<b>30</b>	+	<b>R</b>	+	<b>blanco</b>	=	<b>CPC 30 RB</b>
(Tipo de cemento)		(clase resistente)		(Resistencia Inicial)		(Caract. Especial)		
<b>Cemento portland puzolánico</b>	+	<b>30</b>	+	<b>R</b>	+	<b>resistente a los sulfatos</b>	=	<b>CPP 30 R RS</b>
(Tipo de cemento)		(clase resistente)		(Resistencia Inicial)		(Caract. Especial)		

De acuerdo con estudios realizados por el Instituto Eduardo Torroja, en la prueba de permeabilidad rápida a cloruros, se obtienen los siguientes resultados:

Es evidente que conforme se incrementa el consumo de cemento, la tasa de permeabilidad disminuye considerablemente, logrando reducciones cercanas al 50%. A medida que el consumo de cemento aumenta, el diferencial entre un nivel y el inmediato disminuye, obteniendo los mayores beneficios entre los consumos de 250 y 300 kg/m<sup>3</sup>. Este comportamiento se presenta con mayor claridad en el CPP, logrando en los rangos de 300 y 350 kg/m<sup>3</sup>, una disminución de 45% sin embargo,, al pasar de un consumo de 350 a 400 kg/m<sup>3</sup> esta disminución se mantiene prácticamente igual, ganado apenas un 3% extra. Para el caso del CPO, los beneficios obtenidos con los diferentes consumos, el diferencial llega a ser del 25%, y va disminuyendo paulatinamente hasta llegar a 17% entre los consumos de 350 kg/m<sup>3</sup>.

Por lo tanto, para el caso del tipo de cemento, la influencia en la permeabilidad es mínima, además de ser atenuada por cualquier otro factor implícito en el diseño de mezcla, pero el diferencial mantiene al cemento CPP por delante en todos los análisis realizados.

En el análisis de los resultados combinando el uso de Adiciones Cementantes Suplementarias "ACS" (Puzolanas), tipo de árido grueso y tipo de cemento, es claro que las ACS son el factor fundamental para la disminución de la tasa de permeabilidad.

### **3.2. Los Agregados**

Es reconocido que más del 60% de cada metro cúbico de concreto fabricado está constituido por los agregados, condición que destaca la importancia que tienen estos materiales en la elaboración de este producto. Bajo esta condición, las características de los materiales que los forman y los efectos de su uso en el concreto se han estudiado con mucho mayor detalle, de tal forma que se pueda producir un concreto de mejores características en estado fresco y con una mayor durabilidad.

## Características físicas y químicas

Las características de los agregados que es conveniente evaluar antes de ser empleados en la fabricación de concreto son<sup>21</sup>:

Característica	Pruebas aplicables	
	NMX	ASTM
Granulometría	C-111	C 33
Limpieza	C-111	C 33
· Finos indeseables		D 2419
· Materia orgánica	C-88	C 40
· Partículas inconvenientes	C-84/C-71/C-75/C-172	C117/C142/C88/123
Densidad	C-164/C-165	C 127/C 128
Sanidad	C-75	C 88
Absorción y Porosidad	C-164/C-165	C 127/C 128
Forma de Partícula	C-265/C-165	C 295/C 128
Textura Superficial	C-265	C 295
Reactividad con los álcalis		
· Examen petrográfico	C-265	C 295
· Método químico	C-271/C-272	C 289/C 586
· Barras de mortero	C-180	C 227/C 1105

Debido a la importancia que tiene el especificar y clasificar los agregados de concreto para una obra, es necesario tomar en cuenta lo siguiente:

1. Características y requisitos a cumplir de la estructura que se va a fabricar.
2. Agregados disponibles en el sitio.
3. Composición granulométrica de los agregados a emplear.

## Granulometría

### Agregado Fino (arena)

Constituido nominalmente por partículas cuyo tamaño está entre 0.075 y 4.75 mm, en donde es deseable que exista continuidad granulométrica, es decir que exista presencia de todos los tamaños representantes de las diferentes fracciones que están establecidas.

<sup>21</sup> [www.cemex.com.mx](http://www.cemex.com.mx)

Es importante comentar que si bien es útil que el agregado fino cumpla con la continuidad granulométrica, resulta poco prudente el especificar la arena con base a esta característica, ya que un adecuado diseño de mezclas o bien el uso de aditivos en el concreto, permite disminuir los posibles efectos no deseados por una deficiencia de esta característica del agregado.

### **Agregado Grueso**

Es el que queda en el intervalo nominal comprendido desde 4.75 mm hasta la dimensión máxima que contenga el concreto, magnitud que define el tamaño máximo en cada caso. Al igual que en el agregado fino, es deseable que exista una continuidad granulométrica de la fracción. Por lo anterior, es claro que el límite superior del agregado grueso es el que rige la curva granulométrica a especificar para cada tipo de concreto, de acuerdo con sus necesidades constructivas.

De igual forma que en el agregado fino, los efectos por una deficiente composición granulométrica pueden ser disminuidos, vía la aplicación adecuada de la tecnología de concreto.

### **Limpieza**

#### **Finos indeseables (limo y arcilla)**

En forma general, para la especificación de esta característica hay dos criterios para la utilización de agregados en concretos:

<b>Finos que pasan la malla No. 200</b>	<b>Norma aplicada NMX C-111</b>	
	Arena (%)	Grava (%)
Finos de cualquier tipo	5.0	2.0
Finos sin arcilla	10.0	3.0
	% máximo permitido aplicable	

Para conocer el carácter arcilloso de los finos que pasan la malla No. 200, es aplicable la prueba de equivalente de arena.

### Materia orgánica

La especificación de esta característica de los agregados limita el contenido de este producto con base en una clasificación colorimétrica, en donde un tono más oscuro que el color de referencia es condición que se considera como una presencia excesiva, y por tanto es causa de rechazo.

### Partículas inconvenientes

Esta especificación se realiza con base en el tipo de partícula presente en el agregado, de acuerdo a lo siguiente:

Carbón y lignito en la arena	0.50 a 1.0%
Calcedonia de peso específico menor a 2.40	3.0 a 8.0%
Terrones de arcilla	ver material que pasa la malla No. 200

### Densidad

No hay una especificación sobre los límites de aceptación para esta característica, principalmente porque no tiene correlación con el grado de sanidad de los materiales que se analizan. Además, depende del peso unitario del concreto que se va a producir, dividiéndose para ello en ligero, normal y pesado.

### Sanidad

La sanidad se define como la condición de un sólido que se halla libre de grietas, defectos y fisuras. Esta propiedad tiene mucha importancia porque es un buen índice del desempeño predecible del agregado al ser usado en concreto.

La especificación para esta característica indica los siguientes límites:

	NMX C-111
Agregado fino	10% máximo
Agregado grueso	12% máximo

## **Absorción y Porosidad**

No hay una especificación sobre el límite de aceptación de esta característica, dado que esta depende de muy diversos factores, tales como: contenido de finos, forma y textura superficial de las partículas, porosidad de la roca y distribución granulométrica. Se reconoce como información válida, sin embargo, que cuando se tienen rocas de buena calidad física y los agregados cumplen las otras especificaciones que se le solicitan, el agregado grueso no rebasa el 3% de la absorción, así como el agregado fino no supera el 5% máximo.

## **Forma de Partícula**

En términos generales, no existe una especificación estricta para esta característica que evalúe la redondez y esfericidad de los agregados, ya que es demostrable que en condiciones idénticas, son más adecuados los agregados de formas redondeadas para la producción de concretos con resistencias que no excedan los valores de 250 kg/cm<sup>2</sup>. Asimismo, es recomendable que para concretos que requieran desarrollar mayores resistencias a las de referencia, se haga uso de partículas de formas más angulosas. En el caso de la esfericidad evaluada por la presencia de partículas planas y alargadas, es recomendable que éstas no superen el 20% máximo de acuerdo con el comité ACI 207.

## **Textura Superficial**

Al igual que para la forma, no existe una especificación rigurosa para la textura superficial, ya que los diferentes tipos que existen producen efectos diversos en la fabricación de concreto.

## **Reactividad con los Alcalis**

Existen tres pruebas que evalúan esta característica de los agregados, independientemente de si la reacción es álcali-sílice o álcali-carbonato. Las tres son importantes por los elementos de juicio que aportan sobre el posible comportamiento del material al ser utilizado en la fabricación de concreto:

Método de prueba	Carácter del resultado	Evaluación
Estudio petrográfico	Definitivo, sólo material inocuo	C 295
Método químico	Definitivo, sólo material inocuo	C 289
Barras de mortero	Definitivo, estimación potencial	C 227

Es importante ya que califica cuál es el tipo de reacción que puede presentar el agregado, al identificar y cuantificar los materiales potencialmente reaccionantes. Valor de la expansión en relación con el tipo de reacción y su clasificación.

	Álcali-Sílice (NMX C-180)	Álcali- Carbonato (ASTM C 1105)
Inocuo	< 0.05% a tres meses	< 0.015% a tres meses
Moderadamente reactivo	> 0.05%, < 0.10%	> 0.015%, < 0.025%
Deletéreo	> 0.10 a seis meses	> 0.025% a seis meses

## Influencia de los agregados en el Concreto

### En estado fresco

Propiedad del concreto	Característica de los agregados que la influye
Peso unitario	Densidad Tamaño máximo/granulometría
Manejabilidad	Granulometría Forma de partícula
Contracción plástica	Limpieza Partículas fiables
Requerimiento de agua	Tamaño máximo/granulometría Sanidad Limpieza
Sangrado	Granulometría Forma de partícula
Pérdida de revenimiento	Absorción
Segregación	Tamaño máximo/granulometría



**En Estado Endurecido**

<b>Propiedad del concreto</b>	<b>Característica de los agregados que la influye</b>
Durabilidad	Limpieza Textura superficial Sanidad Absorción Porosidad Reactividad con los álcalis
Resistencia a compresión	Limpieza Tamaño máximo/granulometría Forma de partícula Resistencia mecánica Partículas fiables Textura superficial
Cambios volumétricos	Tamaño máximo/granulometría Forma de partícula Limpieza Presencia de arcilla Módulo de elasticidad
Costo	Tamaño máximo/granulometría Forma de partícula Textura superficial Limpieza
Resistencia a la abrasión	Resistencia a la abrasión
Peso unitario	Densidad
Permeabilidad	Porosidad

Los agregados para el concreto antibacterial, deben ser escogidos cuidadosamente por lo antes expuesto, el agregado grueso tiene un tamaño máximo más pequeño que en el concreto ordinario: en el concreto antibacterial, el tamaño máximo es, por lo regular, de 10 a 14 mm, existen dos razones para esto. Primero, con un tamaño máximo más pequeño, los esfuerzos diferenciales en la interfase de la pasta agregado-cemento “lo que podría llevar al microagrietamiento” son menores. En segundo lugar, las partículas de agregado más pequeñas son más fuertes que las grandes. Esto se debe al hecho de que la trituración de la roca remueve las imperfecciones más grandes, que son los que controlan la resistencia.

Además de no tener un tamaño máximo muy grande, el agregado grueso tiene que tener cierto número de características: debe ser fuerte y estar absolutamente limpio, es decir, libre de arcilla o polvo adherido, todo de acorde con la norma correspondiente. No debe contener sílice reactivo y tiene que ser equidimensional en su forma, es decir, ni rajuelado, ni alargado. Con muy pocas excepciones, se utiliza agregado triturado.

En cuanto al agregado fino, debe tener una granulometría gruesa, preferentemente con un modulo de finura de 2.7 a 3.0. Con el fin de alcanzar el buen empacamiento de las partículas finas en la mezcla, a medida que el contenido de cemento se incrementa, el agregado fino tienen que hacerse más grueso.

La influencia de los agregados gruesos es importante en la permeabilidad, ya que ésta se ve afectada por su porosidad, que es imposible de modificar. Sin embargo, el efecto negativo de un agregado poroso solo es nocivo con relaciones a/c de 0.55 a 0.45, ya que a partir de ir disminuyendo la relación a/c va perdiendo fuerza por la propia densidad y cantidad de la pasta.

### **3.3. El Agua**

En el caso del agua que se emplea en la fabricación de concreto, se considera que puede tener dos funciones principales en el proceso, la primera como agua de mezclado y la segunda como agua de curado.

Aunque en estas aplicaciones las características del agua tienen efectos de diferente importancia sobre el concreto, es usual que se recomiende emplear agua de una sola calidad en ambos casos. Así, normalmente, en las especificaciones para concreto se hace referencia en primer término a los requisitos que debe cumplir el agua para elaborar el concreto, por que sus efectos son más importantes, y después se indica que el agua que se utilice para curarlo debe ser del mismo origen, o similar, para evitar que se subestime esta segunda aplicación y se emplee agua con características inadecuadas.

Ambas funciones son evaluadas por la Norma NMX C-122<sup>22</sup> (ver tabla 3.5) estableciendo los parámetros que deben cumplir las aguas no potables, así como una

<sup>22</sup> Cfr. NORMA MEXICANA NMX-C-122-1982: "Industria de la construcción – agua para concreto".

clasificación de los diversos tipos de agua que existen y sus efectos y limitaciones para ser usadas en concreto.

La calidad del agua es importante, ya que las impurezas que contenga pueden interferir el endurecimiento del cemento, afectar negativamente la resistencia del concreto u ocasionar el manchado de su superficie, así como llevar a la corrosión del refuerzo.

- ✦ La calidad del agua se considera que ésta debe ser apta para beber.
- ✦ Contendrá sólidos disueltos por sobre 2000 (ppm) y por lo general menos de 1000 (ppm).
- ✦ Cualquier agua con un PH (grado de acidez) de 6.0 a 8.0 es útil.

### Clasificación del Agua (NMX C-122)

Tipo de agua	Efectos con su uso en el concreto
Aguas puras	Acción disolvente e hidrolizante de compuestos cálcicos del concreto.
Aguas ácidas naturales	Disolución rápida de los compuestos del cemento.
Aguas fuertemente salinas	Interrumpe las reacciones del fraguado de cemento. En el curado, disolución de los componentes cálcicos del concreto.
Aguas alcalinas	Produce acciones nocivas para cementos diferentes al aluminoso.
Aguas sulfatadas	Son agresivas para concretos fabricados con cemento Portland, en especial al tipo CPO.
Aguas cloruradas	Produce una alta solubilidad de la cal. Produce disolución en los componentes del concreto.
Aguas magnesianas	Tienden a fijar la cal, formando hidróxido de magnesio y yeso insoluble. En la mezcla, inhibe el proceso de fraguado del cemento.
Agua de mar	Produce eflorescencias. Incrementa la posibilidad de generar corrosión del acero de refuerzo.
Aguas recicladas	El concreto puede acusar los defectos propios del exceso de finos.
Aguas industriales	Por su contenido de iones sulfato, ataca cualquier tipo de cemento.
Aguas negras	Efectos imprevisibles.

Tabla 3.5. Clasificación del agua NMX C-122

### 3.4. Aditivos

Los aditivos pueden definirse como sustancias químicas o minerales que se agregan a la mezcla de concreto, mortero, con la finalidad de modificar una o varias de sus propiedades. De acuerdo al comité del ACI 116, el aditivo es un material distinto del agua, los agregados, el cemento hidráulico y las fibras de refuerzo, que se utiliza como ingrediente del mortero o del concreto, y que se añade a la revoltura inmediatamente antes o durante el mezclado.

Su utilización es con el propósito fundamental de modificar el comportamiento del concreto en estado fresco, y/o de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto endurecido.

Con la adición del aditivo al concreto, le confiere a éste las siguientes propiedades:

- ✦ Mejor aprovechamiento del cemento
- ✦ Aumento de las resistencias
- ✦ Mayor trabajabilidad
- ✦ Más compacidad
- ✦ Aumento de resistencia a los medios agresivos
- ✦ Supresión de la exudación y segregación
- ✦ Mayor impermeabilidad

#### 3.4.1. Tipos de aditivos

Los tipos de aditivos son los siguientes:

- ✦ **Aditivos Químicos**
  - Los clasificados por la ASTM C 494
  - Incorporadores de aire
- ✦ **Aditivos Minerales**
  - Puzolanas
  - Escorias de alto horno
- ✦ **Aditivos Diversos (Especiales)**

### 3.4.1.1. Aditivos químicos

Los *aditivos químicos*, de acuerdo con la norma ASTM C 494 (NMX C-255), se clasifican en:

- Tipo A Reductor de agua
- Tipo B Retardante (fraguado)
- Tipo C Acelerante (fraguado)
- Tipo D Reductor de agua y retardante
- Tipo E Reductor de agua y acelerante
- Tipo F Reductores de agua de alto Rango
- Tipo G Reductores de agua de alto rango y retardante

Los aditivos incorporadores de aire, tienen que estar en conformidad con la norma ASTM C 260. Este tipo de aditivos para concreto hidráulico, originan aire en pequeñas cantidades en forma de burbujas durante el mezclado, para dar una mejor trabajabilidad y una protección para congelación y deshielo.

Dada la importancia que estos representan en la elaboración del concreto impermeable, daremos una descripción más detallada sobre estos, así como los beneficios que obtenemos con el empleo de estos, como también algunos parámetros para su utilización.

#### **¿Qué son los aditivos reductores de agua?**

Aditivo que incrementa el revenimiento del concreto fresco sin incrementar el contenido de agua o que mantiene el revenimiento con una cantidad menor de agua, mediante factores ajenos a la incorporación de aire (ACI 116).

Con la aplicación de los aditivos reductores de agua, obtenemos las siguientes propiedades en el concreto:

#### *Propiedades del concreto fresco:*

- ✦ Disminución de la relación a/c
- ✦ Mejora la trabajabilidad
- ✦ Afecta el tiempo de fraguado
  - retardante/acelerante

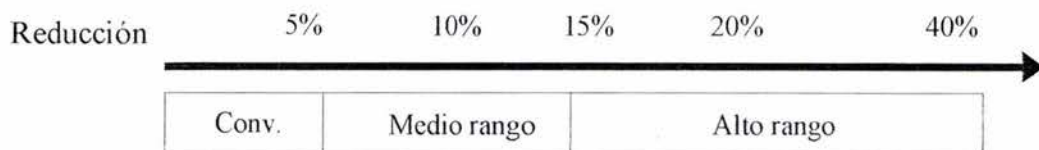
*Propiedades del concreto endurecido:*

- ✦ Incremento en la resistencia
- ✦ Mejor durabilidad
- ✦ Reducción de la permeabilidad
- ✦ Mejor control de calidad en producción

Los tipos de reductores de agua son;

- ✦ Convencional
  - ✦ Rango Medio
  - ✦ Alto rango (3<sup>ra</sup>)
  - ✦ Alto rango (4<sup>ta</sup>)
- } **Superplastificantes**

El porcentaje de reducción de agua que logran estos aditivos, es la siguiente:



Con la utilización de los aditivos para el control de fraguado (retardantes y acelerantes) se obtienen las siguientes ventajas y desventajas.

**Acelerantes:**

- ✦ Retardan el fraguado en clima frío
- ✦ Incrementan resistencias iniciales
- ✦ Acelera el proceso de construcción
- ✦ Puede disminuir la resistencia a partir de los 28 días
- ✦ Cloruros = corrosión

**Retardantes:**

- ✦ Incrementa el tiempo de fraguado
- ✦ Evita la formación de juntas frías
- ✦ Produce reducción de agua e incremento de resistencia a los 28 días

Las dosis en las que se utilizan los aditivos, están en relación a un pequeño porcentaje del peso del cemento, con las excepciones en las cuales se prefiere dosificar el aditivo en una proporción respecto al agua de amasado. Los aditivos líquidos se agregan generalmente en el mezclado del concreto junto con el agua de amasado. Los aditivos en polvo se mezclan junto con el cemento o el agregado fino.

### 3.4.1.2. Aditivos minerales

*Los aditivos minerales*, son los siguientes:

- ✦ Humo de sílice
  - ✦ Ceniza volante (Tipo C y F)
  - ✦ Naturales o calcinadas
  - ✦ Escoria de alto horno
- } **Consideradas ahora  
Puzolanas**

El principal material cementante en el concreto es el cemento portland. Hoy en día la mayoría de las mezclas de concreto contienen adiciones al cemento que constituyen una porción del material cementante en el concreto. Estos materiales son generalmente subproductos de otros procesos o materiales de origen natural. Ellos pueden o no ser procesados antes de ser utilizados en los concretos. Algunos de estos materiales son denominados puzolanas, que por si mismos no tienen propiedades cementantes. Otros materiales, como las escorias si exhiben propiedades cementantes.

Para su uso en el concreto, las adiciones al cemento (aditivos), algunas veces son referidas como adiciones minerales, las cuales necesitan cumplir los requerimientos de las normas establecidas. Ellos pueden ser utilizados individualmente o en combinación en el concreto. Pueden ser añadidos a la mezcla de concreto como un cemento que contenga la adición, por ejemplo un concreto portland puzolánico (CPP) o como un ingrediente dosificado separadamente en la planta de concreto premezclado.

*El humo de sílice*, es un material puzolánico de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silíceo o ferrosilíceo. Se recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico. El humo de sílice es un polvo extremadamente fino, con partículas alrededor 100 veces más pequeñas que un grano promedio de cemento. La norma para el

humo de sílice es la ASTM C 124. Generalmente se utilizan entre el 5 y el 12% en peso de los materiales cementantes para las estructuras de concreto que necesitan alta resistencia o una permeabilidad reducida. Debido a su extrema finura, deberán garantizarse procedimientos especiales para la manipulación, el vaciado y el curado del concreto con este material.

*Las cenizas volantes*, son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en si las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases. Las cenizas volantes utilizadas en el concreto deben tener conformidad con la norma ASTM C 168. La cantidad de ceniza volante en el concreto puede variar entre el 5% y el 65% en peso de los materiales cementantes, según la fuente y la composición de la ceniza volante y del desempeño requerido al concreto. Las características de la ceniza volante pueden variar significativamente según la fuente del carbón mineral que se quema. Las cenizas Clase F son normalmente producidas de la quema de la antracita o de carbones bituminosos y generalmente poseen un contenido bajo de calcio. Las cenizas de Clase C son producidas cuando se queman carbones sub-bituminosos y poseen típicamente propiedades puzolánicas.

*Las Escorias molidas de alto horno*, son subproductos no metálicos producidos en un alto horno cuando el mineral de hierro es reducido a hierro dulce. La escoria líquida es enfriada rápidamente para formar granos, que son molidos hasta una finura similar a la del cemento Pórtland. Las escorias molidas de alto horno utilizadas como un material cementante deben tener conformidad con la norma ASTM C 989. En esta especificación se definen tres grados de escorias: 80, 100 y 120, donde el grado más alto contribuye más a la resistencia potencial. Las escorias molidas de alto horno tienen por si misma propiedades cementantes pero éstas son mejoradas cuando se utilizan con cemento portland. Las escorias se utilizan entre el 20% y el 70% en peso de los materiales cementantes.

*Puzolanas naturales*, varios materiales naturales poseen, o pueden ser procesados para poseer propiedades puzolánicas. Estos materiales están también cubiertos por la especificación normativa ASTM C 618. Las puzolanas naturales tienen generalmente su origen volcánico y estos materiales silicios tienden a ser reactivos si son enfriados rápidamente. En los EU las puzolanas naturales comercialmente disponibles incluyen el Metacaolín y las arcillas o esquistos calcinados. Estos materiales son producidos mediante la calcinación controlada de



minerales de origen natural. El metacaolín es producido a partir de arcillas caoliniticas relativamente puras y se emplean entre el 5% y el 15% en peso de los materiales cementantes. Las arcillas o esquistos son utilizados a mayores porcentajes en peso. Otras puzolanas naturales son los cristales volcánicos, zeolíticos, ceniza de cáscara de arroz y tierra de diatomeas.

### **¿Por qué son utilizadas las adiciones minerales en el cemento?**

Pueden ser utilizados para el mejoramiento del desempeño del concreto en su estado fresco y endurecido. Son principalmente utilizados para mejorar la trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia. Estos materiales le permiten al productor de concreto diseñar y modificar la mezcla de concreto para satisfacer la aplicación deseada. Las mezclas de concreto con elevados contenidos de cemento portland son susceptibles a la fisuración y a una mayor generación de calor. Estos efectos pueden ser controlados mediante la utilización de adiciones al cemento.

Los minerales cementantes suplementarios tales como las cenizas volantes, las escorias y el humo de sílice le permiten a la industria del concreto utilizar centenares de millones de toneladas de subproductos que de otra forma serían vertidos en el terreno como desechos. Por otro lado su utilización reduce el consumo de cemento portland por unidad de volumen de concreto. El cemento portland tiene un elevado consumo de energía y de emisiones asociadas con su producción. Este consumo energético se disminuye cuando se reduce la cantidad de cemento portland utilizada en el concreto.

### **¿Como afectan la propiedad de permeabilidad del concreto la utilización de adiciones minerales?**

*Concreto fresco.-* En general, las adiciones al cemento mejoran la consistencia y la trabajabilidad del concreto fresco, por que se le añade un volumen adicional de finos a la mezcla. El concreto con humo de sílice es utilizado típicamente con bajos contenidos de agua con aditivos reductores de alto rango y estas mezclas tienden a ser cohesivas y más viscosas que el concreto corriente. Las cenizas volantes y las escorias generalmente reducen la demanda de agua para el revenimiento requerido del concreto. El tiempo de fraguado del concreto puede ser retardado con algunas adiciones utilizadas en porcentajes elevados. Esto

puede ser beneficioso en clima caliente. El retardo es eliminado en invierno reduciendo el porcentaje de las adiciones al cemento en el concreto. Debido a los finos adicionales, la cantidad y la tasa de exudación (sangrado) en estos concretos es frecuentemente baja. Esto es especialmente significativo cuando se utiliza humo de sílice. Una exudación baja, conjuntamente con el retardo del fraguado pueden causar fisuración por retracción plástica y por esto se pueden hacer necesarias algunas precauciones especiales durante el vaciado y el acabado.

**Resistencia.-** Las mezclas de concreto pueden ser dosificadas para producir la resistencia requerida y la velocidad de ganancia de resistencia que sea requerida para la aplicación. Con las adiciones que no sean humo de sílice, la velocidad de ganancia de resistencia puede ser más baja inicialmente, pero la ganancia de resistencia es continuada por un periodo de tiempo más largo comparado con las mezclas que sólo poseen cemento portland, lo que frecuentemente da como resultado resistencias últimas elevadas.

**Durabilidad.-** Las adiciones al cemento pueden ser utilizadas para reducir el calor asociado con la hidratación del cemento y reducir el potencial de fisuración térmica en elementos estructurales masivos. Estos materiales modifican la microestructura del concreto y reducen su permeabilidad de agua y sales disueltas en el concreto. La impermeabilidad del concreto reducirá los ataques de agentes dañinos. La mayoría de las adiciones al cemento reducen la expansión interna del concreto debido a reacciones químicas tales como la reacción alcali-agregado y el ataque de sulfatos.

Para la elaboración del concreto impermeable, por lo regular se utiliza un aditivo de alto rango (reductor de agua), por la baja relación a/c que se emplea y una adición mineral que será humo de sílice. Sin embargo, esto no quiere decir que nada más se utilizarán estos dos aditivos, pero sí podemos decir que es la base para lograr un concreto impermeable. La selección de uno o más aditivos tanto químicos como minerales, dependerá de las características del proyecto a realizar, del clima en su momento y del grado de exposición a los agentes dañinos, a que estará sometido el concreto. Cada uno de estos aditivos tiene que cumplir con la norma correspondiente antes mencionada.

### 3.4.1.3. Aditivos diversos

En este tipo de aditivos se incluyen una gran variedad de aditivos de uso poco común, útiles en casos muy específicos, o de los que sus efectos no han sido determinados correctamente y en consecuencia no están debidamente reglamentados.

Dentro de estos tipos de aditivos podemos encontrar los siguientes:

- ✦ Aditivos químicos para reducir la expansión álcali-agregado
- ✦ Aditivos estabilizadores de volumen
- ✦ Aditivos expansores por formación de gas
- ✦ **Aditivos insecticidas, germicidas y fungicidas (antibacteriales)**
- ✦ Aditivos floculantes
- ✦ Aditivos para mezclas de inyección
- ✦ Aditivos colorantes

Estos aditivos antibacteriales, son los que se utilizan para darle propiedades al concreto, y así inhibir y controlar el desarrollo de insectos, bacterias y hongos en pisos y muros de concreto.

Se ha encontrado que los materiales más efectivos son:

- Fenoles polihalogenados
- Emulsiones de dieldrin
- Compuestos de cobre

De acuerdo con el ACI 212.3 R-91, se emplean en porcentajes que varían entre el 0.1% y 10% por peso de cemento, según la concentración y composición del producto. Porcentajes mayores al 3% pueden tener efecto adverso sobre la resistencia del concreto. La efectividad de estos materiales es de naturaleza temporal.

Sobre el tipo de aditivo que se utiliza en el concreto antibacterial que se distribuye en nuestro país, es todavía una interrogante, ya que esta información se ha negado por las principales fuentes que están directamente relacionadas con este concreto, argumentando que es información confidencial, que al hacerlo estarían regalando la fórmula de su concreto a la competencia.

Comprobar si realmente éste aditivo antibacterial es efectivo; además de investigar, ¿cuál es el tipo de aditivo antibacterial que están utilizando actualmente las concreteras de nuestro país?, sería tema para futuras líneas de investigación.

### **3.4.2. Influencia de los aditivos**

Los aditivos reductores de rango alto se pueden usar para reducir la relación a/c entre un 5 y 40%. Esto incrementa la concentración de granos de cemento y baja la permeabilidad del concreto.

La utilización del humo de sílice, por ser este un polvo extremadamente fino, cuyas partículas son aproximadamente cien veces más pequeñas que las del cemento. Las partículas del humo de sílice se empaquetan apretadamente contra la superficie del agregado, y se acomodan entre las partículas de cemento, mejorando así grandemente el empaquetado. De aquí se sigue que si hay muy poco humo de sílice, digamos menos de aproximadamente 5%, éste no es muy efectivo. Ahora bien, si hay demasiado, digamos más de 15%, no existe espacio entre las partículas de cemento para acomodar todo el de humo sílice, y algo de este se malgasta.

Puesto que las partículas son extremadamente finas, reducen el tamaño y volumen de los vacíos cerca de la superficie del agregado, la llamada zona de interfase tiene propiedades mejoradas con respecto al microagrietamiento y la permeabilidad. La adherencia entre el agregado y la pasta de cemento mejora, permitiendo que el agregado participe mejor en la transferencia de esfuerzo.

Con la utilización de cenizas volantes y el humo de sílice reducen la permeabilidad. Esta es una razón común para especificar el uso de aditivos minerales. Una combinación de los mecanismos químicos y físicos de las cenizas volantes y el humo de sílice permite el bloqueo de los poros capilares del concreto. Ellos no solo contribuyen a la hidratación, de una manera similar a la del cemento, si no que por su tamaño tan pequeño bloquean más completamente el espacio entre los granos del cemento.

Otro punto que hay que tomar en consideración, es que, al estar utilizando una baja relación agua/cemento y la inclusión de humo de sílice en la mezcla, requieren el uso de un superfluidificador. Los superfluidificadores tienen moléculas grandes y pesadas, que se envuelven a si mismas alrededor de las partículas de cemento y les dan una carga eléctrica altamente negativa, de modo que se repelen unas a otras. Esto da como resultado la defloculación y dispersión de las partículas de cemento y por lo tanto, una mejor trabajabilidad de la mezcla.

Una manera de demostrar los benéficos que se obtienen con el uso de aditivos, se muestra en la figura 3.1.

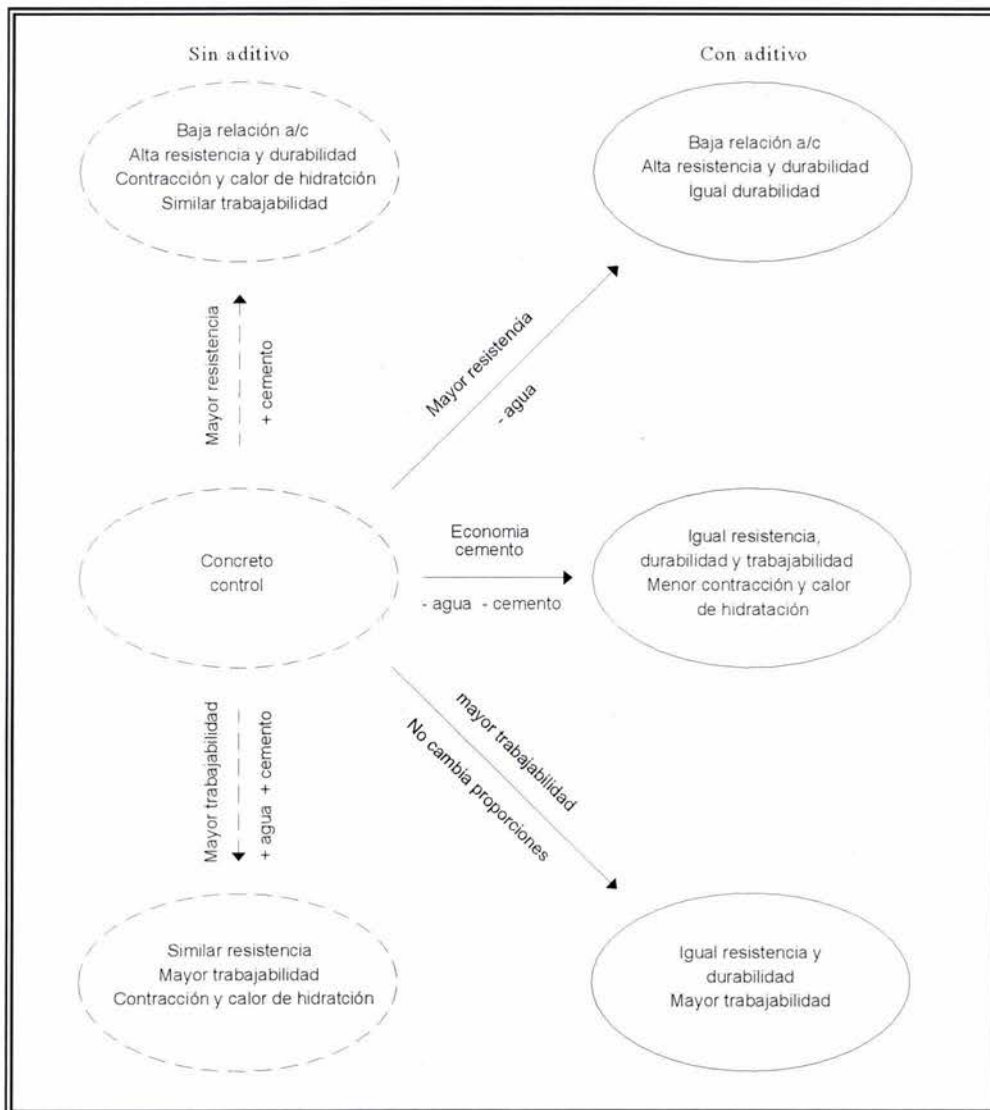


Fig. 3.1. Beneficios al utilizar aditivos

## CAPÍTULO 4

# PRUEBAS PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DEL CONCRETO

### 4.1. Pruebas al concreto fresco

#### 4.1.1. Finalidad

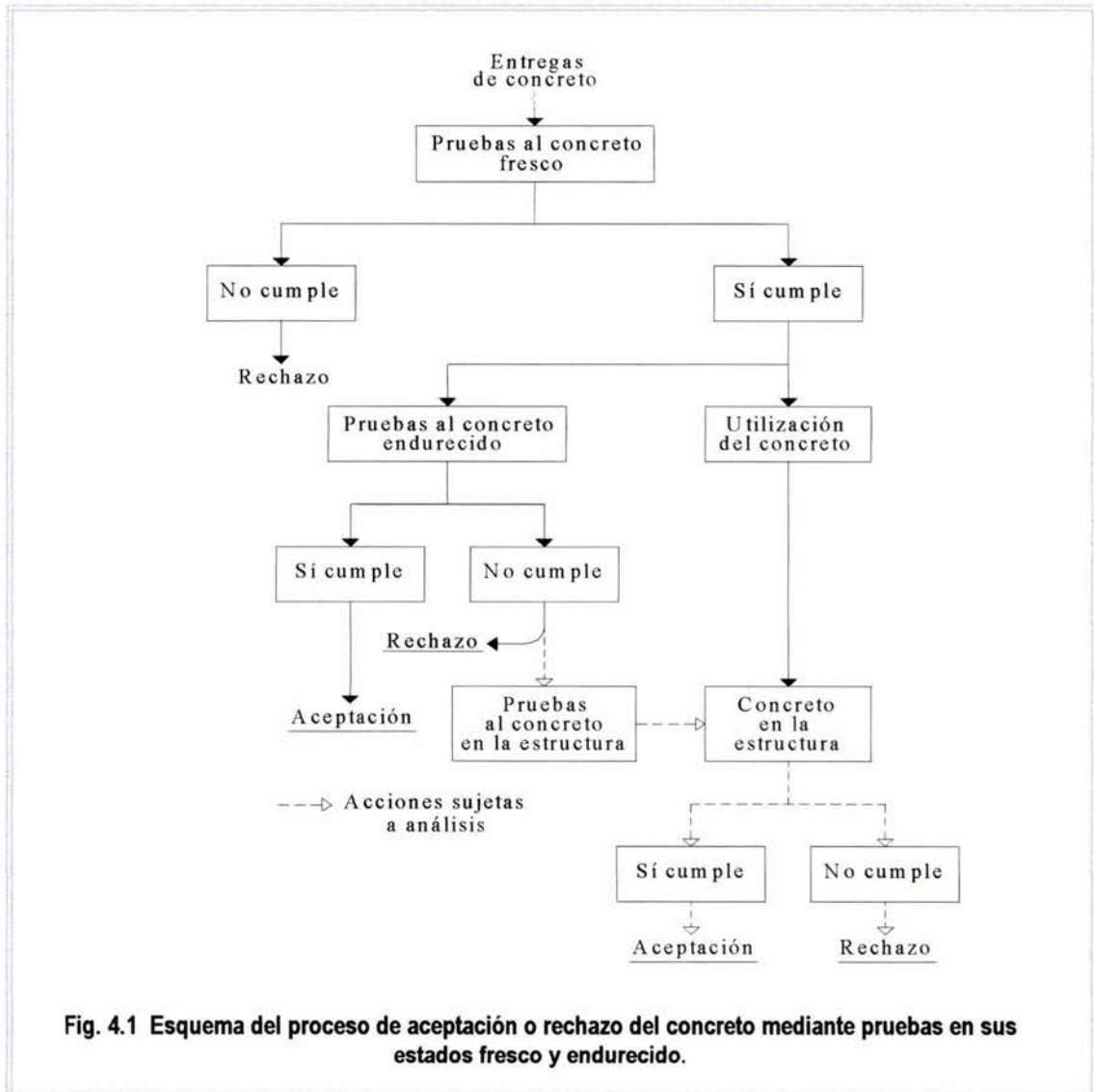
La determinación de las características del concreto en estado fresco, representa la primera línea de control a partir del momento en que se le puede considerar como un producto elaborado. Así, mediante la confrontación entre las características determinadas y los requisitos, es posible hacer una discriminación inicial para distinguir entregas de concreto potencialmente defectuoso, y que por tanto debe rechazarse. Es decir, los resultados de las pruebas de control en el concreto sólo tienen carácter definitivo cuando conducen al rechazo, pues de otro modo si el concreto fresco cumple con las especificaciones se permite su utilización, aunque su aceptación definitiva queda condicionada a los resultados que se obtengan posteriormente en las pruebas al concreto ya endurecido. En el esquema de la fig. 4.1<sup>23</sup> se muestra el proceso de aceptación o rechazo del concreto con base a los resultados de estas pruebas.

Las pruebas que se efectúan al concreto en estado fresco, tiene tal vez como principales virtudes la relativa facilidad y rapidez con que se ejecutan y la prontitud con que se obtienen sus resultados. Lo primero permite incrementar la frecuencia de su ejecución durante el suministro del concreto recién mezclado, y lo segundo posibilita la toma de decisiones inmediatas de preaceptación o rechazo, y la realización de ajustes oportunos para corregir deficiencias en el curso de la producción del concreto. A fin de contribuir a la eficacia de estas acciones, es necesario que los sitios de muestreo del concreto fresco se definan adecuadamente, en función del sistema de suministro de cada obra.

Es recomendable muestrear el concreto rutinariamente al ser entregado en obra, aunque el proveedor haya realizado su propio muestreo de control en la planta de fabricación. De esta

<sup>23</sup> C.F.E., Instituto de Ingeniería de la UNAM, *Manual de Tecnología del Concreto sección 4*, Limusa- Noriega Editores, México, D.F., 1997, pág. 407.

manera no sólo se acotan responsabilidades, sino también se consigue detectar y rechazar oportunamente las entregas de concreto premezclado potencialmente defectuoso, y evitar el proceso subsecuente que puede conducir a un rechazo posterior.



#### 4.1.2. Tipos de pruebas

Las pruebas que de ordinario deberán efectuarse a las muestras del concreto en estado fresco, para verificar su calidad serán:

Pruebas al concreto en estado fresco	Métodos de prueba	
	ASTM	NMX
Obtención de las muestras	C 172	C-161
Pruebas sencillas y/o rápidas (resultados en menos de 15 minutos):		
* Revenimiento	C 143	C-156
* Temperatura	C 1064	
* Peso unitario y rendimiento	C 138	C-162
* Contenido de aire	C 231	C-157

Por sus características de facilidad y rapidez, estas cuatro pruebas son las que se utilizan comúnmente para el control rutinario del concreto durante su elaboración y suministro, pues además estas características permiten, como ventaja adicional, incrementar la frecuencia en su realización.

Es importante mencionar que este primer grupo de pruebas, aún con la rapidez y la facilidad con que se realizan, en una mayoría de las obras de nuestro país, no se llevan a cabo. El control de calidad de las obras se basa en la prueba de revenimiento, eso en el concreto en estado fresco; y por otro lado en el concreto en estado endurecido, se concentran en las pruebas de resistencia por medio de cilindros, lo cual es una práctica muy errónea, ya que los resultados que se obtendrán, son estructuras con una durabilidad muy corta, lo que conlleva a un cuantioso gasto en reparaciones en tiempos muy cortos, una vez puesta en servicio la estructura.

Para la obtención de un concreto durable, es importante realizar cada una de las pruebas en estado fresco, ya que, cumpliendo con cada una de ellas, en apego con la norma correspondiente, habremos casi logrado nuestro concreto impermeable; para poderlo lograr, es necesario también cumplir con las pruebas en estado endurecido y por último que la mano de obra y las prácticas de construcción sean eficientes.

#### 4.1.2.1. Revenimiento

La prueba de revenimiento se aplica como un medio sencillo para evaluar la consistencia de las mezclas de concreto. Es común suponer que los cambios de consistencia en el curso de la elaboración de una misma mezcla, corresponden principalmente a variaciones en su



contenido de agua, y por consiguiente pueden ser considerados como síntomas de cambio en la relación agua/cemento y en la calidad potencial del concreto. Debido a ello, la medición y ajuste de la consistencia por conducto de la prueba de revenimiento, suele ser la primera actividad de control que se ejerce a partir del mezclado del concreto, con el fin de crear, mediante su ajuste, condiciones favorables para obtener una buena uniformidad en su calidad.

De acuerdo a la NMX C-403<sup>24</sup>, esta prueba se realiza, mediante el muestreo realizado con la frecuencia mínima que se indica en la tabla 4.1.

Prueba y método	Concreto dosificado por:	
	masa	volumen
Revenimiento (NMX C-156)	Al inicio del colado y cuando haya sospecha de cambio de consistencia, pero no menos de una por cada 40 m <sup>3</sup> o fracción	Al inicio del colado y cuando haya sospecha de cambio de consistencia pero no menos de una por cada 3 m <sup>3</sup> o fracción.

Tabla 4.1.- Frecuencias mínimas de muestreo

#### 4.1.2.1.1. Equipo para la prueba de acuerdo con la NMX C-156<sup>25</sup>

- ✦ Molde: debe ser rígido y tener la forma de cono de 20 cm de diámetro en la base inferior, 10 cm en la parte superior y 30 cm de altura, con una tolerancia de  $\pm 3$  mm en cada una de estas dimensiones.
- ✦ Varilla: es una barra de acero de sección circular, recta, lisa, de 16 mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud, con uno o los dos extremos de forma semiesférica del mismo diámetro de la varilla.
- ✦ Pala
- ✦ Cucharón
- ✦ Escala

#### 4.1.2.1.2. Procedimiento

Después de haber obtenido la muestra, se remezcla el concreto con una pala o cucharón lo necesario para garantizar uniformidad en la mezcla y se procede a hacer la prueba inmediatamente.

<sup>24</sup> Cfr. NORMA MEXICANA NMX-C-403-1999-ONNCCE: "Industria de la construcción – concreto hidráulico para uso estructural".

<sup>25</sup> Cfr. NORMA MEXICANA NMX-C-156-1988-ONNCCE: "Industria de la construcción – concreto – determinación del revenimiento en el concreto fresco".

Se humedece el molde; se coloca sobre una superficie horizontal, plana rígida, húmeda y no absorbente. El operador lo debe mantener firme en su lugar durante la operación de llenado, apoyando los pies en los estribos que tiene para ello el molde. A continuación se llena el molde con tres capas aproximadamente de igual volumen. La primera capa corresponde a una altura aproximada de 7 cm, la segunda capa de llegar a una altura de aproximadamente 15 cm y la tercera, al extremo del molde. Se compacta cada capa con 25 penetraciones de la varilla introduciéndola por el extremo redondeado, distribuidos uniformemente sobre la selección de cada capa, por lo que es necesario inclinar la varilla ligeramente en la zona perimetral; aproximadamente la mitad de las penetraciones se hacen cerca del perímetro, después con la varilla vertical se avanza en espiral hacia el centro.

Se compacta la segunda y la superior a través de todo su espesor, de manera que la varilla penetre en la capa anterior aproximadamente 2 cm, para el llenado de la última capa se coloca un ligero excedente de concreto por encima del borde superior del molde, antes de empezar la compactación. Si a consecuencia de la compactación, el concreto se asienta a un nivel inferior del borde superior del molde, a la décima y/o vigésima penetración, se agrega concreto en exceso para mantener su nivel por encima del borde del molde, todo el tiempo. Después de terminar la compactación de la última capa, se enrasa el concreto mediante un movimiento de rodamiento de la varilla. Se limpia la superficie exterior de la base, e inmediatamente se levanta el molde con cuidado en dirección vertical.

La operación para levantar completamente el molde de los 30 cm de su altura, debe hacerse en  $5 \text{ segundos} \pm 2 \text{ segundos}$ , alzándolo verticalmente sin movimiento lateral o torsional. La operación completa desde el comienzo del llenado hasta que se levante el molde, debe hacerse sin interrupción y en un tiempo no mayor de 2.5 min. Se mide inmediatamente el revenimiento, determinando el asentamiento del concreto a partir del nivel original de la base superior del molde, midiendo esta diferencia de alturas en el centro desplazado de la superficie superior del espécimen. Si alguna porción del concreto se desliza o cae hacia un lado, se desecha la prueba y se efectúa otra con una porción de la misma muestra.

Si dos pruebas consecutivas hechas de la misma muestra presentan fallas al caer parte del corte a un lado, probablemente el concreto carece de la necesaria plasticidad y

cohesividad; en este caso no es aplicable la prueba de revenimiento. Para confirmar esta situación, es recomendable obtener una nueva muestra de la misma entrega.

Se nos dice también, en la NMX C-403, que el contenido máximo de agua debe limitarse de manera que el revenimiento nominal del concreto a pie de obra no exceda de 10 cm. Si se requiere aumentar el revenimiento, este incremento se debe obtener mediante el uso de los aditivos.

Para que el concreto cumpla con el requisito de revenimiento, el valor determinado debe concordar con el nominal especificado en la tabla 4.2, con sus respectivas tolerancias:

Revenimiento nominal (cm)	Tolerancia
Menor de 5	$\pm 1,5$
de 5 a 10	$\pm 2,5$
mayor de 10	$\pm 3,5$

**Tabla 4.2.- Valor nominal del revenimiento y tolerancias**

#### 4.1.2.2. Temperatura

En cualquier caso en que existe un requisito de temperatura para el concreto fresco, es necesario definir si este requisito debe cumplirse en el concreto recién elaborado, a la salida de la mezcladora, o en el concreto como es suministrado en el sitio de colocación. La mayoría de las veces se opta por lo segundo, porque de este modo se compromete al proveedor para que tome medidas tendientes a evitar que la temperatura del concreto recién elaborado se modifique significativamente en el curso de su traslado al sitio de colocación.

De acuerdo con la NMX C-403, la temperatura del concreto fresco, para aquellos casos en que se proceda a calentar los materiales para compensar las bajas temperaturas ambientales, la temperatura máxima del concreto hidráulico en el momento de la producción y la colocación no debe de exceder de 32 °C.

En climas cálidos, la temperatura del concreto en el momento de su producción y colocación no debe exceder de 32 °C. No debe tener una evaporación mayor de 1 l/m<sup>2</sup>/h (un litro por metro cuadrado de superficie por hora).

Para contrarrestar el efecto de las temperaturas ambientales altas, se debe determinar pertinente enfriar los materiales y la posibilidad de escarchar el agua, sin que la temperatura descienda a menos de 10 °C.

La NMX C-403 dice que esta prueba se realiza, mediante el muestreo realizado con la frecuencia mínima que se indica en la tabla 4.3.

Prueba y método	Concreto dosificado por:	
	masa	volumen
Temperatura (ASTM C 1064), si la temperatura ambiente es menor de 7 °C o mayor de 32 °C	Cada entrega. En caso de producción continua, cada 12 m <sup>3</sup>	Cada 4 m <sup>3</sup> o fracción

**Tabla 4.3.- Frecuencias mínimas de muestreo**

#### 4.1.2.3. Peso Unitario

La determinación del peso unitario del concreto fresco como medio de control durante la elaboración de una determinada mezcla, no suele considerarse como una medida suficientemente sensible para detectar variaciones predecibles en su calidad potencial. Por tal consideración, la determinación del peso unitario es una prueba que en condiciones normales se realiza comparativamente menos que las demás pruebas que se acostumbra llevar a cabo para el control rutinario del concreto conforme se elabora.

La frecuencia mínima de muestreo de acuerdo a la NMX C-403, se muestra en la siguiente tabla:

Prueba y método	Concreto dosificado por:	
	masa	volumen
Masa unitaria y rendimiento (NMX C-162)	Una por cada día de colado	Al inicio de la obra, después de cada cambio en el suministro de agregados, pero no menos de tres por cada obra

**Tabla 4.4.- Frecuencias mínimas de muestreo**

De acuerdo con la NMX C-403, el concreto debe tener una masa unitaria entre 1 900 kg/m<sup>3</sup> y 2 400 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.1.2.3.1. Definiciones

- + Masa unitaria: cantidad de materia contenida en un metro cúbico de concreto fresco (kg/m<sup>3</sup>).
- + Rendimiento: es el volumen de concreto fresco producido por una cantidad de ingredientes, obtenido del cociente del valor de la masa total de los ingredientes entre el valor de la masa unitaria del concreto fresco.

#### 4.1.2.3.2. Cálculo de la masa unitaria y el rendimiento de acuerdo a la NMX C-162<sup>26</sup>

Una vez llenado el recipiente, vibrado la mezcla y haberle dado el acabado con apego a la NMX C-162, se calcula el factor del recipiente. El cálculo de este factor se debe realizar una vez al año para ello es necesario medir la temperatura del agua contenida en el mismo para obtener la masa en kilogramos por metro cúbico contenida en el recipiente.

Se debe seguir el procedimiento indicado a continuación: se coloca en el borde superior grasa de bomba, para evitar fugas de agua, se pesa el recipiente vacío con una precisión de 0.1%, se llena el recipiente con agua a temperatura ambiente y se cubre con una placa de vidrio, se eliminan las burbujas y el exceso de agua con una pipeta. Se pesa determinando la masa de la muestra requerida para llenar el recipiente, con una precisión de 0.1%.

Se mide la temperatura del agua y se determina la masa volumétrica según su temperatura, de acuerdo a la tabla 4.5.

Temperatura (°C)	Masa volumétrica (kg/m <sup>3</sup> )
15	999, 10
18	998, 58
21	997, 95
23	997, 50
24	997, 30
27	996, 52
29	995, 97

**Tabla 4.5.- Temperatura y masa volumétrica del agua**

<sup>26</sup> Cfr. NORMA MEXICANA NMX-C-162-2000-ONNCCE: "Industria de la construcción – concreto –determinación de la masa unitaria, calculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico".

Se calcula el factor del recipiente dividiendo la masa volumétrica del agua, entre la masa de la muestra requerida para llenarlo.

$$F = Mv / Mm$$

En donde:

F = es el factor del recipiente

Mv = es la masa volumétrica del agua

Mm = es la masa de la muestra requerida para llenarlo

### **Masa unitaria**

Se calcula la masa neta del concreto en kilogramos, restando la masa del recipiente de la masa bruta obtenida. Se calcula la masa unitaria “Mu”, multiplicando la masa neta por el factor del recipiente utilizando la siguiente formula:

$$Mu = (Mb - Mr) F$$

En donde:

Mu = es la masa unitaria (masa por metro cúbico de concreto)

Mb = es la masa bruta (masa del concreto + masa del recipiente)

Mr = es la masa del recipiente

F = es el factor del recipiente

### **Rendimiento**

Se calcula el rendimiento “R”, dividiendo la masa total de todos los materiales incluidos en una revoltura “M<sub>1</sub>”, entre la masa unitaria “Mu”. La masa total de todos los materiales incluidos en una revoltura es la suma de la masa del cemento, del agregado fino, del agregado grueso en las condiciones que se usan, del agua de mezclado agregada a la revoltura y de cualquier otro material, sólido o líquido que se adicione y se calcula utilizando la siguiente formula:

$$R = M_1 / Mu$$

En donde:

R = es el volumen real de concreto obtenido por revoltura, en m<sup>3</sup>

M<sub>1</sub> = es la masa total de todos los materiales incluidos en una revoltura, en kg

Mu = es la masa unitaria, en kg/m<sup>3</sup>

### Rendimiento relativo

Es la relación entre el volumen real de concreto obtenido y el volumen de diseño de una revoltura, calculado como sigue:

$$R_r = R / V_t$$

En donde:

$R_r$  = rendimiento relativo

$R$  = rendimiento, en  $m^3$

$V_t$  = es el volumen de concreto teórico que produce una revoltura en  $m^3$

#### 4.1.2.4. Contenido de aire

Debido a que la inclusión de aire en el concreto tiene efectos ambivalentes, se busca limitar su contenido a un nivel que por una parte produzca el efecto útil deseado y por otra no reduzca excesivamente la resistencia mecánica del concreto endurecido. De ahí la importancia de tratar de mantener el contenido de aire incluido en el nivel preestablecido, mediante su continua verificación en el curso de la elaboración del concreto.

Para determinar el contenido de aire en el concreto fresco, se dispone optativamente de tres procedimientos normalizados: 1) método gravimétrico (ASTM C 138 / NMX C-162); 2) método volumétrico (ASTM C 173 / NMX C-158); y 3) método de presión (ASTM C 231 / NMX C-157).

La frecuencia mínima de muestreo del concreto fresco para esta prueba, se indica en la tabla 4.5, de acuerdo a la NMX C-403:

Prueba y método	Concreto dosificado por:	
	masa	volumen
Contenido de aire	Cada entrega. En caso de producción continua, cada 12 $m^3$	Cada 3 $m^3$ o fracción

Tabla 4.5.- Frecuencias mínimas de muestreo

El método gravimétrico es un método rápido, pero su precisión es relativamente es reducida en comparación con los otros dos métodos.

Para el método volumétrico existe un aparato específicamente diseñado. El procedimiento consiste en tratar de expulsar por medio de golpeteo y agitación todo el aire que existe en un determinado volumen de concreto, de modo que el contenido de aire se establece por la diferencia entre el volumen original de concreto y el volumen que éste ocupa después de remover el aire. Sus resultados son más precisos pero su ejecución es más laboriosa, con respecto al procedimiento gravimétrico. En realidad, la mayor ventaja del método volumétrico es la de ser aplicable a concretos con cualquier tipo de agregados, sean éstos densos o ligeros.

En la ejecución del método de presión también se requiere emplear un aparato especialmente diseñado. El procedimiento se basa en la medición del cambio de volumen aparente que se produce en una cierta porción de concreto al aplicarle una determinada presión. Este procedimiento tiene la limitación de que no es aplicable a concretos con agregados ligeros o demasiados porosos, lo cual no aplica a nuestro concreto impermeable; este método ofrece las ventajas de ser suficientemente preciso, sencillo y rápido de realizar. Debido a ello, es el método que se utiliza comúnmente para determinar el contenido de aire en el concreto convencional.

Independientemente del método que se aplique, es indispensable que cuando se incluya aire en el concreto, se determine su contenido con la mayor frecuencia que sea posible, a fin de comprobar que se halla en el nivel especificado y dentro de las tolerancias permitidas; por otra parte, es importante también determinar el contenido de aire en el concreto, cuando éste no se haya especificado, ya que éste debe oscilar entre 1 y 2.5%, a partir de estos límites podremos lograr un concreto con las propiedades deseadas, pasando estos límites se obtendrá un concreto con más vacíos y por ende poroso. Los límites de un concreto con aire incluido se encuentra entre 3 y 8 %.

## **4.2. Pruebas al concreto endurecido**

### **4.2.1. Finalidad**

Las propiedades que se pretende lograr en el concreto endurecido se relacionan principalmente con su resistencia mecánica y con su capacidad para resistir las acciones dañinas que ponen en riesgo su durabilidad. Asimismo se mencionó que para lograrlo se dispone de tres medios básicos al diseñar la mezcla: 1) uso de una relación agua/cemento



apropiada a las condiciones de exposición y servicio del concreto, 2) empleo de un cemento de características físicas y químicas idóneas, y 3) incorporación de un aditivo cuyos efectos sean necesarios.

Una vez iniciada la producción de una mezcla de concreto en cuyo diseño se contemplaron estos tres aspectos, se plantea la necesidad de comprobar sus respectivos efectos útiles mediante pruebas en el concreto endurecido. Sin embargo, esto por lo general no es prácticamente factible en el caso de los efectos específicos atribuibles al cemento y los aditivos, en cuyos casos suele procederse por inferencia; es decir, se considera suficiente verificar previamente que tanto el cemento como el aditivo cumplen sus respectivos requisitos de calidad, y admitir que en consecuencia sus efectos útiles en el concreto endurecido deben ser los esperados en función de la información técnica en que se basó la decisión para su selección y uso.

De esta manera, sólo resta la posibilidad de verificar el efecto consecuente del empleo de la relación agua/cemento escogida al diseñar la mezcla, cuya definición debió hacerse para satisfacer requisitos de resistencia mecánica o de durabilidad. Para esta finalidad, independientemente del criterio de selección aplicado, lo usual es que la verificación de los efectos de la relación agua/cemento se realice por medio de la determinación de la resistencia mecánica y de la permeabilidad del concreto endurecido. Esto es, tanto si la relación agua/cemento se establece para cumplir requisitos de resistencia como de durabilidad, la medición y evaluación de sus efectos en el concreto endurecido se efectúa a través de la determinación de la resistencia mecánica, convirtiéndose ésta, en una prueba importante para fines del control y verificación de calidad del concreto. Como se comentó en capítulos anteriores, la permeabilidad también juega un papel importante en la durabilidad del concreto; la relación agua/cemento ( $a/c$ ), no solamente afecta la resistencia a la compresión del concreto sino que también afecta la permeabilidad. Pequeños cambios en la relación  $a/c$  pueden significar grandes diferencias en la permeabilidad del concreto, y con ello todos los problemas ya planteados, ésta prueba se comentará más adelante.

Es pertinente hacer notar que el uso de la resistencia mecánica del concreto como índice general de su aptitud para prestar un buen servicio permanente, no siempre es acertado, como podemos ver, algunas veces es necesario verificar otras propiedades del concreto, como la

permeabilidad y las mencionadas en el concreto estado fresco, y así se logrará un producto de calidad, durable que conlleva a una larga vida de servicio.

#### 4.2.2. Tipos de pruebas

Las pruebas que de ordinario deberán efectuarse al concreto en estado endurecido, para verificar la calidad del mismo, serán:

- ✦ Resistencia a la compresión
  - Al concreto colocado y endurecido
- ✦ Módulo de elasticidad
- ✦ Permeabilidad

##### 4.2.2.1. Prueba de resistencia a la compresión

La determinación de la resistencia a compresión del concreto se efectúa mediante el ensaye hasta la ruptura de especímenes representativos: cilindros, NMX C-083<sup>27</sup>. El cilindro normal es de 15 cm de diámetro por 30 cm de largo; los cilindros son colocados en un molde generalmente hecho de acero o fierro, con una base sujeta con abrazaderas; los moldes de cilindro son especificados por la norma ASTM C 470-94.

De acuerdo con la NMX C-403, la frecuencia mínima de muestreo del concreto fresco para realizar ésta prueba, se indica en la siguiente tabla:

Prueba y método	Concreto dosificado por:	
	masa	volumen
Resistencia a la compresión	Cada 40 m <sup>3</sup> o fracción	Cada 12 m <sup>3</sup> pero no menos de una por cada día de colado

**Tabla 4.6.- Frecuencias mínimas de muestreo**

En la NMX C-403, se dice, que todo concreto para una cierta obra y nivel de resistencia, se deben tomar al menos dos muestras de concreto y de cada muestra se elaboran y ensayan por lo menos dos cilindros.

<sup>27</sup> Cfr. NORMA MEXICANA NMX-C-083-1997-ONNCE: "Industria de la construcción – concreto – determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto".

En la tabla 4.7<sup>28</sup> se resumen los datos característicos correspondientes a la elaboración y curado de los especímenes en que se determina la resistencia a compresión del concreto.

Tipo de especímenes	Elaboración (Obtención)	Conservación (Curado)
<p>Especímenes fabricados en moldes estándar, por muestreo del concreto fresco:</p> <p>a) En laboratorio (ASTM C 192/NMX C-159)</p> <p>b) En obra (ASTM C 31/NMX C-160)</p>	<p>Llenado del molde en capas de igual espesor, compactadas con varilla o por vibración según revenimiento.</p> <p>Llenado del molde en capas de igual espesor, compactadas con varilla o por vibración según revenimiento.</p>	<p>Primeras 24 horas: en los moldes, protegidos de la evaporación, a <math>23 \pm 2</math> °C. A continuación inmersión en agua saturada de cal, o en ambiente con 95% HR (mínimo) a <math>23 \pm 2</math> °C.</p> <p>Primeras 48 horas (como máximo): en los moldes protegidos de la evaporación, o inmersión en agua saturada de cal, a temperatura entre 16 y 27 °C. A continuación: inmersión en agua saturada de cal, o en ambiente con 95% HR (mínimo) a <math>23 \pm 2</math> °C.</p>

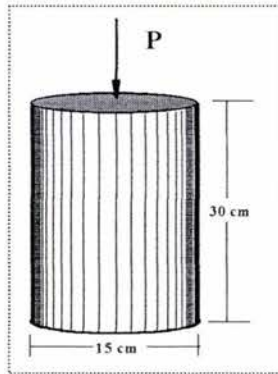
**Tabla 4.7.- Resumen de requisitos usuales para la elaboración y curado de especímenes para determinar la resistencia a compresión del concreto.**

### Preparación y ensayo de los especímenes

En cuanto a la preparación de los especímenes cilíndricos, es de particular importancia el acondicionamiento de las superficie de las cabezas, a través de las cuales se transmiten las cargas de compresión, a fin de eliminar defectos que puedan producir concentraciones de esfuerzos en el espécimen y hacerlo fallar de manera irregular. En este aspecto hay dos factores cuya influencia es decisiva y que por ello se reglamentan con precisión: la “planicidad” de las superficies y su perpendicularidad con el eje del cilindro. El método ASTM C 39 (NMX C-083) establece que, para considerarlas aceptables estas superficies no

<sup>28</sup> Cfr. C.F.E., Instituto de Ingeniería de la UNAM, sección 3, op. cit., pág. 46.

deben manifestar desviaciones mayores de 0.05 mm en una distancia de 152 mm (diámetro del cilindro estándar) al ser confrontadas con una regla perfectamente recta en cualquier dirección; y que su perpendicularidad con el eje del cilindro no debe diferir más de  $0.5^\circ$  con respecto al ángulo de  $90^\circ$ , lo que significa una desviación máxima permisible de 3.2 mm en una distancia de 305 mm que es la altura del cilindro estándar.



Para conseguir que las superficies de las cabezas de los especímenes cilíndricos cumplan con estos requisitos, suelen emplearse dos procedimientos consistentes en pulirlas con una piedra de esmeril de características apropiadas, o recubrirlas con una delgada capa (alrededor de 3 mm de espesor) de pasta de cemento, masilla de yeso de alta resistencia, o un compuesto de azufre fundido (cabeceo).

En el método ASTM C 617 (NMX C-109) se definen los requisitos que deben cumplirse cuando se emplea el segundo procedimiento, esto es, el recubrimiento de las cabezas del cilindro con una capa de alguno de estos materiales. La pasta de cemento se utiliza en los cilindros recién moldeados, es decir, se aplica al concreto fresco; en tanto que el yeso de alta resistencia y el azufre fundido se utilizan en los especímenes de concreto endurecido.

El material de cabeceo no deberá ser más débil que el concreto del espécimen. Para evitar esta eventualidad, es necesario comprobar que la resistencia del material de cabeceo es congruente con la del concreto por ensayar, o de lo contrario considerar la conveniencia de emplear otro procedimiento para acondicionar las cabezas del espécimen.

Una vez acondicionadas las cabezas de los especímenes (con un material de cabeceo) dentro de las tolerancias de planicidad y perpendicularidad especificadas, debe procederse a aplicarles una carga axial de compresión creciente hasta su ruptura; la carga máxima que se alcanza dividida entre la sección transversal del espécimen, corresponde al esfuerzo máximo aplicado que define la resistencia del concreto a compresión simple ( $f'_c$ )

Al igual que todos los aspectos previos, el proceso de aplicación de carga debe efectuarse bajo condiciones reglamentadas para evitar la influencia de los factores cuya variación puede afectar los resultados. Entre dichos factores destacan las características de la

máquina de ensaye, las condiciones de humedad del espécimen de concreto y la velocidad con que se incrementa la carga; todos los cuales se hallan convenientemente especificados en el citado método de prueba ASTM C 39 (NMX C-83) debido a la importancia de sus efectos.

De acuerdo con la NMX C-403, las pruebas de los especímenes deben efectuarse a los 28 días de edad o a otra edad convenida. El concreto debe alcanzar la resistencia especificada a la compresión ( $f'_c$ ) a la edad de 28 días o a la convenida.

La edad de prueba de los especímenes para nuestro concreto será a una edad mayor de 28 días, debido que la actividad normal de una puzolana en el concreto de cemento portland consiste en reaccionar con la cal que el cemento libera al hidratarse, para formar compuestos resistentes; lo cual significa que, para que estos compuestos se formen, es necesario primero que el cemento se hidrate y libere cal, y es por ello que la aportación de resistencia que una puzolana hace al concreto es más baja a corto plazo, por ello es recomendable que la obtención de la resistencia de proyecto del concreto se especifique a una edad mayor de 28 días, con objeto de aprovechar el beneficio de la resistencia que aporte la puzolana, a manera de ejemplo se presenta la siguiente figura<sup>29</sup>:

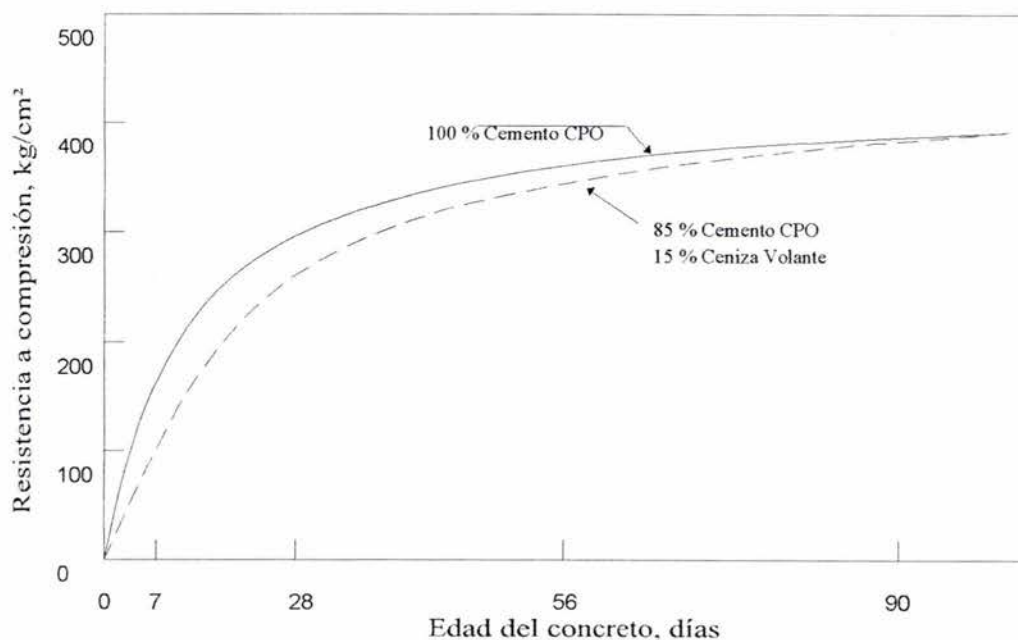


Fig. 4.2.- Aportación de la ceniza volante, a la resistencia a compresión del concreto.

<sup>29</sup> C.F.E., Instituto de Ingeniería de la UNAM, *Manual de Tecnología del Concreto sección 1*, Limusa- Noriega Editores, México, D.F., 1994, pág. 221.

Continuando con lo que marca la NMX C-403, se dice que es admisible que el concreto cumpla con la resistencia especificada  $f'_c$ , si los promedios de resistencia de todos los conjuntos de tres muestras consecutivas pertenecientes o no al mismo día de colado no son menores que  $f'_c$  y si ninguna muestra (pareja de cilindros) da una resistencia media inferior a  $35 \text{ kg/cm}^2$ .

Si sólo se cuenta con dos muestras, el promedio de las resistencias de ambas no debe ser inferior a  $13 \text{ kg/cm}^2$ .

#### **4.2.2.1.1. Pruebas al concreto colocado y endurecido**

Si al término del lapso establecido para que el concreto adquiriera las propiedades especificadas, los resultados de las pruebas a los especímenes no cumplen con las especificaciones, y/o si existen otras evidencias o motivos para poner en duda la calidad del concreto colocado, entonces procede la ejecución de pruebas al concreto colocado y endurecido en la estructura. Para este propósito, existen diversos procedimientos; algunos son de carácter destructivo en tanto que otros se consideran no destructivos. Los primeros reciben esta denominación por que contemplan la extracción de especímenes que se ensayan hasta la ruptura, o porque su aplicación le produce algún tipo de lesión a la estructura, mientras que los segundos, como su nombre lo indica no dejan secuelas lesivas. Entre los métodos destructivos se encuentran: la extracción de corazones (ASTM C 42 / NMX C-169), la resistencia al desprendimiento (ASTM C 900) y el número de rotura al corte (ASTM C 1150). Los no destructivos incluyen una amplia variedad de procedimientos, como lo son: el número de rebote con esclerómetro (ASTM C 805 / NMX C-192), resistencia a la penetración (ASTM C 803), método de frecuencia resonante (ASTM C 215) y la velocidad de propagación de pulsaciones (ASTM C 597).

#### **4.2.2.2. Módulo de elasticidad**

Para estimar el módulo de elasticidad del concreto existen expresiones empíricas de carácter general, como la del código ACI 318 que permite valorarlo a partir del peso unitario y la resistencia a compresión del concreto. Sin embargo, debido a la notable injerencia que tienen las características de las rocas que constituyen los agregados, esta estimación resulta poco acertada cuando dichas características se apartan de las que se consideran normales en los agregados. Por tal motivo, en los casos en que hay duda sobre la normalidad de los

agregados y/o se requiere un conocimiento más preciso del módulo de elasticidad del concreto dispuesto para emplearse, lo procedente es determinarlo experimentalmente conforme al método de prueba ASTM C 469 (NMX C-128).

De acuerdo con la NMX C-403, la frecuencia mínima de muestreo del concreto fresco para realizar ésta prueba, se indica en la siguiente tabla:

Prueba y método	Concreto dosificado por:	
	masa	volumen
Módulo de lasticidad (NMX C-128)	Tres determinaciones por obra como mínimo y cuando lo solicite el D.R.O	Tres determinaciones por obra como mínimo.

**Tabla 4.8.- Frecuencias mínimas de muestreo**

De acuerdo con la NMX C-403, el módulo de elasticidad promedio de tres muestras consecutivas cualesquiera deben ser igual o mayor al módulo de elasticidad de diseño (característico) especificado por el estructurista. El valor mínimo obtenido de muestras individuales debe ser el característico menos una desviación estándar.

A falta de información confiable, la desviación estándar de los valores del módulo de elasticidad se puede tomar igual a  $(1500 \sqrt{f'c})$  en  $\text{kg/cm}^2$ , lo que no elimina la necesidad de realizar ensayos.

#### 4.2.2.3. Permeabilidad

En estructuras donde la baja permeabilidad del concreto es un requisito esencial para su durabilidad, una forma práctica de proceder consiste en diseñar la mezcla de concreto con el uso de una relación agua/cemento que no exceda los valores máximos recomendados por los Comités ACI 201 y ACI 301 en función de las condiciones de servicio (ver tabla 2.2, pág. 14).

Tal como se menciona en la parte 2.3.3. interesa principalmente en el concreto, la permeabilidad al agua y al aire, dado que son los fluidos con los que tiene contacto ordinariamente. En la práctica normal, sólo se acostumbra determinar la permeabilidad al agua, aunque se supone que ésta es un buen índice de la permeabilidad al aire, para las condiciones operativas ambientales ordinarias en que el aire actúa a la presión atmosférica.

Las pruebas de permeabilidad son relativamente laboriosas y de larga duración, y sus resultados pueden ser algo imprecisos, por tal motivo no se acostumbra su ejecución regular como medio de verificación de calidad del concreto. Esta es la creencia que se ha tenido sobre la determinación de la permeabilidad, la cual es errónea, por lo antes expuesto sobre lo que conlleva tener una alta permeabilidad.

Y es por ello, que se empleaba una de las maneras más elementales para evaluar la permeabilidad del concreto al agua, con especímenes cúbicos o cilíndricos que se someten a presión hidráulica en una de sus caras, de modo que al establecerse a través de ellos un flujo con régimen estable, resulta aplicable la conocida ley de Darcy<sup>30</sup>:

$$V = k i \quad \text{o bien:} \quad Q = k i A$$

En donde (V) es la velocidad de flujo por unidad de área, que también puede expresarse como el gasto (Q) que pasa a través de toda el área (A) expuesta al agua; (i) es el gradiente de presión hidráulica; y (K) es el llamado coeficiente de permeabilidad, el cual depende básicamente de la homogeneidad y porosidad del concreto, y se utiliza para caracterizarlo en este aspecto.

En la actualidad esto ha cambiado, se acepta ahora, que al diseñar estructuras, la durabilidad del concreto a través de la vida de una estructura es una de sus propiedades más importantes, por que es esencial que sea capaz de resistir las condiciones para las cuales ha sido diseñado.

Una de las maneras de lograr un concreto durable, es con una muy baja permeabilidad, por ello la importancia de realizar una buena evaluación de la permeabilidad del concreto.

Como se menciona en la parte 2.3.3.2. una manera de evaluar la permeabilidad, es por medio de la prueba de permeabilidad rápida a cloruros, la cual es un índice de durabilidad de las estructuras de concreto.

<sup>30</sup> Cfr. C.F.E., Instituto de Ingeniería de la UNAM, sección 3, op. cit., pág. 220.



La prueba de permeabilidad rápida de cloruros (RCPT), fue adoptada por la AASTHO T 277 y por la ASTM C 1202, este método, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” determina la resistividad que presenta el concreto al paso del ion cloruro en tan solo 6 horas, al inducir un voltaje que polariza dos soluciones en positivo y negativo obligando a los iones de cloruro a penetrar en el concreto.

La RCPT resulta ser un método de prueba sencillo y que proporciona resultados rápidos y fáciles de interpretar.

Se presenta una investigación realizada en el Instituto Eduardo Torroja en Madrid, España, donde se utiliza la prueba RCPT, para analizar diversas variables que influyen en los diseños de concretos durables, **ver anexo A.**

## CAPÍTULO 5

# CUIDADOS EN EL CONCRETO PARA CONSERVAR LAS PROPIEDADES DE DISEÑO

### 5.1. Generalidades

Los cuidados que se tendrán en el concreto antibacterial, para conservar las propiedades de diseño, serán las mismas que para el concreto normal, ya que entre sus características se encuentra que es un concreto elaborado, transportado y colocado con equipo y condiciones iguales que los convencionalmente fabricados por la industria del concreto premezclado. Para poder llevar a cabo estas actividades, las cuales son muy importantes para lograr el producto final que queremos, un concreto con una baja permeabilidad. Es importante realizar cada de una de estas actividades con el equipo, el personal y en el tiempo indicado, para así, obtener un concreto con las propiedades para que fue diseñado. Para la realización de estas actividades, (transporte, colocación, vibrado y curado) se tiene un tiempo límite, el cual no debe rebasarse por que las consecuencias serían desastrosas, por lo cual partiremos de lo siguiente:

Al concreto recién mezclado se le considera en estado fresco mientras conserva suficiente blandura para ser moldeado, en tanto que al concreto ya colocado se le considera como un material en curso de endurecimiento progresivo. Para dar uso y tratamiento adecuados al concreto en ambos estados, es necesario reconocer sus respectivas características y propiedades.

Puede considerarse que el estado fresco del concreto persiste hasta que se produce el fraguado inicial, y que el lapso previo a éste, es el tiempo máximo de que se dispone para realizar todas las operaciones correspondientes al mezclado, transporte, colocación y compactación del concreto en moldes. Es por tanto necesario, al referirse al concreto fresco, examinar los cambios de comportamiento que manifiesta en ese lapso y los efectos que dichos cambios pueden tener en la realización de esas operaciones.

## 5.2. Transporte

Esta actividad se refiere al traslado de las revolturas de concreto, desde el lugar donde se efectúa el mezclado hasta el sitio más cercano posible al de su vaciado en la estructura.

El método de transportación que se use debe entregar eficientemente el concreto en el punto de colocación y sin alterar, significativamente, sus propiedades deseadas con respecto a la relación agua/cemento, revenimiento, contenido de aire y homogeneidad. Cada método de transportación tienen ventajas bajo condiciones, tales como: ingredientes y proporciones de la mezcla, tipo y accesibilidad de colocación, capacidad de entrega requerida, localización de la planta de dosificación, condiciones ambientales y otros. Estas diferentes condiciones se deben revisar con detenimiento al seleccionar el tipo de transportación que mejor se adapte para obtener económicamente un concreto de calidad en el lugar de colocación.

Entre el equipo de transporte más usado en las obra de construcción de la República Mexicana, está el camión mezclador, el cual puede ser:

- \* Camiones mezcladores {
  - de descarga posterior
  - de descarga frontal

Es conveniente tomar en cuenta las siguientes consideraciones sobre éste equipo, para evitar alterar las propiedades deseadas del concreto.

En los camiones mezcladores todos los procedimientos de carga deben ser diseñados de modo que se evite el amontonamiento del material, particularmente arena y cemento, en la cabeza del tambor durante la carga. La probabilidad del amontonamiento disminuye si se coloca alrededor del 10 % del agregado grueso y agua en el tambor de la mezcladora antes de la arena y el cemento.

Los aditivos químicos deben cargarse en la mezcladora en el mismo punto de la secuencia del mezclado, mezcla tras mezcla. Los aditivos líquidos se deben cargar con el agua, o sobre arena mojada, y los que están en forma de polvo deben ser vertidos dentro de la mezcladora con otros ingredientes secos. Cuando se emplea más de un aditivo, cada uno se

debe dosificar por separado, a menos que se demuestre que es permisible el premezclado, y se deben diluir apropiadamente antes de que entren en la mezcladora.

Cuando la mezcla se hace en los camiones, se especifican de 70 a 100 revoluciones a velocidad de mezclado (6 a 18 r.p.m). Con secuencias de cargas óptimas, muchos camiones mezcladores son capaces de producir concreto uniformemente mezclado, en 30 a 40 revoluciones.

La norma ASTM C-94 limita el número total de revoluciones a un máximo de 300, esto con el fin de evitar el molido de agregados suaves, la pérdida de revenimiento, el desgaste de la mezcladora y otros efectos indeseables en el concreto en clima caliente.

El mezclado final se puede hacer en el patio del productor, en la ruta hacia el proyecto, o más comúnmente, en el sitio del proyecto.

Si transcurre un tiempo adicional después del mezclado y antes de la descarga la velocidad del tambor se reduce a la velocidad de agitación (3 a 6 r.p.m.) o se detiene. Luego, antes de la descarga, la mezcladora se debe operar a velocidad de mezclado por aproximadamente 30 revoluciones para aumentar la uniformidad.

Esto quiere decir, que a partir de que se carga el camión estando todos los ingredientes dentro, se empieza a contar las revoluciones, y que antes de la descarga en el sitio de la obra, se debe operar a velocidad de mezclado, siempre y cuando no se hayan rebasado ya las 300 revoluciones que marca la norma antes mencionada.

El concreto que se haya mantenido en agitación se puede colocar dentro de la primera hora y media posterior al mezclado, pero esto se puede reducir a 1 hora o hasta 45 minutos, dependiendo del clima y de los aditivos.

### **5.3. Colocación**

Consiste en hacer llegar el concreto fresco al interior del espacio confinado por las cimbras, para depositarlo en el lugar preciso que le corresponde, conforme avanza progresivamente el llenado hasta el nivel máximo previsto para el colado en ejecución.

#### **5.3.1. Planeación**

La selección del equipo se debe basar en su capacidad para manejar eficientemente el concreto en las condiciones más ventajosas, de tal modo que pueda ser fácilmente consolidado en su lugar mediante la vibración.

Una planeación anticipada debe asegurar una provisión adecuada y consistente del concreto. Se debe prever suficiente capacidad de colocación de manera que el concreto se mantenga plástico y libre de juntas frías mientras se coloca. Todo el equipo para la colocación debe estar limpio y en buen estado. También, se debe arreglar de modo que el concreto se entregue en su posición final sin segregación objetable. Así mismo el equipo debe estar dispuesto, adecuada y apropiadamente de modo que la colocación se desarrolle sin tardanzas indebidas, y la mano de obra debe ser la suficiente como para asegurar la apropiada colocación, consolidación y acabado del concreto. Si el concreto ha de ser colocado en la noche, el sistema de iluminación debe ser suficiente para iluminar el interior de las cimbras y para proporcionar un lugar seguro de trabajo.

La colocación del concreto no debe empezar cuando exista probabilidad de temperaturas de congelación, a menos que se haya previsto instalaciones adecuadas para la protección contra el frío. Así como también se debe tener las debidas precauciones en la colocación del concreto, en clima cálido (ACI 305), ya que los problemas generados en este tipo de clima son muy desfavorables, como pueden ser: menor resistencia a 28 días y posteriores edades, mayor tendencia a grietas por secado o por enfriamiento de la estructura, reducción de la durabilidad debido al agrietamiento, mayor corrosión del acero de refuerzo y el incremento de la permeabilidad.

Es aconsejable que el concreto se entregue en el sitio a un ritmo uniforme compatible con el equipo y la mano de obra que se estén usando en los procesos de colocación y acabado. Cuando una interrupción en el proceso del vaciado del concreto constituya un problema, se debe considerar el aprovisionamiento de equipo de apoyo.

Se debe realizar una inspección final detallada de las juntas de construcción, cimbras, tapa juntas, colocación y posición del acero de refuerzo, y otros detalles de la colocación del concreto, antes de que se coloque. Es necesario desarrollar un método para documentar tal inspección y éste deberá ser aprobado por todas las partes interesadas antes del comienzo del trabajo. Todos estos detalles se deben examinar cuidadosamente para asegurarse que coinciden con los planos, especificaciones y con una práctica correcta.

### **5.3.2. Precauciones**

El equipo debe disponerse de tal manera que el concreto tenga una caída vertical no mayor a 1.50 m (NMX C-403) hasta el punto de colado o hasta el interior del contenedor que lo reciba. El chorro de concreto no debe separarse, permitiendo que caiga libremente sobre las varillas, espaciadores, refuerzos u otros materiales ahogados. Si las cimbras están suficientemente abiertas y libres, de manera que no estorben la caída vertical del concreto en el lugar de colocación, generalmente es preferible la descarga directa, sin el empleo de tolvas, conductos o vertedores. El concreto debe ser depositado en o cerca de su posición final durante su colocación, ya que se presenta la tendencia a segregarse cuando tiene que hacerse fluir lateralmente hasta su lugar.

## **5.4. Vibrado**

Se designa así a la actividad que consiste en someter el concreto fresco, recién colado, a la acción de fuerzas capaces de deformarlo con el doble propósito de que se adapte a la forma del espacio confinado por las cimbras y expulse el aire atrapado en su seno, de manera que resulte un material que sea lo más compacto posible.

Es esta tercera etapa, las acciones a que debe someterse el concreto fresco son relativamente predecibles, ya que normalmente los equipos que se utilizan para su

compactación actúan por medio de fuerzas vibratorias. De tal manera, lo que debe procurarse es canalizar la resistencia que el concreto opone para ser moldeado y la capacidad del equipo vibratorio para vencer esta resistencia.

### **5.4.1. Métodos de compactación**

#### **5.4.1.1. Métodos mecánicos**

Entre los métodos mecánicos se encuentran los siguientes:

- ✦ Vibración
- ✦ Centrifugación
- ✦ Mesas de golpeteo o caída

El método de compactación más empleado en la actualidad es el vibrado, y recibirá la mayor atención en este estudio. El vibrado es un método especialmente adecuado para las consistencias más rígidas, propias de los concretos de alta calidad. El vibrado puede ser tanto interno como externo.

### **5.4.2. Equipo para vibrado**

#### **5.4.2.1. Vibradores internos**

Los vibradores internos, llamados con frecuencia vibradores de escoplo o vibradores hurgadores, tienen una cabeza vibradora que se sumerge en el concreto y actúa en forma directa sobre él. En la mayoría de los casos, los vibradores internos dependen del efecto enfriador del concreto que los circunda para evitar el sobrecalentamiento.

Todos los vibradores internos que se utilizan en la actualidad son de tipo rotatorio. Los impulsos vibratorios emanan de la cabeza del vibrador en ángulo recto.

Entre los equipos más utilizados están los siguientes:

- ✦ Tipo de flecha flexible
- ✦ Vibrador de motor eléctrico en la cabeza
- ✦ Vibradores neumáticos
- ✦ Vibradores hidráulicos

#### 5.4.2.1.1. Selección de un vibrador interno para la obra

El requisito principal para un vibrador interno es su efectividad para compactar el concreto; debe tener un radio de acción adecuado y ser capaz de “licuar” y desaerear con rapidez el concreto. En lo posible, el vibrador debe ser también de operación confiable, de peso ligero, fácil de manejar y manipular y resistente al desgaste, y ser tal que no dañe los accesorios ahogados.

La efectividad de los vibradores internos depende ante todo del diámetro de la cabeza, de la frecuencia y de la amplitud.

El radio de acción y, por lo tanto, el espaciamiento de las inserciones, dependen no sólo de las características del vibrador sino también de la trabajabilidad de la mezcla y el grado de congestamiento del acero.

Al seleccionar el vibrador y el procedimiento de vibración debe considerarse el tamaño del vibrador respecto al tamaño de la cimbra. El agrietamiento de las superficies de concreto depende de la contracción por secado que ocurre con una alta concentración de pasta de cemento traída a la superficie por un vibrador demasiado grande para esa aplicación específica.

La mejor medida del rendimiento de un vibrador es su efectividad en la compactación del concreto.

#### 5.4.2.2. Vibradores externos

Entre los equipos utilizados en la construcción están los siguientes:

- |                          |   |   |
|--------------------------|---|---|
| ✦ Vibradores para cimbra | } | vibrador rotatorio<br>vibrador reciprocante |
|--------------------------|---|---|
- ✦ Mesas vibratorias
- ✦ Vibradores superficiales

Unos de los equipos más utilizados son los vibradores para cimbra, los cuales son vibradores externos fijados al lado exterior de la cimbra o el molde. Hacen vibrar la cimbra, la



que a su vez transmite las vibraciones al concreto. Los vibradores para cimbra son autoenfriantes. Pueden ser de tipo rotatorio o de acción vertical.

#### 5.4.2.2.1. Selección de un vibrador externo para cimbras verticales

Para mezclas muy rígidas se prefiere, por lo general, la vibración de baja frecuencia y gran amplitud. Esta vibración de baja frecuencia y gran amplitud generalmente permite una mejor compactación y mejores superficies (con menos agujeros pequeños) para consistencias más plásticas. La línea divisoria entre la baja y la alta frecuencia para la vibración externa se considera arbitrariamente en las 6,000 vibraciones por minuto (100 Hz).

La efectividad de un vibrador de cimbra es, en gran parte, una función de la aceleración impartida al concreto por la cimbra. Las aceleraciones en el rango de 1 a 2 g se recomienda generalmente para mezclas plásticas y de 3 a 5 g para mezclas rígidas. Además, la amplitud no debe ser menor de 0.025 mm para mezclas plásticas o 0.050 mm para mezclas rígidas.

La aceleración de una cimbra es una función de la fuerza centrífuga del vibrador en relación con la masa de la cimbra y el concreto. Las siguientes fórmulas empíricas, recomendadas por Forssblad, han mostrado su utilidad para estimar la fuerza centrífuga del vibrador de cimbra, necesaria para proporcionar una consolidación adecuada<sup>31</sup>:

- ✦ Para mezclas fluidas en cimbras de vigas y muros: fuerza centrífuga = 1.5 [(masa de la cimbra) + 0.2 (masa del concreto)].
- ✦ Para mezclas rígidas en tuberías y otras cimbras rígidas: fuerza centrífuga = 1.5 [(peso de la cimbra) + 0.2 (peso del concreto)].

Cualquier fórmula empleada debe cotejarse con la experiencia en el campo. Se sugiere que el usuario se ponga en contacto con el fabricante del vibrador para proporcionarle planos de la estructura que se pretende vibrar y solicitar su consejo en cuanto al tamaño, cantidad y ubicación de las unidades vibradores. La distancia adecuada entre los vibradores de cimbra generalmente se encuentra en el rango de 1.5 a 2.5 m, puede llegarse a requerir vibración interna suplementaria para secciones de espesores mayores a los 30 centímetros.

<sup>31</sup> ACI 390R-96, *Compactación del Concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, 1998, pág. 16.

### **5.4.3. Aplicación de métodos combinados**

En ciertas condiciones, una combinación de dos o más métodos de compactación proporcionan mejores resultados.

A veces es posible combinar la vibración interna y la externa con buenos resultados en trabajos prefabricados y, ocasionalmente, en concretos colados en obra. Algunas veces se aplican vibradores para la compactación de rutina y vibradores internos para empleo local en secciones críticas muy reforzadas, propensas a los vacíos y a la adherencia deficiente con el acero de refuerzo. En secciones en las que, por el contrario, la compactación principal se lleva a cabo mediante vibradores internos, también puede aplicarse vibración de cimbras para lograr el aspecto requerido en la superficie.

### **5.4.4. Prácticas de vibración recomendadas para la construcción en general**

Después de haber seleccionado el equipo de vibración adecuado, éste debe ser manejado por operarios conscientes y bien entrenados. El operador del vibrador debe haber desarrollado, a través de su experiencia, la capacidad de determinar el tiempo necesario que debe permanecer el vibrador en la mezcla a fin de asegurar una compactación adecuada. Por medio de una revisión sistemática de su trabajo previo, el operador y su supervisor deben poder determinar el espaciamiento del vibrador y el tiempo de vibración necesario para producir concreto denso sin segregación.

#### **5.4.4.1. Procedimiento para vibración interna**

El concreto se debe depositar en capas compatibles con el trabajo que se ejecute. En grandes capas y secciones pesadas, la profundidad máxima de la capa debe ser de un máximo de 50 cm. La profundidad debe ser casi igual a lo largo de la cabeza del vibrador. En muros y columnas, la profundidad de las capas generalmente no debe exceder los 50 cm. Las capas deben estar lo más niveladas posible, para que el vibrador no se use para mover el concreto hacia los lados, ya que esto puede causar segregación. Se pueden obtener superficies bastantes niveladas depositando el concreto en la cimbra a intervalos cortos; el empleo de trompas de elefante es, en ocasiones, un buen auxiliar.

Aunque el concreto se haya depositado con cuidado en la cimbra, probablemente haya algunos pequeños amontonamientos o elevaciones. Puede ejecutarse una pequeña nivelación insertando el vibrador en el centro de estas elevaciones a fin de aplanarlas. Debe evitarse el movimiento excesivo, especialmente en los elementos estructurales con grandes cantidades de refuerzo.

Después de haber nivelado la superficie, el vibrador debe insertarse verticalmente con un espaciamiento uniforme sobre toda el área de colocación. La distancia entre las inserciones debe ser aproximadamente 1.5 veces el radio de acción, y debe ser de tal modo que el área que se vea afectada por el vibrador se traslape algunos centímetros a el área adyacente recién vibrada. En el caso de losas, un vibrador de largo normal se deberá inclinar hacia la vertical, o un vibrador corto de 13 cm de largo se tendrá que sostener verticalmente.

Un método alternativo que se ha usado con gran éxito es el siguiente. El vibrador debe penetrar rápidamente hasta el fondo de la capa, al menos, 15 cm dentro de la capa precedente. El vibrador debe ser manejado con un movimiento hacia arriba y hacia abajo, generalmente de 5 a 15 segundos, a fin de unir entre sí ambas capas. El vibrador debe retirarse en forma gradual, igualmente mediante una serie de movimientos hacia arriba y hacia abajo. El movimiento hacia abajo debe ser rápido a fin de aplicar una fuerza al concreto, la cual, a su vez, incrementará la presión interna en la mezcla fresca recién colocada.

Saque rápidamente el vibrador del concreto cuando la cabeza quede tan sólo parcialmente inmersa en el concreto. El concreto debe llenar el espacio dejado por el vibrador. En el caso de mezclas secas en donde el hoyo no se cierre al momento de retirar el vibrador, algunas veces el problema se soluciona con reinsertar el vibrador nomás que  $\frac{1}{2}$  del radio de influencia; si esto no resulta, se debe cambiar la mezcla o el vibrador.

Las losas delgadas soportadas sobre vigas se deberán vibrar en dos etapas; primero, después de haber colocado el concreto de la viga; y otra vez cuando el concreto se lleve a grado de acabado.

Cuando el colado consta de varias capas, cada capa debe colarse cuando la precedente esté aún en estado fluido, a fin de evitar juntas frías. Cuando la capa subyacente ha sobrepasado el punto de endurecimiento en el que todavía puede penetrar el vibrador, puede lograrse buena adherencia vibrando intensa y sistemáticamente el concreto nuevo en contacto con el anterior; no obstante, al retirar la cimbra se observará una línea de junta inevitable.

#### **5.4.4.2. Vibrado del acero de refuerzo**

Cuando el vibrador no puede llegar hasta el concreto, como ocurre en áreas congestionadas por el acero de refuerzo, resulta muy útil vibrar las porciones expuestas de las varillas de refuerzo. Algunos ingenieros han opinado sobre el posible detrimento de la adherencia del concreto y el acero causado por la vibración transmitida a través del refuerzo al concreto de capas inferiores que han fraguado parcialmente; sin embargo, un análisis cuidadoso del concreto endurecido y compactado de esta manera demostró que dichos temores no tienen fundamento. Siempre que el concreto se pueda mover todavía, esta vibración puede incluso mejorar la adherencia entre el concreto y el acero mediante la eliminación de aire atrapado y el agua situados debajo de las varillas de refuerzo.

Para este fin debe emplearse un vibrador para cimbra fijado a la varilla mediante un dispositivo apropiado. Adaptar un vibrador de inmersión a una varilla de refuerzo puede dañar el vibrador.

#### **5.4.5. Juzgando la adecuación de la vibración interna**

Hasta la actualidad no hay un medio totalmente seguro y rápido que nos ayude a determinar lo adecuado de la compactación del concreto recién colocado. La adecuabilidad de la vibración interna se juzga principalmente por la apariencia superficial de cada capa. Los principales indicadores de un concreto bien compactado son:

- ✦ Empotramiento de los agregados de gran tamaño.
- ✦ Cese general de la aparición de las burbujas grandes de aire atrapado en la superficie superior. Las capas gruesas requieren mayor tiempo de vibrado que las capas delgadas, ya que las burbujas que están en el fondo tardan más en llegar a la superficie.

A veces el sonido o tono del vibrador es un buen indicio. Cuando un vibrador de inmersión se inserta en el concreto, por lo general se aprecia una reducción de la frecuencia; después, ésta se recupera y, por fin, el tono se hace constante cuando el concreto está libre de aire atrapado. El operario desarrolla con la experiencia la sensibilidad necesaria para notar, a través del sonido que emite el vibrador, cuándo la compactación total se ha logrado.

#### **5.4.6. Consecuencias de la vibración impropia**

Los defectos más serios que resultan por la falta de vibración son el apanalamiento, excesivos huecos de aire atrapado (cavidades), vetas de arena y líneas de colado.

##### **5.4.6.1. Apanalamiento**

Ocurre cuando el mortero no llena el espacio entre las partículas de agregado grueso. La presencia de segregación indica que la primera etapa de la compactación no se completó en esos sitios. Cuando aparece en la superficie, es necesario picar el área y repararla. Dichas reparaciones deben ser las menos posibles, ante todo por que afectan en forma negativa el aspecto de la estructura y reducen la resistencia del concreto. Por lo regular, la segregación es la consecuencia del empleo de vibradores inadecuados y defectuosos, o bien de procedimientos incorrectos de vibrado.

##### **5.4.6.2. Exceso de huecos debidos al aire atrapado**

Los concretos que ya no presenten segregación aún tienen huecos, pues rara vez es posible eliminar por completo el aire atrapado. La cantidad de aire que queda en el concreto después del vibrado es, en gran parte, una consecuencia del equipo y procedimiento de vibrado, pero también se ve afectada por las propiedades de la mezcla de concreto, por la colocación durante el colado, así como por otros factores. Cuando no se emplean el equipo y los procedimientos adecuados, o cuando existen condiciones desfavorables, el contenido de aire atrapado será elevado y es probable que los huecos sean excesivos.

Para reducir los huecos en la superficie del concreto debe acortarse la distancia entre las inmersiones de los vibradores internos y aumentarse el tiempo de cada una de ellas. También debe hacerse una hilera de inmersiones cerca de la cimbra, pero sin tocarla. Cuando el contacto con la cimbra sea inevitable, la punta del vibrador debe protegerse con hule, pero,

aún en este caso, debe evitarse en lo posible el contacto, ya que se puede dañar la cimbra y desfigurarse la superficie del concreto. Resulta crítico que las posiciones de los lugares donde se va a insertar el vibrador estén bien traslapadas.

Deben evitarse los recubrimientos de gran viscosidad en las cimbras, así como aquellos que se aplican en capas gruesas, ya que tienen a retener aire y burbujas de agua.

Los vibradores para cimbra tienden a mover el mortero hacia la misma y, cuando se emplean en combinación con vibradores internos, han demostrado eficacia para reducir el tamaño y número de huecos en la superficie.

#### **5.4.6.3. Vetas de arena**

Las vetas de arena son el resultado del sangrado intenso a lo largo de la cimbra que, a su vez, es consecuencia de las características y proporciones de los materiales y de los métodos empleados para colar el concreto. El colado del concreto a través del acero de refuerzo y su colocación en capas muy gruesas sin un vibrado adecuado, también puede causar vetas y segregación. Otra de las causas es fijar vibradores a cimbras con fugas, lo cual produce una acción de bombeo que da como resultado la pérdida de finos o la entrada de aire por las juntas.

#### **5.4.6.4. Líneas de colado**

Las líneas de colado son líneas oscuras que aparecen en la superficie cimbrada y que hacen evidente los límites entre los colados de concreto adyacentes. Por lo general indican que, al vibrar una capa, el vibrador no se introdujo lo suficiente para penetrar en la capa subyacente.

#### **5.4.6.5. Juntas frías**

Las demoras en la colocación pueden ocasionar juntas frías. Para evitar éstas, la colocación debe reducirse sustancialmente antes de que la superficie se endurezca. En demoras inusualmente largas durante la colocación, el concreto debe mantenerse fresco revibrándolo periódicamente. El concreto debe vibrarse aproximadamente en intervalos de 15 minutos o menores, dependiendo de las condiciones de trabajo. Sin embargo, el concreto no debe tampoco sobrevibrarse hasta el punto de que se produzca segregación. Además,

conforme se aproxime el tiempo de fraguado inicial, la vibración se debe evitar y permitir que endurezca el concreto, de lo contrario se producirá una junta fría y se deberían tomar las medidas de reparación adecuadas.

## **5.5. Curado**

### **5.5.1. Importancia del curado**

El curado es el mantenimiento de un adecuado contenido de humedad y temperatura en el concreto a edades tempranas, de manera que éste pueda desarrollar las propiedades para las cuales fue diseñada la mezcla. El curado comienza inmediatamente después del vaciado (colado) y el acabado, de manera que el concreto pueda desarrollar la resistencia y la durabilidad deseada.

Sin un adecuado suministro de humedad, los materiales cementantes en el concreto, no pueden reaccionar para formar un producto de calidad. El secado puede eliminar el agua necesaria para esta reacción química denominada hidratación y por lo cual el concreto no alcanzará sus propiedades potenciales.

La temperatura es un factor importante en un curado apropiado, basándose en la velocidad de hidratación y por lo tanto, el desarrollo de resistencias es mayor a temperaturas más altas. Generalmente, la temperatura del concreto debe ser mantenida por encima de los 50 °F (10°C) para un ritmo adecuado de desarrollo de resistencias. Además debe mantenerse una temperatura uniforme a través de la sección del concreto, mientras está ganando resistencia, para evitar las grietas por choque térmico.

Para el concreto expuesto, la humedad relativa y las condiciones del viento son también importantes; ellas contribuyen al ritmo de pérdida de humedad en el concreto y pueden dar como resultado agrietamiento, una pobre calidad y durabilidad superficial. Las medidas de protección para el control de la evaporación de humedad de las superficies del concreto antes de que fragüe, son esenciales para evitar la fisuración por retracción plástica.

### 5.5.1.1. Contenido satisfactorio de humedad

La cantidad de agua de mezclado en el concreto al momento del colado es normalmente más de la que se debe retener para el curado. Sin embargo, la pérdida excesiva de agua por evaporación puede reducir la cantidad de agua retenida a un nivel inferior al necesario para el desarrollo de las propiedades deseadas. Los efectos potencialmente perjudiciales de la evaporación deben evitarse, ya sea mediante la aplicación de agua o impidiendo la evaporación excesiva. En la figura 5.2<sup>32</sup> se muestran los efectos de la temperatura del aire, la del concreto, de la humedad relativa y de la velocidad del viento sobre la rapidez de evaporación en la superficie. Cuando estos factores se combinan de manera que causen excesiva evaporación del agua de mezclado, puede ocurrir agrietamiento por contracción en el concreto en estado plástico. La figura 5.2 ayudará en la evaluación de estos efectos y será una guía para conocer la rapidez de evaporación. El hecho de no evitar esta evaporación excesiva es causa frecuente de grietas por contracción plástica y pérdida de resistencia del material más cercano a la superficie.

---

<sup>32</sup> ACI 390R-96, *Guía Práctica para la Colocación del Concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, 2002.



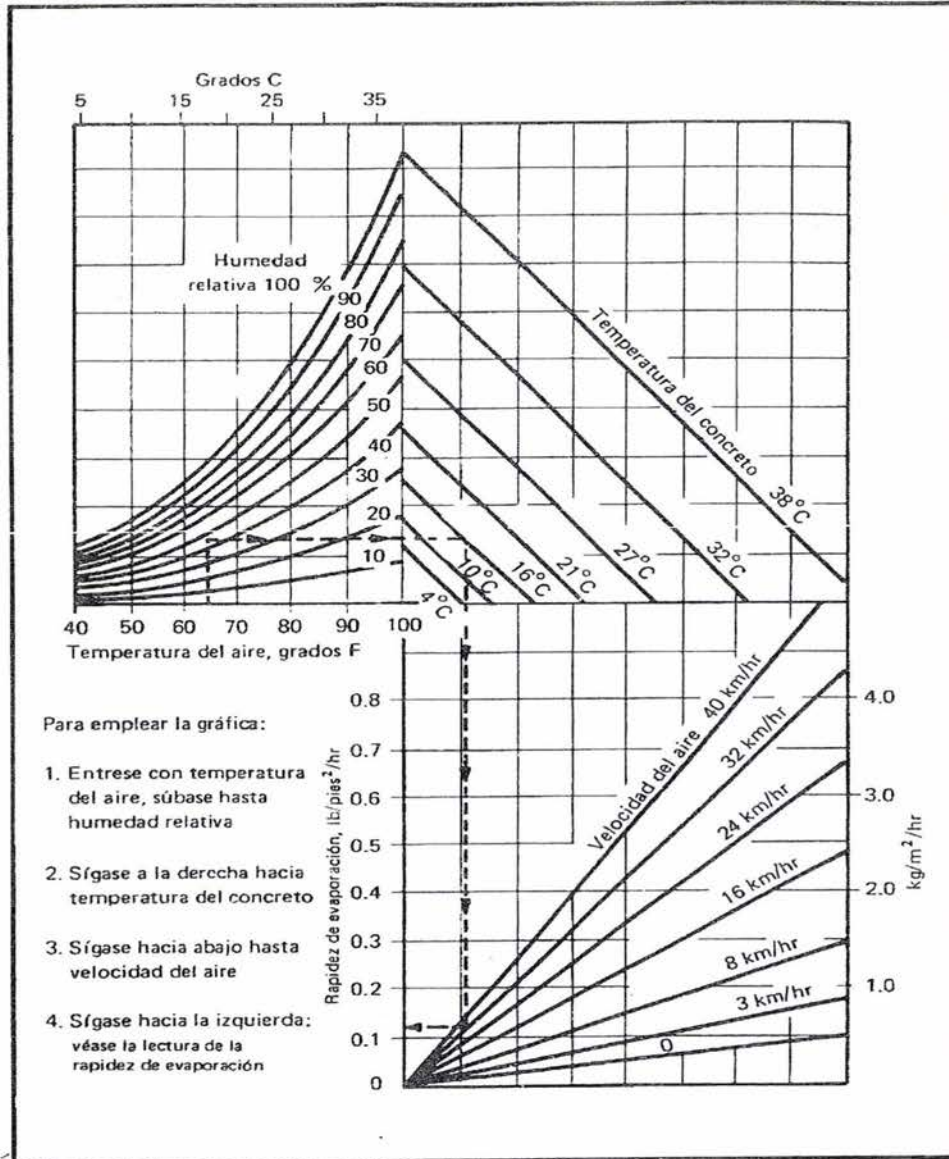


Fig. 5.1. Efecto de las temperaturas del concreto y del aire, de la humedad relativa y de la velocidad del aire, sobre la rapidez de evaporación de la humedad de la superficie del concreto. Esta figura proporciona un método gráfico para estimar la pérdida de humedad de la superficie, en diversas condiciones atmosféricas. Para emplear la gráfica se deben seguir los cuatro pasos señalados. Si la rapidez de evaporación excede a 1.0 kg/m<sup>2</sup>/hr será necesario tomar precauciones para evitar la pérdida de humedad de la superficie del concreto.

### 5.5.2. Métodos y materiales para el curado

Existen diversos materiales, métodos y procedimientos para el curado del concreto, pero los principios son los mismos: garantizar el mantenimiento de un contenido satisfactorio de humedad y temperatura para que se desarrollen las propiedades deseadas. Los métodos y materiales que se utilizan para el curado son los siguientes:

- + **Con agua** {
  - por estancamiento o inmersión
  - rociado o aspersión
  - cubiertas húmedas
  
- + **Papel impermeable** { Se recomienda para superficies horizontales
  
- + **Membranas de curado** {
  - parafinas
  - resinas
  - hules
  - solventes
  
- + **Curado a vapor** { mejora la resistencia del concreto a edades tempranas

### 5.5.3. Protección y curado en clima frío

De acuerdo con el informe del Comité ACI 306, en clima frío el concreto se debe curar y proteger contra la congelación. Aunque no es probable que el compuesto a bajas temperaturas seque con una rapidez indeseable, se debe tener un especial cuidado en mantener una humedad satisfactoria en el concreto al que se le éste dando la protección requerida. El concreto se debe proteger contra la congelación por lo menos hasta que se desarrolle una resistencia a la compresión de 35 kg/cm<sup>2</sup>. Nunca se debe permitir que el concreto sin aire incluido se congele o descongele en condiciones de saturación. El concreto con aire incluido tampoco se debe congelar y descongelar en condiciones de saturación antes de desarrollar una resistencia a la compresión de 240 kg/cm<sup>2</sup>.

### 5.5.4. Protección y curado en clima cálido

En clima cálido el concreto se debe curar de acuerdo con lo previsto en el informe ACI 305. Puesto que la temperatura elevada provoca un rápido secado del concreto, la protección y el curado son muy importantes. Cuando se emplee curado con agua, éste debe ser continuo para evitar cambios de volumen debidos al humedecimiento. A alta temperatura, la necesidad

de un curado continuo es mayor durante los primeros días después del colado del concreto. Cuando se cuele en clima cálido y las condiciones favorables de humedad se mantienen continuamente, el concreto puede alcanzar un grado elevado de madurez en muy poco tiempo.

El curado será efectivo cuando los contenidos de humedad y temperatura mantenidos permitan el desarrollo de los niveles deseados en las propiedades de concreto y eviten el agrietamiento, escamado y cuarteaduras, que pudieran resultar de no haberse llevado a cabo. Estas consecuencias, cuando son resultado de un curado inadecuado, son normalmente causadas por no mantener un contenido satisfactorio de humedad en el concreto inmediatamente adyacente a la superficie.

### **5.5.5. Curado del concreto de alto comportamiento**

En el caso del concreto de alto comportamiento, es esencial el curado húmedo desde el momento más temprano posible, y debe continuarse hasta que la resistencia a la tensión de la pasta de cemento que se está hidratando sea lo suficientemente alta para resistir el microagrietamiento interno.

Debemos manifestar muy claramente que el curado con membranas no es lo suficientemente bueno en el caso del concreto de alto comportamiento. Todo lo que hace el curado con membrana es evitar la pérdida de agua del concreto. Esto es suficientemente bueno cuando la relación agua/cemento es mayor de aproximadamente 0.42, debido a que la cantidad de agua en la mezcla es adecuada para una hidratación total. Sin embargo, a valores muy bajos de relación agua/cemento en el concreto de alto comportamiento, es esencial que ingrese agua adicional del exterior hacia el concreto. Lo que debe hacerse entonces es aplicar temporalmente una membrana, durante algunas horas cuando mucho, de modo que evite el desarrollo de agrietamiento por contracción plástica. Pero tan pronto como haya ocurrido hidratación significativa, es esencial que ingrese dentro del concreto agua del exterior. Esto puede hacerse colocando mantas de yute premojadas o geotextiles premojados cubiertos con hojas de plástico, con una manguera perforada debajo del plástico que pueda mantener la manta permanentemente mojada.

La hidratación del cemento en el concreto de alto comportamiento es muy rápida y, si se le permite que continúe interrumpidamente por medio de un constante suministro de agua de curado, no se formarán meniscos en los poros capilares, y no habrá contracción autógena, por lo menos cerca de la fuente externa de agua, es decir, la zona expuesta de la superficie del miembro de concreto.

Un punto importante que se discute con frecuencia en las obras es el plazo durante el cual debe mantenerse el curado. Por razones prácticas y económicas es necesario definir una duración mínima requerida, la cual depende de diversos factores y circunstancias tales como las características geométricas de la estructura, las condiciones ambientales y la clase de cemento, principalmente. Para estructuras ordinarias, expuestas a condiciones no extremosas, frecuentemente se especifica un lapso mínimo de curado de siete días cuando se utiliza cemento portland ordinario, el cual se recomienda ampliar a catorce días si se emplea cemento portland-puzolana o una puzolana adicionada al cemento portland, como es el caso de nuestro concreto antibacterial.

## CAPÍTULO 6

# USOS Y BENEFICIOS

### 6.1 Usos

Debido a sus propiedades el concreto antibacterial, es imprescindible en lugares como:

- ✦ **Instituciones hospitalarias y del sector salud**



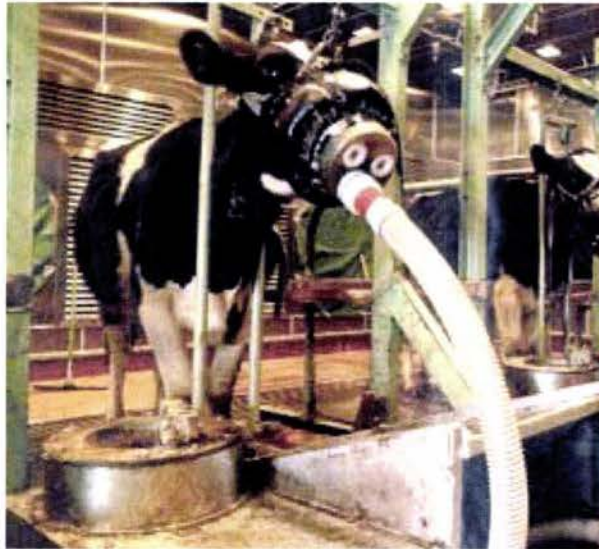
✦ **Industria alimenticia**



✦ **Industria cosmética y farmacéutica**



✦ Instalaciones de manejo, crianza y sacrificio de animales

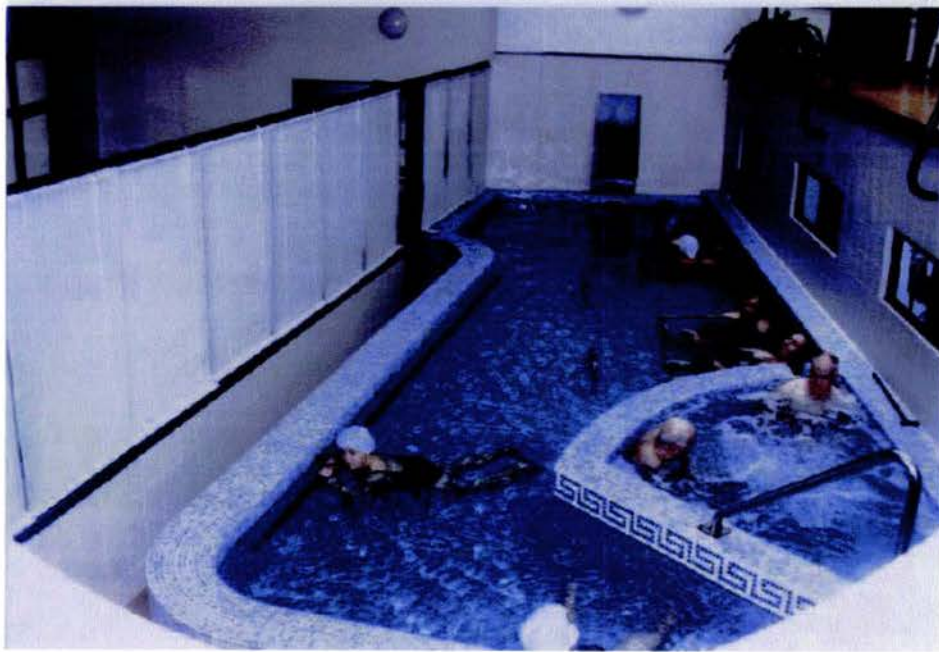




✦ Instituciones educativas y/o recreativas



✦ Albergas



+ Restaurantes



+ Laboratorios



## 6.2 Beneficios

El utilizar concreto antibacterial, evitamos utilizar agentes químicos (desinfectantes) los cuales contienen iones de metales pesados, que resultan perjudiciales para el ser humano. Este concreto inhibe el crecimiento de bacterias con un grado de toxicidad menor, haciendo las estructuras realizadas con este concreto sitios con un alto grado de sanidad; es la solución ideal para construir ambientes limpios y totalmente desinfectados.

Además de inhibir el crecimiento de bacterias, también se obtendrán los siguientes beneficios:

- ✦ **Reduce riesgos por contaminación**



✦ **Mayor resistencia al ataque de agentes dañinos**



✦ **Estructuras más durables**



✦ **Menores costos de mantenimiento**



---

---

## CONCLUSIONES

**PRIMERA.** Sin duda alguna la utilización de los concretos de alto comportamiento (CAC) en un futuro muy próximo, serán los que dominaran en la construcción de estructuras importantes en nuestro país.

**SEGUNDA.** El concreto antibacterial, se presenta como una alternativa interesante en aquellas estructuras donde se requieren ambientes totalmente limpios y desinfectados, capaz de resistir el ataque de los agentes dañinos y así obtener una estructura con una larga vida de servicio.

Nada de esto se logrará, si no se lleva una adecuada y cuidadosa selección de los materiales; una atención especial a la invariabilidad de la relación agua/cemento; un eficiente control de calidad, efectuándose cada una de las pruebas al concreto en estado fresco como en el endurecido, todo con apego a la norma correspondiente; además de realizar técnicas de colocación, compactación y curado cuidadosamente aplicadas; por último que la mano de obra y las técnicas de construcción sean eficientes.

Es pertinente mencionar que el curado toma un valor importante en el comportamiento final del concreto antibacterial, por ser éste la última acción que se realiza en el concreto, el realizar un curado inadecuado, traerá como consecuencia un concreto deficiente, el cual no cumplirá con las propiedades para las cuales fue diseñado. De nada servirá tener materiales de primera calidad, si se fracasa en el producto final, por ello la importancia de realizar un curado adecuado.

**TERCERA:** Con el uso del concreto antibacterial nos puede enseñar como hacer concreto ordinario de buena calidad. Daremos aquí dos ejemplos:



- a) Se estableció claramente que el concreto antibacterial si no recibe un curado adecuado tendrá una calidad pobre. Por lo tanto, cualquier contratista que emplee concreto antibacterial tendrá que aprender a seguir los procedimientos de curado apropiados. Cuando, en alguna otra obra de construcción, este contratista este colocando concreto ordinario, es muy probable que continúe utilizando la buena practica que ha aprendido. En otras palabras él aplicará un buen curado. En el caso del concreto ordinario, es decir, concreto con una relación a/c de 0.5 o más, el buen curado puede tener algo menos de importancia pero, sin embargo, mejorará el desempeño y la durabilidad de la estructura de concreto.
- b) Para hacer concreto antibacterial es esencial tener un control de calidad muy estricto de los materiales. La dosificación debe ser muy precisa; la cantidad de agua. La granulometría final del agregado no debe variar. ¡No es aceptable complacer al operario que coloca el concreto agregar agua adicional a la mezcla!. Así pues el productor de concreto debe desarrollar un sistema de producción de primera clase.

**CUARTA.** El concreto antibacterial es una de las tecnologías más recientes de los concretos de alto comportamiento, por el hecho de ser un producto nuevo la información existente es mínima, así mismo no se proporcionó la información requerida por parte de las principales fuentes de información que están directamente relacionadas con este concreto. Por lo cual se tuvo dificultad de llevar a buen término ésta investigación.

**QUINTA.** Existen ocasiones, donde la baja permeabilidad del concreto antibacterial es desventajosa. Esto es así en el caso del fuego, el cual da como resultado un incremento rápido de temperatura del concreto. Debido a la muy baja permeabilidad, nada del agua presente dentro del concreto puede escapar lo suficientemente rápido; la presión de agua resultante puede causar rompimiento de la pasta de cemento y astillamiento del concreto.

- SEXTA.** Es importante resaltar lo expuesto en la parte 3.4.1.3., que de acuerdo con el ACI 212.3 R-91, los aditivos antibacteriales pueden llegar a ser inefectivos al paso del tiempo. Por otra parte, existe información sobre el concreto antibacterial que se distribuye en nuestro país, la cual nos dice, que este concreto puede ser perjudicial para el ser humano, hasta poder llegar a ser cancerígeno.
- SEPTIMA.** Con la información recabada en este trabajo se pretende sirva de base para futuras líneas de investigación, donde se prueben las propiedades del concreto antibacterial, realizando pruebas con concretos testigos, y así corroborar si realmente este tipo de concreto es efectivo, además de verificar lo antes mencionado en la sexta conclusión; y con ello se logrará un mayor conocimiento y difusión acerca de este concreto entre ingenieros, arquitectos, técnicos de la construcción y estudiantes relacionados con la construcción.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACI 212, *Aditivos para concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, 1982, 166 págs.
- ACI 390R-96, *Compactación del Concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, 1998, 70 págs.
- ACI 390R-96, *Guía Práctica para la Colocación del Concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, 2002, 66 págs.
- C. HOVER, Kenneth, *Cerrando los Vacíos: Como Hacer Concreto menos Permeable y más Durable*, en Boletín del Instituto Colombiano Productores de Concreto, n. 47, Colombia, Octubre-Diciembre de 1989.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Instituto de Ingeniería de la UNAM, *Manual de Tecnología del Concreto sección 1*, Limusa-Noriega Editores, México, 1994, 258 págs.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Instituto de Ingeniería de la UNAM, *Manual de Tecnología del Concreto sección 2*, Limusa-Noriega Editores, México, 1994, 262 págs.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Instituto de Ingeniería de la UNAM, *Manual de Tecnología del Concreto sección 3*, Limusa-Noriega Editores, México, 1994, 382 págs.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, Instituto de Ingeniería de la UNAM, *Manual de Tecnología del Concreto sección 4*, Limusa-Noriega Editores, México, 1997, 512 págs.
- COTTIER CAVIEDES, Juan Luis, *Concretos de Alto Comportamiento*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, n. 75, México, Abril de 1996.
- KUMAR METHA, P, *Tecnologías del Concreto para un Desarrollo Sustentable*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, n. 156, México, Mayo de 2001.
- KUMAR METHA, P, *Avances en la Tecnología del Concreto*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, n. 149, México, Octubre de 2000.
- KUMAR MEHTA, P y M. MONTEIRO, Paulo J, *Concreto: Estructura, Propiedades y Materiales*, IMCYC, México, 1999, 381 págs.
- MARTÍNEZ MONTOYA, Marco Cesar, *Aditivos para Concreto Hidráulico*, en Tesis de Postgrado (UNAM), México, 1999.
- MARTÍNEZ SÁNCHEZ, B, *Materiales de Construcción, La Prueba de Permeabilidad Rápida a Cloruros como Índice de la Durabilidad de las Estructuras de Hormigón*, Instituto Eduardo Torroja, vol. 53, nos. 271-272, Madrid/España, Julio-Diciembre de 2003, 220 págs.

NEVILLE, Adam, *Tecnología del Concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, 1999, 612 págs.

NEVILLE, Adam y PIERRE-CLAUDE, Aitcin, *Concreto de Alto de Desempeño*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, n. 139, México, Diciembre de 1999.

NORMA MEXICANA NMX-C-403-1999-ONNCCE: “Industria de la construcción – concreto hidráulico para uso estructural”.

NORMA MEXICANA NMX-C-414-1999-ONNCCE: “Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba”.

NORMA MEXICANA NMX-C-162-2000-ONNCCE: “Industria de la construcción – concreto – determinación de la masa unitaria, calculo del rendimiento y contenido de aire del concreto fresco por el método gravimétrico”.

NORMA MEXICANA NMX-C-156-1988-ONNCCE: “Industria de la construcción – concreto – determinación del revenimiento en el concreto fresco”.

NORMA MEXICANA NMX-C-083-1997-ONNCCE: “Industria de la construcción – concreto – determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto”.

NORMA MEXICANA NMX-C-111-1988: “Industria de la construcción – concreto – agregados – especificaciones”.

NORMA MEXICANA NMX-C-122-1982: “Industria de la construcción – agua para concreto”.

NORMA MEXICANA NMX-C-157-1987: “Industria de la construcción – concreto – determinación del contenido de aire del concreto fresco por el método de presión”.

NORMA MEXICANA NMX-C-255-1988: “Industria de la construcción – aditivos químicos que reducen la cantidad de agua y/o modifican el tiempo del concreto”.

NORMA MEXICANA NMX-C-161-1997-ONNCCE: “Industria de la construcción – concreto fresco – muestreo”.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-092-SSA1-1994: “Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa”.

ORTEGA GONZALEZ, Arturo, *Evolución Tecnológica del Concreto y la Arquitectura Contemporánea*, IMCYC, México, 1999, 175 págs.

PCA, Concrete Technology Today, *Concreto Impermeable*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, México, Noviembre de 1991.

PCA, *Diseño y control de mezclas de concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, México, 1992, 230 págs.

RAMAKRISHNAN, V y K. PANCHALAN, Ramesh, *Bacterial Concrete*, en Revista ICI Journal, Indian Concrete Institute, n. 1, United States of America, Abril-Junio de 2001.

RODRÍGUEZ CAMACHO, Rosa Elba, *Concreto Profesional Antibacteriano*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, n. 140, México D.F., Enero de 2000.

RODRÍGUEZ CAMACHO, Rosa Elba, *El Concreto Antibacteriano, Estudio Sobre su Capacidad de Inhibición Microbiana*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, n. 149, México D.F., Octubre de 2000.

RUIZ OSUNA, Rigel, *Guía para Prevenir y Controlar el Deterioro de las Estructuras de Concreto Sometidas a Ambientes Marinos*, en Tesis de Postgrado (UNAM), México, Julio de 2003, 69 págs.

SKALNY, Jan, *La Trabajabilidad del concreto*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, México, Noviembre de 1991.

TENA COLUNGA, José Antonio, *Avances en Tecnología del Concreto*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, n. 120, México, Mayo de 1998.

WILLIAMS S., Phelan, *Aditivos y concreto de alto desempeño: una combinación acertada*, en Revista Construcción y Tecnología, IMCYC, n. 134., México, Julio de 1999.

ZABALETA G., Hernán, *Tecnología de la construcción en hormigón*, Grupo Polpaico, Santiago de Chile, 2003, 198 págs.

# ANEXO

# ANEXO A

## La prueba de permeabilidad rápida de cloruros (RCPT)

Se presenta una investigación en donde se prueban diferentes diseños de mezcla con el fin de analizar el grado de afectación de los diferentes factores que intervienen en un diseño de mezcla y su contribución en la disminución de la permeabilidad; y poder, así, diseñar concretos específicos para cada condición particular de ataque, evitando sobreprotección y sobre costo en la estructura.

### 1. Experimentación

#### 1.1. Diseño de la mezcla

El experimento se realizó con 62 diferentes diseños de mezcla, que agrupan diversas variables, diferentes relaciones a/c, consumos y tipos de cemento, tipos de árido grueso y diferentes niveles de adiciones cementantes suplementarios (ACS). Los materiales empleados y sus cantidades se muestran en la tabla 1.

Variables	Cantidad	Tipo
Relación a/c	0.35 a 0.60	
Cemento	250, 300, 350 y 400 kg/m <sup>3</sup>	Tipo I y IP (ASTM) CPO Y CPP (NMX)
Cementantes suplementarios	5, 10 y 15%	Humo de Sílice
Áridos	Variable	Grueso Fino Caliza y Andesita Andesita

Tabla 1.- Variables del experimento

Los resultados se presentan analizando cada variable en cada nivel de afectación y uso, tratando de determinar las cantidades y calidades óptimas para cada condición particular del uso del hormigón.

#### 1.2. Acondicionamiento de las muestras

Todas las muestras se realizaron a los 90 días de edad de las muestras y fueron preacondicionadas para la prueba, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C 1202. Los ensayos fueron hechos bajo las mismas condiciones de impregnación de resina, secado, temperatura y saturación para cada espécimen.

### 1.3. Método de prueba

El método de prueba se realizó siguiendo las pautas de la norma ASTM C 1202, asimismo, se utilizaron los márgenes de dicha norma para calificar los diseños de mezcla de acuerdo a su resultado individual y en promedio.

La prueba fue ejecutada con equipo automatizado Proove IT, el cual proporciona el historial de lecturas de amperaje en intervalos de 5 minutos durante las 6 horas de prueba, arrojando, finalmente, el resultado en culombios y la clasificación del hormigón según los rangos de la ASTM C 1202 (tabla 2).

Culombios	Tipo de permeabilidad	Típico de
> 4000	Alta	Relaciones a/c altas
4000 - 2000	Moderada	Relaciones a/c de 0.40 a 0.50
2000 - 1000	Baja	Relaciones a/c < a 0.40
1000 - 100	Muy baja	Hormigones con Látex
< 100	Despreciable	Hormigones con Polímeros

**Tabla 2.- Tipos de permeabilidad de acuerdo a la ASTM C 1202**

El uso de un equipo proporciona ventajas importantes en la regulación de corriente y en la poca variación en el voltaje de salida, se calibra para que la variación sea de  $\pm 0,1$  V durante las 6 horas de prueba y es importante que el equipo seleccionado no tenga variaciones, ya que el porcentaje de variación puede ser equivalente al mismo porcentaje de error en el resultado final, prácticamente para cualquier tipo de permeabilidad. Otro factor de suma importancia es la capacidad limitada de 500 mA por canal y la capacidad máxima de salida en W relacionada directamente al número de canales provistos para la prueba. Dado que la variación de corriente dependerá de cada muestra, pudiendo ser desde 50 mA hasta más de 300 mA para hormigones de baja o alta permeabilidad respectivamente, el equipo automatizado cuenta con un seguro que interrumpe la corriente independientemente de los canales que rebasen los 500 mA en menos de las 6 horas, evitando así sobre trabajar un canal provocando una caída de corriente en el resto de los canales.



La celda con contacto a la cara de enrase, fue llenada con solución de NaCl al 3%, polarizada como negativo, y la celda posterior, fue llenada con solución de NaOH al 0,3N, polarizada como positivo (figura 1).

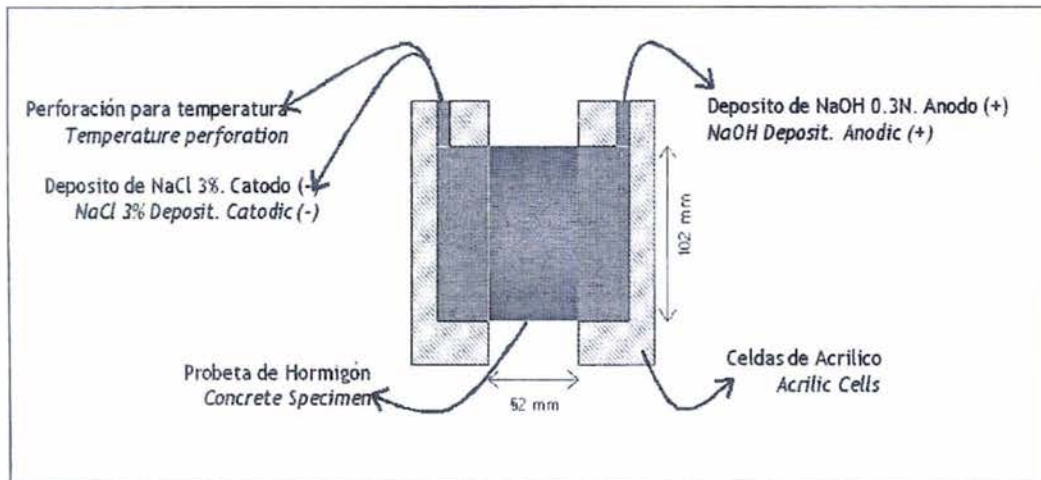


Figura 1.- Diagrama para el armado de las celdas de prueba.

Figure 1.- Test cell diagram.

Las muestras se probaron en grupos de 8 piezas, con un diferencial máximo de edad de 2 días. Cada diseño de mezcla probado por triplicado, considerando una desviación estándar máxima del 20%, independientemente de la clasificación final del hormigón, repitiendo las muestras que no cumplieron con esta condición.

## 2. Resultados y Discusión

### 2.1. Densificación de la pasta

El rol que juega la densificación de la pasta es de suma importancia e influye en cualquier factor secundario en el diseño de la mezcla, incluso cuando se tienen áridos gruesos con porosidades considerables, su efecto negativo puede ser disminuido si la pasta que lo rodea es lo suficientemente cerrada y con estructuras porosas mínimas. Para lograr este efecto en la pasta de cemento, se pueden seguir tres caminos principales.

### **a) Relación a/c**

Fundamentalmente, cuanto menos agua lleve un diseño de mezcla, los procesos de hidratación del cemento portland serán uniformes, haciendo que las moléculas de cemento hidratadas dejen un espacio menor entre ellas generando una pasta más densa, menos porosa y regularmente de menor permeabilidad.

La relación existente es directamente proporcional, a menor relación a/c la disminución es igualmente menor. Otro factor importante a considerar, es que la disminución de la relación a/c es un proceso que no implica un incremento considerable en el costo de la mezcla y si genera un impacto importante en la densificación de la pasta.

La tasa de disminución en la permeabilidad, afectada por este factor genera cambios altamente significativos en el comportamiento del hormigón, en los rangos manejados en este experimento, de 0,60 a 0,35, no existen igualdades entre una relación a/c y otra, sin embargo, habrá que considerar que, cuanto menos agua lleva un diseño de mezcla, la fluidez de la pasta será igualmente menor (figura 2).

### **b) Adicionantes cementantes suplementarios**

Con dos formas de actuar, el uso de ACS sustituido por cemento hasta en 15% puede reducir la permeabilidad de un hormigón en poco más de 50%.

La disminución obtenida con el uso de ACS es óptima a los 90 días de edad, de hecho, existe un diferencial aproximado de 20% entre las muestras probadas a 28 y a 90 días, esto puede atribuirse a que en edades tempranas el material puzolánico no ha reaccionado en cantidad suficiente y solamente actúa como relleno entre las moléculas de cemento, a medida que la hidratación del cemento continúa su proceso regular, el  $\text{Ca(OH)}_2$  disponible genera una reacción puzolánica con los ACS que terminara de rellenar los huecos moleculares que la hidratación del cemento ha dejado, formando, a edades tardías, hormigones más densos.

Con las dosificaciones de ACS experimentadas no existen igualdades, por lo que se abre un margen de diseño que permite controlar, con este factor, el nivel de permeabilidad requerido. Para establecer el rango máximo de dosificación se experimentó con un solo grupo de mezclas con la misma relación a/c y sustituciones de hasta 15%, sin embargo, desde la

adición de 10%, el decremento de la permeabilidad presenta una ganancia insignificante. Esto es debido a que la cantidad de agua y cemento han ejercido de manera óptima su papel en el hormigón, dejando muy pocos huecos donde los materiales silíceos puedan reaccionar, ocasionando un porcentaje considerable de ellos sin uso cementante en el hormigón. (figuras 3 y 4).

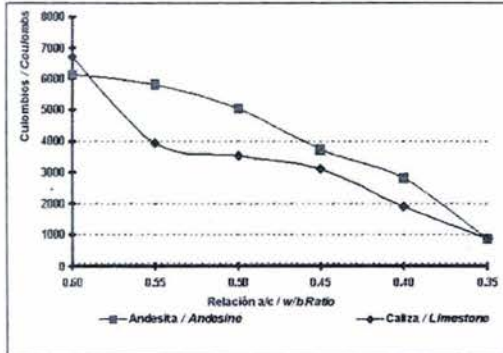


Figura 2.- Permeabilidad de acuerdo a la relación a/c y el tipo de árido grueso.

Figure 2.- w/c ratio and coarse aggregate permeability relation.

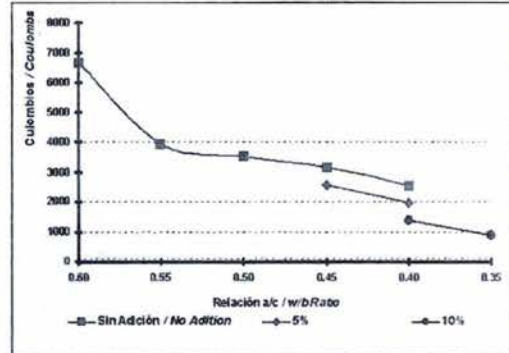


Figura 3.- Permeabilidad con relación a la dosificación de cementantes suplementarios y a la relación a/c + cementante.

Figure 3.- Supplementary cementitious and w/c ratio permeability relation.

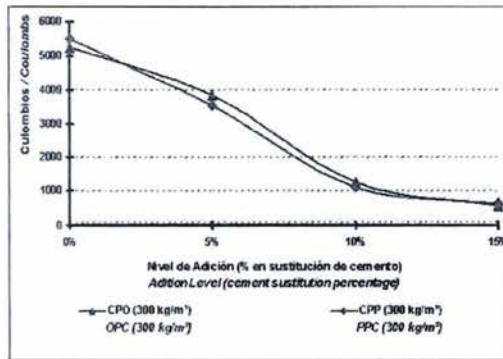


Figura 4.- Dosificación de cementantes suplementarios con dosificación a/c de 0.40 y 300 kg/m² de consumo de cemento.

Figure 4.- Supplementary cementitious addition with w/c of 0.40 and 300 kg/m² of cement amount.

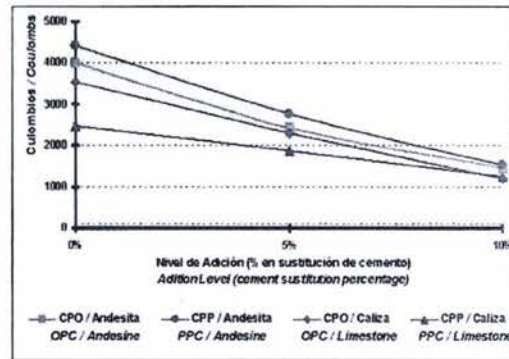


Figura 5.- Niveles de dosificación de cementantes suplementarios por tipo de cemento y árido grueso empleado.

Figure 5.- Levels of supplementary cementitious addition by cement and coarse aggregate type.

En el análisis de los resultados combinando el uso de ACS, tipo de árido grueso y tipo de cemento, es claro que los ACS son el factor fundamental para la disminución de la tasa de permeabilidad. Sin embargo, la influencia del árido grueso y el tipo de cemento siguen conservando sus tendencias y comportamiento. Mientras que para los diseños que no contienen ACS el diferencial es de hasta un 45%, para los diseños con contenidos de ACS en 10%, este diferencial llega apenas a un 20% (figura 5).

### c) Variables en el uso de cemento

Es evidente que conforme se incrementa el consumo de cemento, la tasa de permeabilidad disminuye considerablemente, logrando reducciones cercanas al 50%. A medida que el consumo de cemento aumenta, el diferencial entre un nivel y el inmediato disminuye, obteniendo los mayores beneficios entre los consumos de 250 y 300 kg/m<sup>3</sup>. Este comportamiento se presenta con mayor claridad en el CPP, logrando en los rangos de 300 a 350 kg/m<sup>3</sup>, una disminución es de 45%, sin embargo, al pasar de un consumo de 350 a 400 kg/m<sup>3</sup> esta disminución se mantiene parcialmente igual, ganado apenas un 3% extra. Para el caso del CPO, los beneficios obtenidos con los diferentes consumos son más uniformes; en los rangos más bajos de consumo, el diferencial llega a ser del 25%, y va disminuyendo paulatinamente hasta llegar a 17% entre los consumos de 350 a 400 kg/m<sup>3</sup> (figura 6).

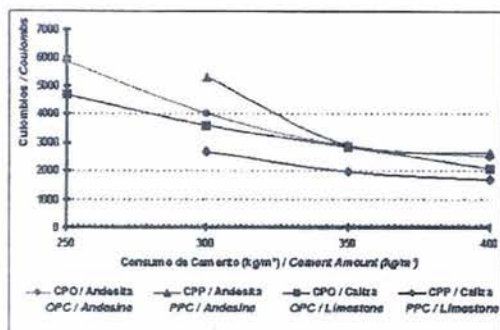


Figura 6.- Permeabilidad de acuerdo al tipo y consumo de cemento y al tipo de árido grueso.

Figure 6.- Cement type and amount and coarse aggregate type permeability.

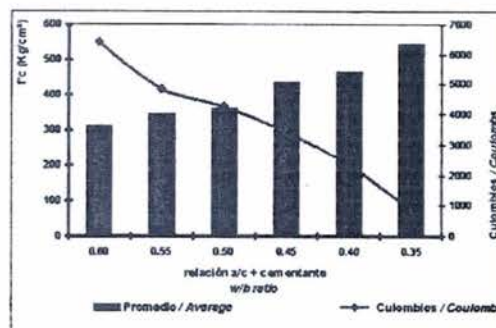


Figura 7.- Relación entre la resistencia a compresión y la permeabilidad.

Figure 7.- Compressive strength and permeability relation.

### 2.2. Porosidad intrínseca en los áridos

Independientemente de la calidad de la pasta o de los materiales que la componen, habrá que tomar en cuenta la porosidad de los áridos gruesos que es imposible de modificar. Debido al volumen que ocupan en un diseño de mezcla, el comportamiento de la resistividad se verá modificado dependiendo de las características de cada roca (tabla 4).

Litología	Caliza	Andesita
Porcentaje	100	100
Color	Gris	Gris
Dureza	3-4	5
Formas	Equidimensional, prismática y tabular	Equidimensional, prismática y tabular
Redondez	Subangulosa a angulosa	Subredondeada a subangulosa
Textura superficial	Lisa	Áspera
Sanidad	Buena	Buena a regular
Abrasión	27%	41%
Impacto	8%	14%
Densidad	2.67%	2.40%
Absorción	1.0%	4.50%
Calidad física	Buena	Buena
Calidad química	Inofensiva	Inofensiva

**Tabla 4.- Análisis de los áridos gruesos**

El conjunto de diseños de mezcla realizados para la investigación, se dividió en dos, partiendo del tipo de árido grueso utilizado. Se evaluaron áridos gruesos de andesita y caliza bajo las mismas condiciones de diseño, combinados con arena andesita.

Hay una clara tendencia a utilizar el árido de caliza antes que el de andesita (figura 2), aunque existen variaciones importantes dependiendo del rango de la relación a/c. Las influencias del agregado grueso se acentúan para los rangos de 0,55 a 0,45, donde la apertura de la pasta es tal que la permeabilidad intrínseca del agregado marca la diferencia fundamental. A partir del punto 0,45 y conforme se disminuye la relación a/c, el diferencial de utilizar un agregado de mayor permeabilidad, va perdiendo fuerza por la propia densidad y cantidad de la pasta.

### 2.3. La permeabilidad y la resistencia a compresión.

La resistencia a la compresión es inversamente proporcional a la permeabilidad, para los rangos manejados en este experimento, no existe detrimento alguno al ir aumentando la resistencia a la compresión. Sin embargo, habrá que tomar en cuenta que cuando los incrementos de resistencias superiores a los 600 kg/cm<sup>2</sup>, se logran principalmente con altos consumos de cemento, el calor de hidratación generado podría resultar en microfisuramientos que incrementan la permeabilidad, haciendo que la relación deje de ser proporcional.

### 3. Conclusiones

1. Conociendo la influencia individual y acumulada de cada factor del experimento, es posible combinarlos en diferentes calidades y cantidades para lograr permeabilidades similares, ya que los diseños de mezcla y sus componentes pueden depender de la disponibilidad local del fabricante. Al tener control sobre las variables de diseño de un hormigón, es posible evitar el sobre diseño, haciendo hormigones específicos para la permeabilidad deseada.
2. La relación a/c es la principal variable de afectación. En el experimento se determinó que a partir de relaciones a/c de 0,45 a 0,35, se logran permeabilidades aceptables para ambientes con diferentes concentraciones de cloruro. Está claro que conforme las tasas de ataque aumentan, la relación a/c deberá disminuir para equilibrar este ingreso de cloruros, esto es debido a la densificación que se logra con una hidratación más uniforme.
3. La influencia de los áridos gruesos, es otro factor relevante en la permeabilidad de los hormigones. Sin embargo, el efecto negativo de un árido poroso sólo es nocivo con relaciones a/c de 0,55 a 0,45, y es atenuado conforme la relación a/c disminuye, el consumo de cemento aumenta o se utilizan ACS.
4. El uso de ACS es determinante en el momento de diseñar un hormigón de baja permeabilidad. La adición de este tipo de materiales reduce la permeabilidad de un hormigón hasta en un 50% sin importar otro tipo de factores. Probablemente el punto más importante a destacar es el hecho de que el uso de ACS es capaz de cubrir las deficiencias que otros factores provocan en los hormigones.
5. En este experimento no se observó un comportamiento negativo o dudoso al emplear adiciones minerales en hormigones probados con la RCPT, muy por el contrario, estos hormigones presentaron los comportamientos más uniformes y estables, por lo que este método puede ser apto para este tipo de diseños.
6. El tipo y cantidad de cemento juegan un papel fundamental en la densificación de la pasta, se observó una disminución en la permeabilidad conforme el contenido de cemento aumenta. Para el caso del tipo de cemento, la influencia en la permeabilidad es mínima, además de ser atenuada por cualquier otro factor implícito en el diseño de mezcla, pero el diferencial mantiene al CPP por delante en todos los análisis realizados.
7. Aunque la resistencia a compresión no es el objetivo principal de este artículo, debido a que es un factor de calidad obligado en los hormigones, se ha determinado que en resistencias a compresión desde 300 kg/cm<sup>2</sup> y hasta 600 kg/cm<sup>2</sup>, la permeabilidad a cloruro es inversamente proporcional al incremento de la resistencia, equiparando resultados puede

decirse que los concretos con  $f'c$  mayor a  $500 \text{ kg/cm}^2$  tendrán permeabilidades menores a los 1000 culombios.

La evaluación y conocimiento preciso del empleo de los componentes de un diseño de mezcla en particular, permite al fabricante de concreto diversas alternativas de diseño para llegar a un mismo fin, dependiendo de la disponibilidad y calidades de los materiales de la zona. Lo que, a la larga, posibilita que cualquier alternativa viable pueda ser utilizada en diversos diseños que, finalmente, sea una garantía de durabilidad, funcionamiento y calidad del producto final, en cualquier condición a la que sean sometidos.